

ГІРНИЦТВО MINING

УДК 622.834.2:622.274

doi: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-2-7-22>

Л.Л. Бачурін
І.В. Іорданов
О.П. Когтєва
Є.С. Подкопась
О.І. Єфремов
А.В. Король
М.О. Григорєць

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОХОРОННИХ СПОРУД ГІРНИЧИХ ВИРОБОК

Мета роботи. Вивчення деформаційних характеристик охоронних споруд, що знаходяться під впливом зовнішніх навантажень і використовуються для підтримання бічних порід у вуглепородному масиві позаду очисного вибою.

Методи. Для досягнення поставленої мети були виконані лабораторні дослідження деформаційних характеристик охоронних споруд при одновісному стисканні.

Результати. В результаті виконаних досліджень встановлено, що при одновісному стисканні дерев'яних охоронних споруд у вигляді накатних кострів зі шпал або куців із стояків, зміна їх жорсткості зумовлена як відмінностями у властивостях деревини при дії зовнішньої сили уздовж або поперек волокон, так і конструктивними особливостями. У випадках, коли постійно діюча стискаюча сила прикладається до експериментального зразка поперек волокон (накатні костри зі шпал), зміна жорсткості відбувається за квадратичною залежністю і досягає мінімальних значень при деформації моделі на 30-35%, а при подальшому збільшенні деформації до 50% – жорсткість збільшується. Це свідчить про зростання опірності накатних кострів зовнішнім навантаженням після їх стиснення, без втрати тримкості конструкції. При дії стискаючої сили уздовж волокон (куці зі стояків), жорсткість експериментальних зразків збільшується до моменту руйнування, коли відбувається втрата тримкості конструкції. Зміна жорсткості закладних масивів з роздробленої породи за можливості їх бокового розширення відбувається внаслідок ущільнення закладного матеріалу, тобто перекомпонування частинок роздробленої породи різних фракцій в загальному обсязі.

Новизна. Характер деформування охоронних споруд, що розглядаються як збірні конструкції, може бути описаний через зміну питомої потенційної енергії деформації, що витрачається на зміну форми та/або об'єму охоронних споруд.

Практичне значення. Для забезпечення стійкості бічних порід у вуглепородному масиві, що вміщує виробки, необхідно орієнтуватися на використання податливих охоронних споруд, розташованих над відкатним штреком.

Ключові слова: охорона гірничих виробок, охоронні споруди, жорсткість, модуль деформації, одновісне стискання, бічні породи.

Вступ.

З ростом глибини розробки вугільних пластів збільшується трудомісткість підтримання гірничих виробок на виїмковій дільниці. Гірничо-геологічні умови глибоких вугільних шахт характеризуються як складні через ведення гірничих робіт в анізотропному вуглепородному масиві. До того ж, при веденні гірничих робіт можливі обвалення бічних порід і завали підготовчих виробок, що призводить до травмування гірників. У більшості випадків, причинами аварій є відсутність надійних способів забезпечення стійкості бічних порід в околиці експлуатованих виробок.

Ефективність відпрацювання вугільних пластів на виїмкових дільницях вугільної шахти і безпека ведення гірничих робіт, в значній мірі залежать від способу охорони дільничних підготовчих виробок, що застосовується. Використовувані на сьогодні способи охорони відкатних штреків ціликами вугілля не завжди забезпечують їх надійний захист від небезпечних проявів гірничого тиску.

Практика застосування безціликових способів охорони виробок показала, що при невідповідності деформаційних характеристик охоронних споруд міцності і деформаційним властивостям бічних порід, стійкість виробок погіршується. Для

забезпечення експлуатаційного стану аварійних дільничних підготовчих виробок, необхідне виконання великого обсягу ремонтних робіт, які пов'язані з перекріпленням штреків.

Таким чином, способи охорони дільничних підготовчих виробок повинні забезпечувати їх експлуатаційний стан в межах виїмкової дільниці і відповідати мінливим гірничо-геологічним умовам. Практична важливість проблеми стійкості виробок обумовлена перш за все тим, що в результаті її вирішення необхідно оцінити граничну деформацію бічних порід в залежності від деформаційних характеристик охоронних споруд, які використовуються. Такий підхід дозволить мінімізувати вплив гірничого тиску на стійкість виробок і підвищити рівень безпеки під час ведення гірничих робіт на виїмкових дільницях вугільної шахти.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми.

На сьогодні на вугільних шахтах, що розробляють вугільні пласти крутого падіння, застосовуються як безціликові схеми відпрацювання виїмкових дільниць, так і з залишенням для охорони виробок ціликів вугілля. Вельми складні гірничо-геологічні умови, властиві крутому залягання пластів, та особливості ведення гірничих робіт не дозволяють перенести успішний досвід охорони дільничних підготовчих виробок, отриманий при відпрацюванні пологих пластів, на умови крутого залягання. Традиційно, для охорони відкатних штреків на шахтах крутого падіння використовуються дерев'яні костри, кущі зі стояків, кущо-костри і накатні костри зі шпал.

В роботі [1] приведені результати випробувань стійкості відкатних штреків при різних способах охорони. Для порівняння розглядалися охорона підготовчих виробок дерев'яними конструкціями або ціликами вугілля обмежених розмірів. За результатами випробувань було встановлено, що позаду очисного забою, по довжині виїмкової дільниці, відбувається порушення цілісності нависаючої товщі й деформування

контуру виробки. При цьому проблеми попередження порушень бічних порід й забезпечення стійкості штреків це дослідження не торкалось.

Також пропонується [2] для охорони відкатних штреків та забезпечення їх експлуатаційного стану використовувати накатні костри з дерев'яних шпал. Застосування податливих дерев'яних конструкцій для охорони виробок дозволить обмежити зсуви порід на контурі відкатного штреку, але для цього необхідно враховувати деформаційні характеристики накатних кострів.

Охорона виробок дерев'яними кострами широко використовується на шахтах Донбасу [3]. Тим не менш, навіть з врахуванням переваг у простоті способу, він має суттєвий недолік, що полягає в низькій тримкості охоронних споруд. Дерев'яні стояки органного кріплення, що також використовують для охорони виробок, встановлюють вручну рядами або кущами на підшву пласта за нормаллю до нашарування під брус. Кущі зі стояків в цьому випадку є жорсткою конструкцією [4—6]. Дослідження механічних властивостей деревини різних порід при статичних навантаженнях представлені в роботах [7—9].

Відомо [10, 11], що найбільш сприятливо на стан бічних порід у вуглепородному масиві, що вміщує виробки, впливає закладка відпрацьованого простору, коли породи покрівлі і підшви позаду очисного вибою підтримуються закладним масивом. При використанні цього способу виключаються обвалення бічних порід та раптові посадки основної покрівлі. Однак, на сьогодні, з різних причин, спосіб управління покрівлею й охорони виробок закладкою виробленого простору не використовується. Це пояснюється високою вартістю і складною інфраструктурою закладного господарства.

Аналіз відомих способів охорони відкатних штреків на крутому падінні свідчить про їх різноманіття. Світовий досвід та практика розробки крутих вугільних пластів показує, що при охороні дільничних підготовчих виробок кущами зі стояків, близько 50% протяжності відкатних штреків

знаходяться у незадовільному стані. Безціликові схеми відробки виїмкових полів у певних гірничо-геологічних умовах не в повній мірі забезпечують експлуатаційний стан штреків, що примикають до очисного вибою. Все це дозволяє стверджувати про доцільність проведення експериментальних досліджень деформаційних характеристик охоронних споруд гірничих виробок, що призначені для підтримання бічних порід у вуглепородному масиві позаду очисного вибою по довжині виїмкової ділянки. На підставі таких досліджень можна розробити рекомендації із забезпечення експлуатаційного стану відкатних штреків та обґрунтуванню їх стійкості з урахуванням способів охорони, що використовуються.

Постановка задачі дослідження.

Визначити деформаційні характеристики охоронних споруд гірничих виробок, що знаходяться під впливом зовнішніх навантажень і використовуються для підтримання бічних порід у вуглепородному масиві позаду очисного вибою по довжині виїмкової ділянки.

Матеріали і методи досліджень з вивчення деформаційних характеристик охоронних споруд.

Одним з основних напрямків сучасної геомеханіки є дослідження стійкості бічних порід навколо гірничих виробок, отже й

дослідження деформаційних характеристик охоронних споруд, призначених для підтримання покрівлі і підшви вугільного пласта. Важливе при цьому вивчення особливостей поведінки охоронних споруд в умовах зовнішніх впливів.

При оцінці деформаційних властивостей експериментальних зразків в цьому дослідженні визначалися фізико-механічні характеристики охоронних споруд у вигляді накатних кострів з дерев'яних шпал, кушів зі стояків і закладного масиву з неоднорідної (за розмірами частинок) роздробленої породи. Дослідження проводили в лабораторії гірничого тиску ДВНЗ «ДонНТУ».

Зразки охоронних споруд з дерева були виконані в масштабі 1:25. Геометричні розміри зразків:

– куші зі стояків – висота (довжина стояків) $h=0,04$ м, площа поперечного перерізу $S=a \cdot b=0,04 \cdot 0,04=0,0016$ м²;

– накатні костри з дерев'яних шпал – довжина шпального бруса $0,08$ м, площа поперечного перерізу $S=a \cdot b=0,08 \cdot 0,08=0,0064$ м².

Вологість зразків на момент випробувань – 8%. Всього було випробувано 20 зразків.

Фізико-механічні властивості дерева, використовуюваного в моделях, представлені в табл. 1.

Таблиця 1 - Фізико-механічні характеристики деревини, використовуюваної для охоронних споруд

Порода	Межа міцності на стискання $\sigma_{сж}$, МПа		Модуль пружності E , МПа		Коефіцієнт Пуассона, ν	
	Вздовж волокон	Поперек волокон	Вздовж волокон	Поперек волокон	Вздовж волокон	Поперек волокон
сосна	85	86	12600	570	0,5	0,02

Відомо [4], що дерево є анізотропним матеріалом і його властивості за різними напрямками відрізняються. Випробування на стиск дерев'яних зразків проводили при дії стискаючих сил поперек волокон (накатні костри) і вздовж волокон (куші зі стояків).

Модельований закладний масив складався з неоднорідної за розмірами частинок подрібненої породи. Закладний матеріал поміщали в спеціальний мішок, що

давало можливість бічного розширення при дії зовнішньої сили. Площа поперечного перерізу охоронної споруди в спеціальному мішку, коли передбачалася можливість бічного розширення закладного матеріалу, становила $S=a \cdot b=0,16 \cdot 0,12=0,019$ м².

Фізико-механічні характеристики закладного матеріалу залежать від співвідношення фракцій вихідного матеріалу в загальному обсязі роздробленої породи. У

табл. 2 наведені дані ситового аналізу роздробленої породи відповідно до методики [12].

При проведенні досліджень величину насипної маси $\rho_{н.п.}$ (кг/м³) і пустотності М (%) закладного матеріалу визначали згідно із методикою [12]. Результати визначення $\rho_{н.п.}$ та М в лабораторних умовах представлені в табл. 3.

Випробування експериментальних зразків охоронних споруд на стиск були виконані на пресі ГП-50 (рис. 1). При випробуваннях на стиск експериментальні зразки встановлювали між плитами пресу і піддавали безперервному плавному деформуванню до повного стиснення або руйнування. При цьому реєструвалася залежність між стискаючою силою F (кН) і зменшенням висоти зразка Δh (м) [13, 14, 25, 26].

Таблиця 2 - Дані ситового аналізу роздробленої породи для експериментальних досліджень

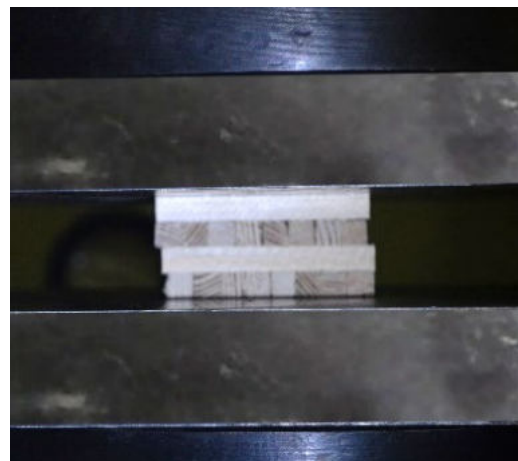
Розмір фракції, мм	% в загальному об'ємі
>5	4
4-5	16
3-4	19
2-3	24
1-2	18
0,1-1	14
<0,1	5

Таблиця 3 - Дані лабораторних досліджень визначення насипної щільності та пустотності закладного матеріалу

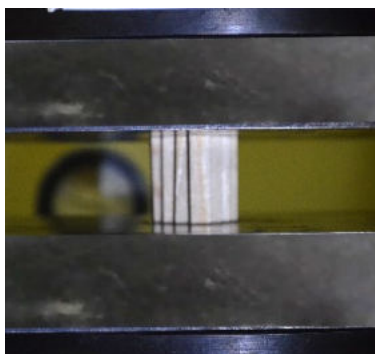
Розмір фракції, мм	$\rho_{н.п.}$, кг/м ³	М, %
0,1-5	1790	15



а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Фото експериментального обладнання та зразків для визначення деформаційних характеристик охоронних споруд: а) прес ГП-50; б) накатні костри з дерев'яних шпал; в) кущі з дерев'яних стояків; г) закладний масив з роздробленої породи.

Відносна деформація зразка визначалася за виразом

$$\lambda = \frac{\Delta h}{h} \quad (1)$$

де h - початкова висота, м;

Δh - величина деформації зразка, м.

де F – навантаження, що прикладається до зразка, Н;

S – площа поперечного перерізу зразка, м²;

σ – напруження у зразку, Па.

Слід зазначити, що модуль деформації E_g охоронних споруд відображає як пружні, так і пластичні деформації.

Відомо [16, 22—24], що зовнішні сили при деформації експериментальних зразків, виконують певну роботу. Роботу A (Дж) стискаючої сили, яку необхідно витратити на стиск зразка на величину Δh (м), можна визначити за виразом

$$A = \frac{E_g \cdot V}{2} \cdot \lambda^2, \quad (3)$$

де V – об'єм експериментального зразка, м³.

У цьому дослідженні як одна їх характеристик охоронних споруд використовувалася жорсткість C (Н/м) [17]:

$$C = \frac{F}{\Delta h}, \quad (4)$$

та ступінь пластичної деформації [18]:

$$\delta_{\text{пл}} = \frac{h - h_k}{h} \cdot 100\% \quad (5)$$

де h_k – кінцева висота зразка, що стискається, після проведення експерименту, м.

Ступінь пластичності $\delta_{\text{пл}}$ характеризує деформативну реакцію тіл, які піддають стисканню, тобто їх здатність змінювати свої розміри під впливом навантажень.

Кількісна оцінка деформаційних властивостей охоронних споруд, які використовуються для підтримання бічних порід у вуглепородному масиві, що вміщає виробку, є важливою складовою аналізу, проведеного для вирішення проблеми стійкості гірничих виробок і вибору способу

Модуль деформації E_g (Па) експериментальних зразків визначали відповідно до закону Гука [15]:

$$E_g = \frac{F \cdot h}{S \cdot \Delta h} = \sigma \frac{h}{\Delta h}, \quad (2)$$

охорони відкатних штреків на виїмковій ділянці.

Результати досліджень деформаційних характеристик охоронних споруд.

Напружено-деформований стан (НДС) експериментальних зразків залежить від механічних характеристик матеріалу, особливостей конструкції і характеру деформування. Для достовірної оцінки працездатності охоронних споруд, що знаходяться в умовах зовнішнього впливу, необхідно мати можливість розрахунку їх НДС і деформаційних характеристик з урахуванням силових факторів.

На рис. 2 представлені графіки зміни висоти h (м) експериментальних зразків із збільшенням величини стискаючої сили F (Н).

При одновісному стисканні накатних кострів зі шпал, зафіксована зміна розмірів експериментального зразка. При дії стискаючої сили $F = 105$ — 110 кН висота зразка h змінилася з $0,04$ до $0,019$ м (рис. 2а). Показник пластичної деформації відповідав значенню $\delta = 51,2$. При дії стискаючої сили на куці з дерев'яних стояків в діапазоні навантажень $0 \leq F < 60$ кН, зміна висоти зразка була незначною і склала $\Delta h = 0,005$ м. У точці К, при дії стискаючої сили величиною $F = 62$ кН, сталося руйнування охоронної споруди (рис. 2б). Показник пластичної деформації куців зі стояків дорівнює $\delta = 9,5$.

В результаті стиснення закладного масиву з роздробленої породи, відбувається його ущільнення. При дії стискаючої сили величиною $F = 105$ — 110 кН, висота експериментального зразка h зменшується від початкового значення $0,041$ м до $0,019$ м (рис. 2в). Показник пластичної деформації дорівнює $\delta = 55,4$.

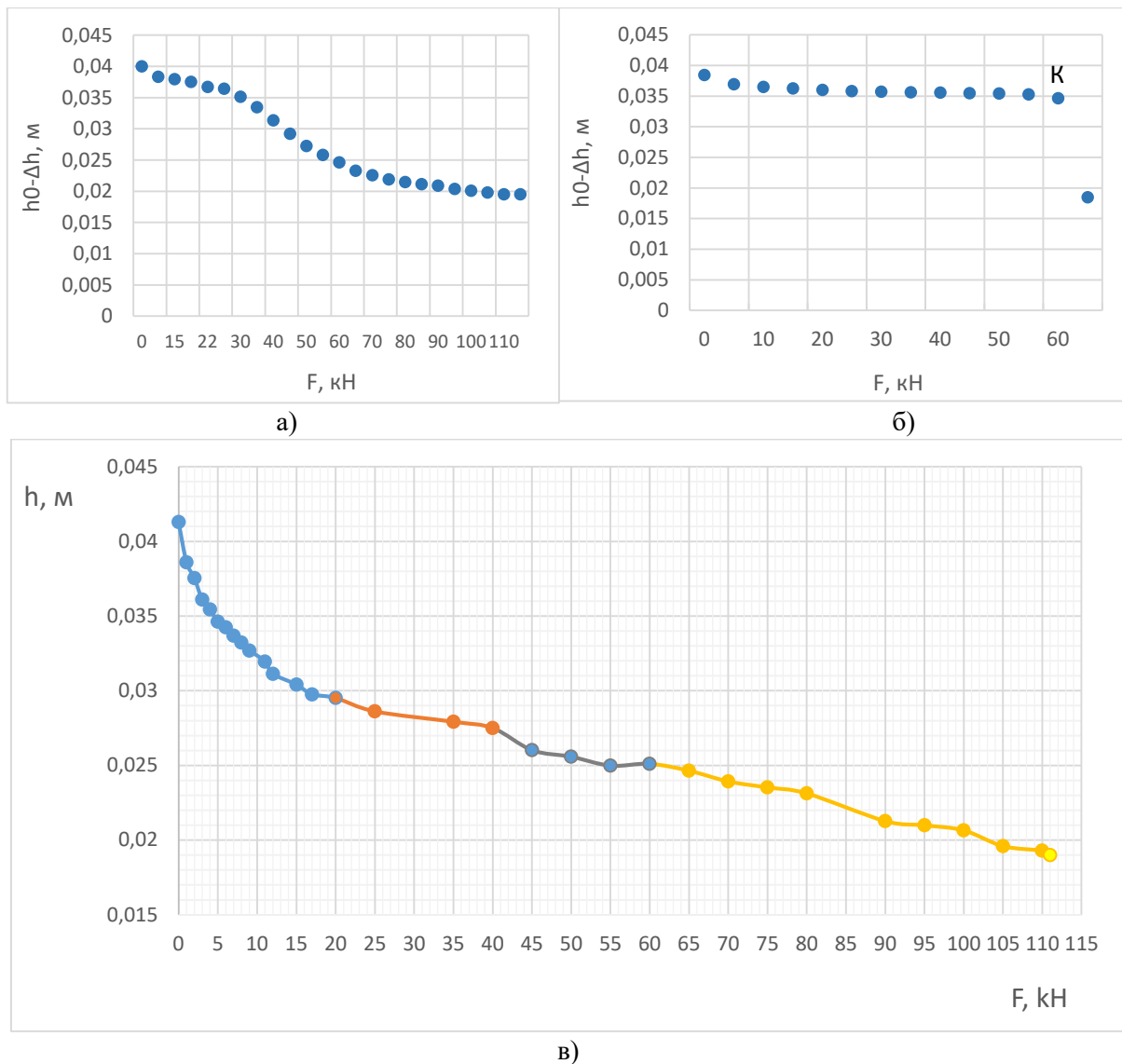


Рис. 2. Графіки зміни висоти h (м) експериментальних зразків від величини стискаючої сили F (кН): а) накатні костри з дерев'яних шпал; б) кущі зі стояків; в) закладний масив з роздробленої породи; т. К - точка, в якій зафіксовано руйнування кущів зі стояків.

На рис. 3 представлений загальний вид експериментальних зразків після їх стиснення на пресі ГП 50. На рис. 3а зображені накатні костри зі шпал, на рис. 3б

- кущі з дерев'яних стояків, на рис. 3в - закладний масив з роздробленої породи.

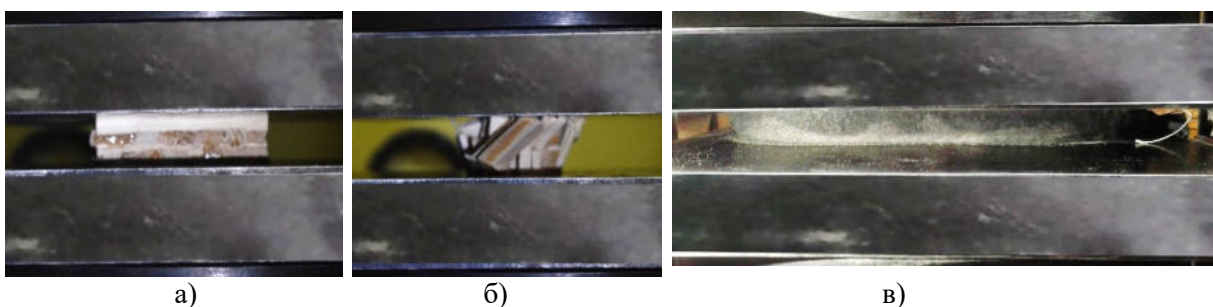


Рис. 3. Загальний вигляд експериментальних зразків після їх стиснення на пресі ГП-50: а) накатні костри; б) кущі зі стояків; в) закладний масив з роздробленої породи.

На рис. 4 представлені графіки зміни модуля деформації E_g експериментальних

зразків і роботи зовнішньої сили A при стисненні охоронних споруд на величину Δh .

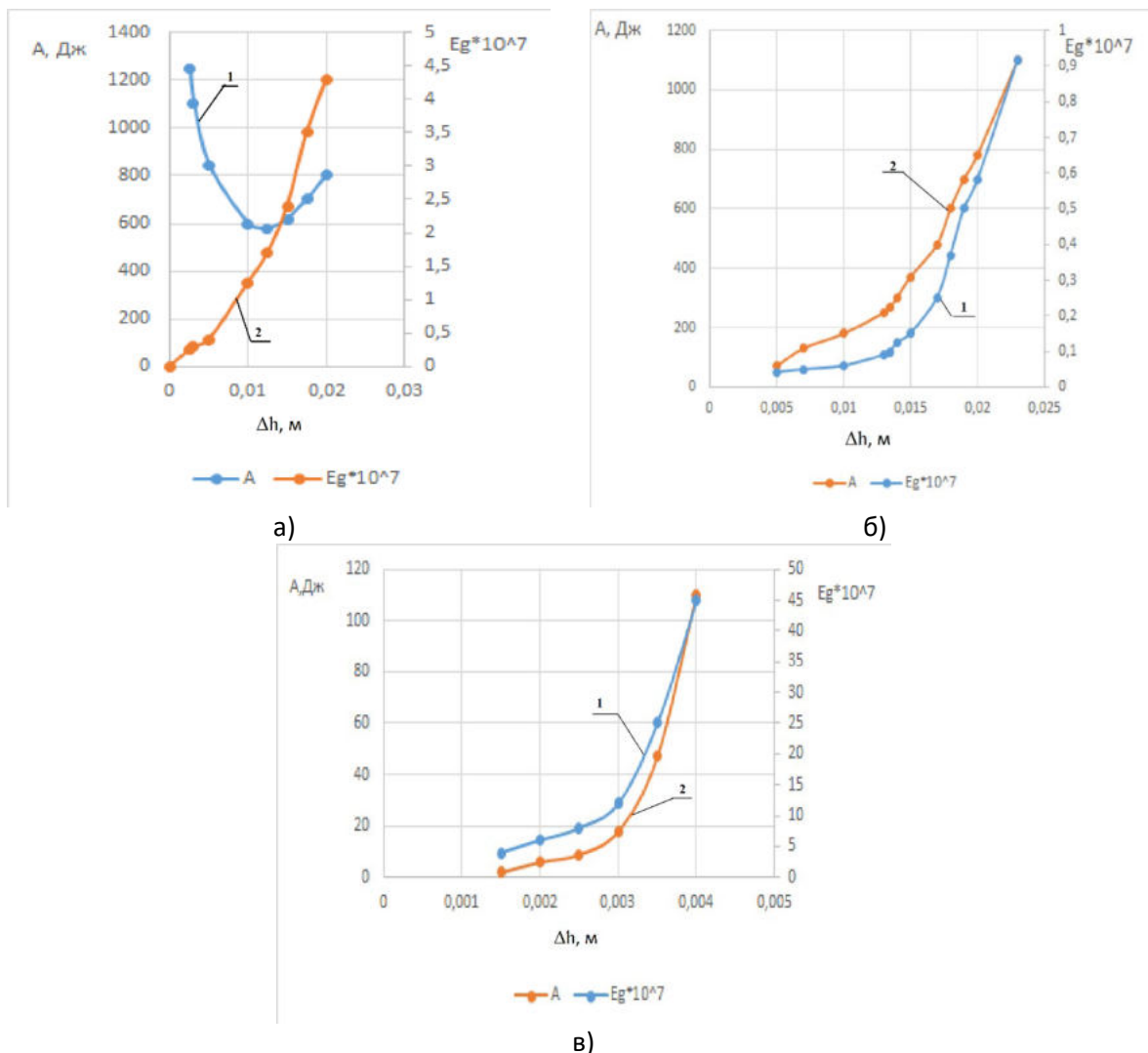


Рис. 4. Графіки зміни модуля деформації E_g і роботи зовнішньої сили A при стисненні зразків на величину Δh (м): а) накатні костри зі шпал; б) куці зі стояків; в) закладний масив з роздробленої породи; 1 - E_g (Па); 2 - A (Дж).

З рис. 4а видно, що зі зменшенням висоти зразка на величину $\Delta h = 0,012$ м початкове значення модуля деформації ($E_g = 4,5 \cdot 10^7$ Па при $\Delta h = 0,0025$ м) зменшується до $E_g = 2,1 \cdot 10^7$ Па. Після цього модуль деформації E_g збільшується і при $\Delta h = 0,02$ м стає рівним $E_g = 3,4 \cdot 10^7$ Па. Робота зовнішньої сили A при зміні висоти зразка на величину Δh збільшується і становить при $\Delta h = 0,02$ м $A = 1225$ Дж.

При стисненні куців зі стояків, зі зменшенням висоти зразка, значення модуля деформації E_g і роботи зовнішньої сили A , збільшуються (рис. 4б). З ростом величини стиснення зразка зафіксовано, що зі

збільшенням параметра Δh з 0,0015 м до 0,004 м, модуль деформації E_g збільшується з $4,7 \cdot 10^7$ Па до $44 \cdot 10^7$ Па. Робота зовнішньої сили A при стисненні куців зі стояків на величину Δh збільшується, відповідно, з 2,75 Дж до 115 Дж.

Для закладного масиву (рис. 4в) характерне плавне збільшення модуля деформації E_g і роботи зовнішньої сили A при стисненні подрібненої породи на величину Δh . При цьому, зі зростанням величини стиснення зразка Δh з 0,005 м до 0,022 м, значення модуля деформації E_g збільшується з $0,05 \cdot 10^7$ Па до $0,9 \cdot 10^7$ Па, а робота A - з 24,0 Дж до 1109 Дж.

На рис. 5 представлена діаграма стиснення експериментальних зразків. Така діаграма дозволяє оцінити поведінку

експериментальних зразків на пружній та пружно-пластичній стадіях деформування, визначити їх деформаційні характеристики.

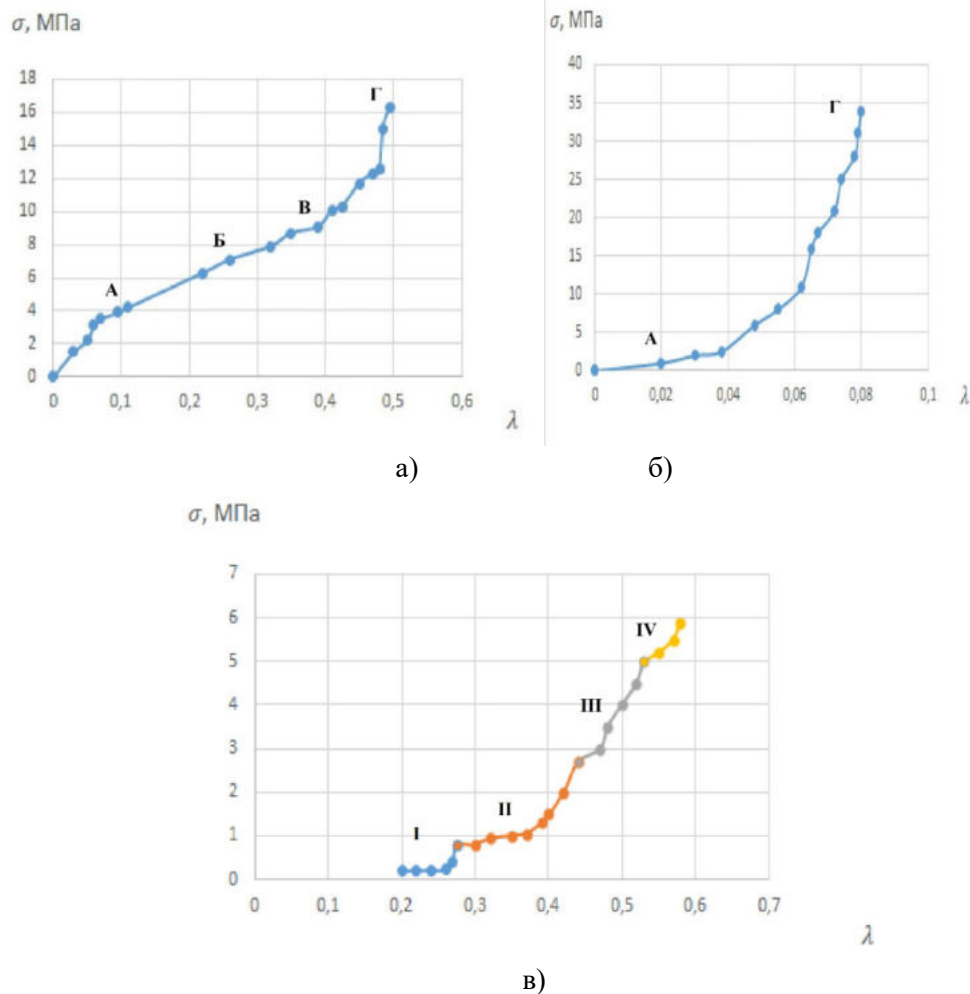


Рис. 5. Діаграма стиснення експериментальних зразків: а) накатні костри зі шпал; б) кущі зі стояків; в) закладний масив з роздробленої породи; т. А - відповідає межі пружності матеріалу охоронних споруд; I, II, III, IV - етапи ущільнення експериментального зразка з роздробленої породи.

При стисканні накатних кострів з дерев'яних шпал, як видно з рис. 5а, на початковій ділянці ОА діаграми, між напруженням σ і відносною деформацією λ дотримується прямо пропорційна залежність. У точці А діаграми відбувається перехід від пружного до пружно-пластичного деформування. Ділянка АВ на діаграмі є відрізок, на якому зразок проявляє свої податливі властивості. На ділянці ВГ спостерігається різке зниження приросту деформацій з ростом тиску, що пояснюється ущільненням накатних кострів (щільне укладання шпал перешкоджає бічним

деформаціям, що призводить до зростання жорсткості).

В результаті стиснення кущів з дерев'яних стояків на початковій ділянці ОА діаграми між напруженням σ і відносною деформацією λ простежується прямо пропорційна залежність. На ділянці АГ відбувається наростання опору кущового кріплення аж до моменту руйнування (рис. 5б).

При стисненні закладного масиву з роздробленої породи маємо діаграму стиснення, зображену на рис. 5в. З діаграми видно, що зі збільшенням відносної деформації λ , відбувається ущільнення

закладного масиву. Причому таке ущільнення відбувається в 4 етапи (позначені римськими цифрами на рис. 5в). Очевидно, що це пов'язано з переупаковкою часток роздробленої породи різних фракцій в

загальному об'ємі закладного матеріалу та додатковим їх подрібненням.

На рис. 6 наведено графіки змін жорсткості C охоронних споруд від їх відносної деформації λ .

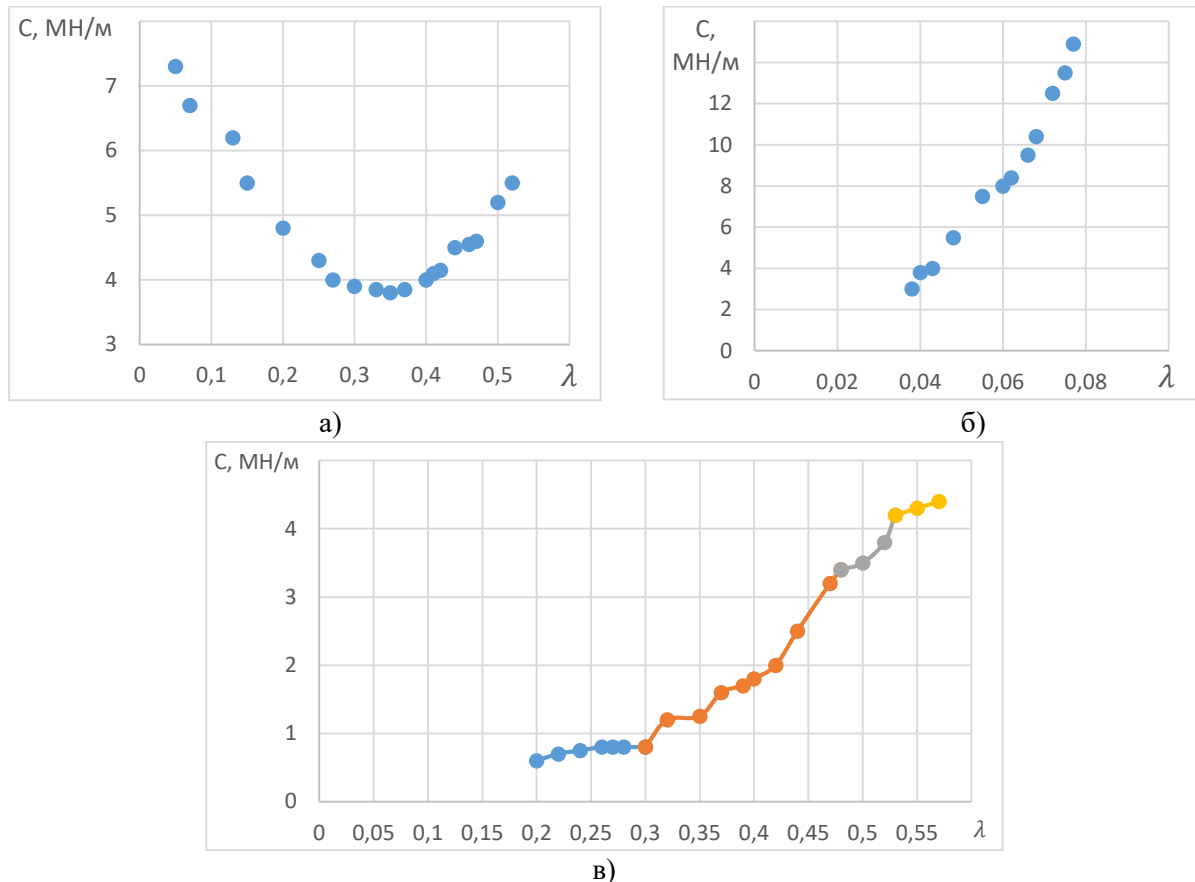


Рис.6. Графіки зміни жорсткості охоронних споруд C (Н/м) від відносної деформації λ при стисненні: а) накатних костьов зі шпал; б) кущів зі стояків; в) закладного масиву з роздробленої породи; I, II, III, IV - етапи ущільнення експериментального зразка з роздробленої породи.

Встановлено, що зміна жорсткості накатних костьов відбувається за квадратичною залежністю (рис. 6а). При $\lambda = 0,05$ величина $C = 7,2 \cdot 10^6$ Н/м. Потім, зі збільшенням відносної деформації експериментального зразка до значень $\lambda = 0,32-0,36$, жорсткість зменшується до значень, рівних $C = 3,9 \cdot 10^6$ Н/м. Після цього, зі збільшенням λ до величини $\lambda = 0,5-0,52$, жорсткість збільшується до $C = 5,7 \cdot 10^6$ Н/м (рис. 6а).

Для кущів зі стояків зафіксовано зростання жорсткості охоронних споруд зі збільшенням їх відносної деформації λ . Так, при $\lambda = 0,04$, величина жорсткості кущів зі стояків дорівнює $3,95 \cdot 10^6$ Н/м, а при $\lambda = 0,08$

значення жорсткості відповідає $C = 16 \cdot 10^6$ Н/м (рис. 6б).

Для закладного масиву характерне збільшення його жорсткості в кілька етапів. Встановлено, що при одновісному стисканні закладного матеріалу в спеціальному мішку, коли можливе бічне розширення, при $\lambda = 0,2$ величина жорсткості дорівнює $C = 0,57 \cdot 10^6$ Н/м. При збільшенні відносної деформації λ до 0,26 величина жорсткості закладного матеріалу збільшується до $C = 0,77 \cdot 10^6$ Н/м. На наступному етапі, коли λ збільшується до 0,35, величина жорсткості дорівнює $C \approx 1,25 \cdot 10^6$ Н/м. При $\lambda = 0,5$ величина $C = 3,51 \cdot 10^6$ Н/м. Далі, зі збільшенням відносної деформації закладного матеріалу, з ростом λ

до 0,55, значення жорсткості дорівнює $C=4,48 \cdot 10^6$ Н/м (рис. 6в).

Відомо [15, 19], що руйнування тіла залежить від значної кількості факторів, багато з яких мають випадковий характер і не завжди вивчені якісно. Зокрема, це структура матеріалу, характер навантажень, зовнішні умови і стан матеріалу в процесі використання.

Розглянемо стиснення експериментальних зразків з дерева. Механізм деформування досліджуємо як процес, який розвивається в дві стадії. На першій стадії відбувається пружне деформування, тобто накопичення енергії деформації. На другій стадії здійснюється пружно-пластичне деформування зразка або руйнування. Під руйнуванням будемо розуміти вичерпання тримкості тіла, яке сталося внаслідок пластичних деформацій або накопичення пошкоджень.

Кількість енергії U (Дж) пружної деформації, запасеної зразком на першій стадії, визначимо за виразом, як в [19-21]:

$$U = \frac{\sigma_{\text{пр}}^2}{2E_g} \cdot V, \quad (6)$$

де $\frac{\sigma_{\text{пр}}^2}{2E_g}$ – накопичена в одиниці об'єму потенційна енергія, Дж/м³;

$\sigma_{\text{пр}}$ – межа пружності експериментального зразка, Па;

При деформації зразка відбувається зміна його розмірів і форми. Очевидним є те, що робота зовнішніх сил витрачається на зміну об'єму і форми досліджуваної експериментальної моделі. Тоді, питому потенційну енергію охоронної споруди можна розділити на енергію зміни об'єму U_o (Дж/м³), коли для одновісного стиснення справедливий вираз [19-21, 26]

$$U_o = \sigma^2 \left(\frac{1-2\nu}{6 \cdot E_g} \right), \quad (7)$$

та енергію зміни форми

$$U_\phi = \sigma^2 \left(\frac{1+\nu}{3E_g} \right). \quad (8)$$

На рис. 7 представлені графіки зміни питомих потенційних енергій накатних кострів зі шпал і кушів зі стояків при зміні об'єму U_o та форми U_ϕ охоронних споруд від величини стискаючої сили F .

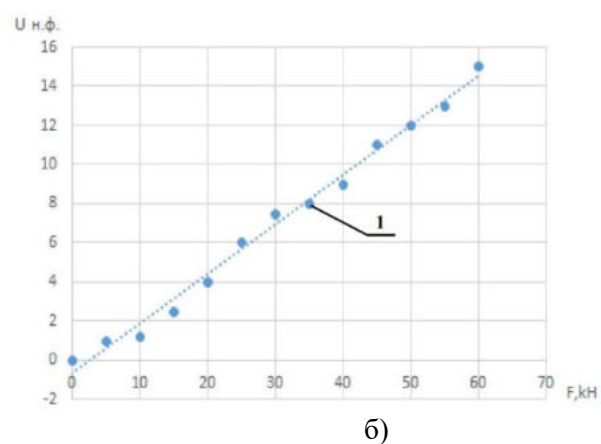
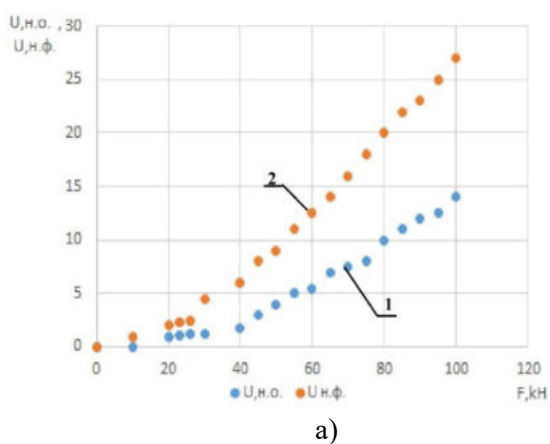


Рис. 7. Графіки змін питомої потенційної енергії накатних кострів зі шпал (а) і кушів зі стояків (б) при зміні об'єму U_o і форми U_ϕ охоронних споруд від величини стискаючої сили F (Н): 1 – U_o (Дж/м³); 2 – U_ϕ (Дж/м³).

З наведених залежностей, встановлених за виразами (7) і (8) випливає, що при деформації накатних кострів зі шпал, їх питома потенційна енергія збільшується в міру зростання стискаючої сили F . При цьому кількість питомої потенційної енергії, яка витрачається на зміну об'єму

експериментального зразка менша, ніж така, що витрачається на зміну форми (рис. 7а). Встановлено, що при стисненні накатних кострів, 34% від загальної кількості питомої потенційної енергії витрачається на зміну об'єму, а 66% — на формозміну охоронної споруди (рис. 8а). При деформації кушів зі

стояків потенційна енергія витрачається на формозміну охоронної споруди. Причому, зі збільшенням стискаючої сили F , питома потенційна енергія формозміни U_{ϕ} змінюється за лінійною залежністю (рис. 7б). У цьому випадку проявляється поздовжня деформація зразка, тобто зрушення (рис. 8).

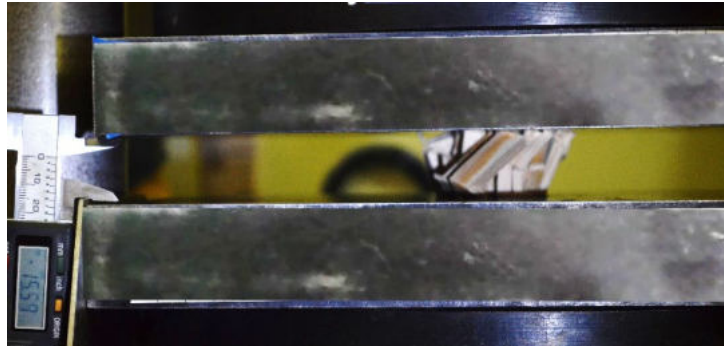


Рис. 8. Загальний вигляд деформації зсуву кушів з дерев'яних стояків.

Повну питому потенційну енергію деформації U_{Π} (Дж/м³) прийнято представляти у вигляді суми питомої енергії об'єму U_o і питомої енергії формозміни U_{ϕ} , тобто

$$U_{\Pi} = U_o + U_{\phi} \quad (9)$$

Відомо [15], що накопичена в одиниці об'єму потенційна енергія при зсуві визначається за виразом

$$U = \frac{\tau^2}{2G}. \quad (10)$$

Вважаємо, що на деформування експериментального зразка витрачається повна питома енергія пружної деформації, тобто справедлива тотожність

$$\frac{\sigma_{\text{пр}}^2}{2E} = \frac{\tau_{\text{max}}^2}{G}. \quad (11)$$

Модуль зсуву G матеріалу охоронної споруди залежить від його модуля пружності E [15]:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (12)$$

Визначимо вид виразу для визначення величини максимальних дотичних напружень при деформації охоронних споруд.

Для умов, коли деформування зразка відбувається зі зміною об'єму і форми, з урахуванням співвідношення (12):

$$\tau_{\text{max}} = \sigma_{\text{пр}} \sqrt{\frac{G}{E}} = \sigma_{\text{пр}} \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu)}}. \quad (13)$$

Основною ознакою, що характеризує деформацію зсуву, є збереження сталості об'єму [19]. Отже, в умовах зсуву об'єм експериментального зразка (кущі зі стояків) не змінюється. На певному етапі деформування відбувається тільки зміна форми.

З урахуванням даних таблиці 1, у разі використання накатних кострів зі шпал, маємо

$$\tau_{\text{max}} = 0,7 \cdot \sigma_{\text{пр}}. \quad (14)$$

У разі, коли деформування експериментального зразка відбувається тільки за рахунок формозміни, з урахуванням виразу (9) маємо

$$\frac{\sigma_{\text{пр}}^2(1+\nu)}{3E} = \frac{\tau_{\text{max}}^2}{2G}. \quad (15)$$

Звідки максимальні дотичні напруження визначаються як

$$\tau_{\text{max}} = \sigma_{\text{пр}} \sqrt{\frac{2(1+\nu)}{3E}} \cdot G = 0,57 \cdot \sigma_{\text{упр}}. \quad (16)$$

Стосовно до виконаних експериментів і виходячи з залежностей, наведених на рис. 5, вважаємо, що для накатних кострів $\sigma_{\text{пр}} = 4,1$ МПа, а для кушів зі стояків $\sigma_{\text{пр}} = 1,2$ МПа. З огляду на це, використовуючи вирази (14) і (16), отримаємо величину максимальних дотичних напружень:

- для накатних кострів $\tau_{\text{max}} = 2,87$ МПа;

- для кушів зі стояків $\tau_{\text{max}} = 0,68$ МПа.

Очевидно, чим більше величина τ_{max} (МПа), тим податливіше конструкція.

Розрахунок і практичний вимір величини дотичних напружень τ_{max} (МПа), визначеної за виразами (15) і (17), необхідні для оцінки стійкості охоронних споруд. Слід зазначити, що зміна величини нормальних і дотичних напружень при стисканні експериментальних зразків призводить до

різних наслідків, що і враховувалося при проведенні даних досліджень.

Обговорення результатів досліджень деформційних характеристик охоронних споруд.

В результаті виконаних експериментальних досліджень вивчені деформційні характеристики охоронних споруд, які перебували під впливом зовнішніх навантажень. В якості основних показників, які характеризують деформційні властивості охоронних споруд, використовували величину відносної деформації λ експериментальних зразків (1), модуль деформації E_g (2) і жорсткість C (4).

Зафіксовано, що після одновісного стиску експериментальних зразків (рис. 2) під дією стискаючої сили F випробовувані моделі змінюють свою форму і розміри (рис. 3). Такі зміни можуть перешкоджати нормальній роботі охоронних споруд.

При проведенні досліджень, після повного стиснення експериментальних зразків, коли їх відносна деформація λ з ростом зовнішнього навантаження F збільшується (рис. 2), був встановлений показник пластичності δ охоронних споруд (5). Цей показник характеризує опір деформації використовуваних охоронних споруд. Експериментально встановлені значення свідчать про те, що зі збільшенням показника пластичності δ більш виражено проявляються податливі властивості охоронних споруд (накатні костри $\delta = 51,2$; закладний масив $\delta = 54,5$). Зі зменшенням цього показника збільшується схильність охоронних споруд до крихкого руйнування (кущі зі стояків $\delta = 9,5$).

Модуль деформації E_g (2) являє собою узагальнену характеристику експериментальних зразків, яка відображає як пружні, так і пластичні деформації охоронних споруд. Встановлено, що величина модуля деформації E_g змінюється в процесі безперервного впливу зовнішнього навантаження на охоронне спорудження (рис. 4). При стисненні накатних кострів зі шпал модуль деформації E_g спочатку зменшується, потім, з певного моменту, спостерігається його зростання (рис. 4а).

При стисненні кушів зі стояків або закладного масиву зафіксовано зростання E_g зі збільшенням Δh (рис. 4б, в). Чим більше модуль деформації E_g , тим більша жорсткість охоронної споруди (рис. 4б), а отже, важче деформувати експериментальний зразок (рис. 4). Це підтверджують залежності, що відображають зміну роботи A стискаючої сили, яка витрачається на стиснення експериментального зразка на величину Δh (вираз (3), рис. 4). Так, при зменшенні висоти зразка на величину $\Delta h = 0,004$ м, робота стискаючої сили для накатних кострів дорівнює $A \approx 35$ Дж, закладного масиву $A \approx 16$ Дж, а кушів зі стояків $A \approx 115$ Дж. При деформації охоронних споруд повну роботу зовнішніх сил можна розглядати як суму робіт, витрачених на пружну і пластичну деформацію.

З діаграми стиснення експериментальних зразків (рис. 5) видно поведінку охоронних споруд в пружній і пружно-пластичній стадіях. Слід зазначити, що у розглянутих випадках зі зростанням навантаження σ , що прикладається до зразків, зміна їх відносної деформації λ має характерні особливості. При статичному впливі зовнішньої сили F , для накатних кострів зі шпал або закладного масиву, характерне ущільнення охоронних споруд (рис. 5а, в), а для кушів зі стояків - збільшення їх опору (рис. 5б). Для експериментального зразка з роздробленої породи, при зростанні навантаження σ на інтервалах I-II-III-IV, відбувається перепакування частинок роздробленої породи, тобто взаємне зміщення фракцій відносно одна одної в загальному об'ємі із заповненням пустот (рис. 5б), а також додаткове подрібнення матеріалу. Втім, це питання вимагає додаткових експериментальних досліджень.

Зміна жорсткості C (Н/м) експериментальних зразків відбувається в результаті їх стиснення (рис. 6). Причому, при постійно діючому навантаженні зміна жорсткості накатних кострів відбувається за квадратичною залежністю, коли зі збільшенням їх відносної деформації при одновісному стиску до $\lambda = 0,3—0,35$,

жорсткість зменшується на 45%; потім, у зв'язку з обмеженими бічними деформаціями, яким перешкоджає щільне укладання шпал, спостерігається збільшення жорсткості на 40%, при зростанні відносної деформації до $\lambda = 0,52—0,55$ (рис. 6а). При цьому відбувається зміна і об'єму, і форми охоронної споруди (рис. 7а).

Для кушів зі стояків, в результаті їх стиснення, жорсткість C збільшується до моменту руйнування охоронної споруди (рис. 6б). На цьому інтервалі формозміни охоронної споруди питома потенційна енергія зміни форми U_ϕ збільшується за лінійною залежністю з ростом стискаючої сили F (рис. 7б).

З огляду на те, що нормальні напруження призводять до крихкого руйнування, а дотичні напруження відповідальні за податливість, величину останніх можна визначити за виразами (14) і (16), використовуючи діаграму стиснення охоронних споруд (рис. 5).

Зміна жорсткості закладного масиву відбувається в результаті ущільнення неоднорідного (за розмірами частинок) вихідного матеріалу в загальному об'ємі роздробленої породи, обумовленого перекомпонуванням фракцій, заповненням пустот і додатковим подрібненням матеріалу (рис. 6б).

Висновки.

Деформаційні характеристики охоронних споруд, як системи, обумовлюють їх здатність реагувати на вплив різних зовнішніх факторів, що проявляються при розвантаженні вуглепородного масиву, що вміщає вироблення.

В результаті виконаних досліджень деформаційних характеристик охоронних споруд гірничих виробок, призначених для підтримання бічних порід позаду очисного вибою у вуглепородному масиві, можна зробити висновок, що охорона відкатних штреків кушами зі стояків при розробці вугільних пластів малоефективна.

При випробуваннях на стиск експериментальних зразків встановлено, що жорсткість накатних кострів з дерев'яних шпал з ростом зовнішнього навантаження,

яке прикладається до конструкції поперек волокон деревини, пов'язана квадратичною залежністю з відносними деформаціями охоронних споруд при їх одновісному стисканні. Значення жорсткості кушів зі стояків при дії зовнішнього навантаження уздовж волокон зростають до максимальних значень в діапазоні зміни відносної деформації охоронних споруд $0 \leq \lambda \leq 0,1$. При цьому повна потенційна енергія деформації виражається у вигляді формозміни охоронних споруд, коли спостерігається лінійне зростання встановленої залежності, зі збільшенням стискаючої сили до моменту руйнування охоронної споруди. При стисненні вздовж волокон охоронна споруда у вигляді кушів зі стояків поводить як крихке тіло, руйнування якого відбувається раптово. Значення жорсткості закладного масиву, який має можливість бічного розширення, збільшуються у міру зростання відносної деформації, коли відбувається поетапне ущільнення подрібненої породи за рахунок перепакування фракцій різних розмірів в загальному об'ємі закладного матеріалу.

Для забезпечення стійкості бічних порід у вуглепородному масиві, що вміщає виробку, необхідно покладатись на застосування піддатливих охоронних споруд, розташованих над штреком. При стисненні таких конструкцій відбувається плавний прогин бічних порід над виробкою, що охороняється, і обмежуються зміщення покрівлі і підосви на контурі виробки. При цьому податливі охоронні споруди повинні бути стійкими, щоб забезпечити тримкість охоронної конструкції.

Список літератури

1. Liashok, Ya, Iordanov, I., Chepiga, D and Podkopaev S. Experimental studies of the seam openings competence in different methods of protection under pitch and steep coal seams development. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. Vol.12, issue 4. P. 9-19. DOI:<https://doi.org/10.15407/mining12.04.009>
2. Чепіга Д.А. Обґрунтування та розробка способів підвищення безпеки праці гірників у виїмкових дільницях глибоких шахт: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.26.01. / ДВНЗ «ДонНТУ», Покровськ, 2019. 24 с.
3. Селезень А. Л., Томасов А. Г., Андрушко В. Ф. Поддержание подготовительных выработок при разработке крутых пластов. Москва: Недра, 1977. 205 с.

4. Насонов А.А. Анализ способов и конструкций, применяемых для охраны выемочных выработок. *Перспективы развития Восточного Донбасса: сборник научных трудов*. Новочеркасск. 2008. С. 47-128.
5. Сторчак Г.Г. Способы охраны выработок, предназначенных для повторного использования. *Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2010»*. Дніпро, 2010. С. 211 -215.
6. Солодянкин А.В., Мищенко М.Э. Поддержание подготовительных выработок для их повторного использования. *Перспективы развития строительных технологий: 9-я междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов*. (Днепр, 23-24 апреля 2015г). Днепр, 2015. С. 228-234.
7. Волынский В.Н. Взаимосвязь и изменчивость показателей физико-механических свойств древесины. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2006. 217 с.
8. Madsen B. Duration of load test for wet lumber in bending. *Forest Products Journal*. 1975. No 5. P. 33-40.
9. Дефдиев С.В., Копаница Д.Г., Тутатчиков Р.С., Карасиев М.А. Влияние скорости одноосного сжатия на сопротивление «чистых» образцов древесины сосны. *Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции*. 2017. №1(69). С. 11-18.
10. Жуков В. Е. Об одной стратегической ошибке в разрешении проблемы разработки крутых пластов. *Уголь Украины*. 2001. №7. С. 6-10.
11. Шашенко А. Н., Пустовойтенко В. П., Сдвижкова Е.А. Геомеханика. Київ: Новий друк, 2016. 528 с.
12. Лабораторный практикум по курсу «Механика горных пород». / С. В. Подкопаев, Н. Н. Гавриш, Б. М. Деглин, В. И. Каменец, С. А Зинченко. Донецк: ДонНТУ, 2012. 48с.
13. Bedford A., Liechti K. M. *Mechanics of Materials*. Springer, 2020. 1023 p.
14. Борщ-Компониц В. И., Практическая механика горных пород. Москва: Горная книга, 2013. 322 с.
15. Тимошенко С. П., Gere Дж. Механика материалов. Санкт-Петербург: Лань, 2012. 672с.
16. Berber I. R. *Intermediate Mechanics of Materials*. Springer, 2010. 618p.
17. Pariseau, W. G. *Design Analysis in Rock Mechanic*. Netherlands: Taylor & Francis/Balkema, 2006. 560p.
18. Глебов И. Т. Древесиноведение и материаловедение. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 212с.
19. Стуржанов В. В., Бурмашева Н. В. Теория упругости: Основные положения. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2019. 204с.
20. Кочегаров Г.Г. Энергия и механизм квазимикропластической деформации твердых тел. *Письма в ЖТФ*. Санкт-Петербург, 2000. Т. 26, В. 11. С. 41-46.
21. Мешков Ю.Я. Концепция критической плотности энергии в моделях разрушения твердых тел. *Успехи физики металлов*. 2001, Т. 2. с. 7-50. DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.02.01.007>
22. Потапова Л. Б., Ярцев В. П. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения? Москва: Машиностроение-1, 2005. 244 с.
23. Zwikker C. *Physical Properties of Solid Materials*. London. New York: Pergamon Press, 1955. 242p.
24. Механика материалов: практикум виртуальных лабораторных работ / В.Н. Основин и др. Минск: БГАТУ, 2012. 120с.
25. Леонович С. Н., Петренко С. И. Основы физики твердого тела для строителей: пособие. Изд.2-е, исп. и доп. Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2010. 340с.
26. Кузнецов С. И. Физические основы механики. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 118с.

References

1. Liashok, Ya.O., Iordanov, I.V., Chepiga, D. A., Podkopaev S.V. (2018). Experimental studies of the seam openings competence in different methods of protection under pitch and steep coal seams development. *Mining of Mineral Deposits*, 12(4), 9-19. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.009>
2. Chepiga, D.A. (2019) *Obgruntuvania ta rozrobka sposobiv gs dyshchenia bezpeky pratsi hirnykyv u vyimkovykh dilnytsiakh hlybokyykh shakht*. (Avtoref. Dys. kand.tekhn.nauk). Donetsk National Technical University, Pokrovsk. (in Ukrainian)
3. Selezen, A. L., Tomasov, A. G., Andrushko, V. F. (1977) *Podderzhanie podgotovitelnykh vyrobotok pry razrobote krutykh plastov*. Moskva: Nedra. (in Russian)
4. Nasonov, A. A. (2008). *Analiz sposobov i konstruktsey, prymeriaemykh dlia ohrany vyemochnykh vyrobotok. Perspektivy razvitiia Vostochnogo Donbassa: sb.nauch.trudov*, 47-128. (in Russian)
5. Storchak, G. T. (2010). *Sposoby okhrany vyrobotok, prednaznachenyykh dlia povtornogo ispolzovaniia. Materialy mizhnarodnoi konferentsii "Forum hirnykyv – 2010"*, 211-215. (in Russian)
6. Solodianskin, A. V., Mishchenko, M. E. (2015). *Podderzhanie podgotovitelnykh vyrobotok dlia ikh povtornogo ispolzovaniia. Perspektivy razvitiia stroitelnykh tekhnologii: 9-ia Mezhdyn.nauchno-prakt.konf.molodykh uchenykh, aspirantov i studentov*. Dnepr. (in Russian)
7. Volynskii, V. N. (2006). *Vzaimosviaz i izmenchivost pokazatelei fiziko-mekhanicheskikh svoistv drevesiny*. Arkhangelsk: Izd-vo AGTU. (in Russian)
8. Madsen, B. (1975). Duration of load test for wet lumber in bending. *Forest Products Journal*, 25(5), 33-40.
9. Defdiev, S. V., Kopanitsa, D. G., Tutatchikov, R. S., Karasiev, M. A. (2017). *Vliianie skorosti odnoosnogo szhatiia na soprotivlenie "chistykh" obraztsov drevesiny sosny. Teoriia inzhenernykh sooruzhenii. Stroitelnye konstruktsey*, 1(69), 11-18. (in Russian)
10. Zhukov, V.E. (2001) *Ob odnoi strategicheskoi oshybke v razreshenii problem razrobki krutykh plastov, Ugol Ukrainy*. 7, 6-10. (in Russian)
11. Shashenko, A.N., Pustovoitenko, V.P., Sdvizhykova, E.A. (2016). *Geomekhanika*. Kiev: Novyi druk. (in Russian)
12. Podkopaev, S. V., Gavriash, N. N., Deglin, B. M., Kamenets, V. I., Zinchenko, S. A. (2012). *Laboratoryni*

praktikum po kursu "Mekhanika gornyykh porod" Donetsk: DonNTU. (in Russian)

13. Bedford, A., Liechti, K. M. (2020) *Mechanics of Materials*. Springer.

14. Borshch-Komponiets, V.I. (2013). *Prakticheskaya mekhanika gornukh porod*. Moskva: Gornaia kniga. (in Russian)

15. Timoshchenko, S. P., Gere, Dzh. (2012). *Mekhanika materialov*. Sankt-Peterburg: Lan. (in Russian)

16. Berber, I.R. (2010). *Intermediate Mechanics of Materials*. Springer.

17. Pariseau, W. G. (2006). *Design Analysis in Rock Mechanics*: Netherlands: Taylor & Francis/Balkema.

18. Glebov, I. T. (2020). *Drevesinovedenie I materialovedenie*. Sankt-Peterburg: Lan. (in Russian)

19. Sturzhanov, V. V., Burmasheva, N. V. (2019). *Teoriia uprugosti: Osnovnye polozheniia*. Ekaterinburg: Uralskiy un-t. (in Russian)

20. Kochegarov, G. G. (2000). Energiia i mekhanizm kvazimikroplasticheskoi deformatsii tverdykh tel. *Pisma v ZHTF*, 26(11), 41-46. (in Russian)

21. Meshkov, Yu. Ya. (2001) The Concept of a Critical Density of Energy in Models of Fracture of Solids. *Usp. Fiz.* 1, 7-50. (in Russian) <https://doi.org/10.15407/ufm.02.01.007>

22. Potapova, L. B., Yartsev, V. P. (2005). *Mekhanika materialov pri slozhnom napriazhenom sostoianii*. Moskva: Mashynostroenie-1. (in Russian)

23. Zwikker, C. (1955). *Physical Properties of Solid Materials*. London. New York: Pergamon Press.

24. Osnovin, V. N. (2012). *Mekhanika materialov: praktikum virtualnykh laboratornykh rabot*. Minsk: BGATU. (in Russian)

25. Leonovich, S.N., Petrenko, S.I. (2010). *Osnovy fiziki tverdogo tela dlia stroitelei: posobie*. Minsk: BNTU. (in Russian)

26. Kuznetsov, S.I. (2006). *Fizicheskie osnovy mekhaniki*. Tomsk: TPU. (in Russian)

Надійшла до редакції 09.12.2020

Рецензент д-р. геол. наук, проф. В.І. Альохін

Бачурін Леонід Леонідович - канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; 85300, м. Покровськ, пл. Шибанкова 2; orcid.org/0000-0003-2513-7284.

E-mail: leonid.bachurin@donntu.edu.ua

Юрданов Ігор В'ячеславович - канд. техн. наук, генеральний директор Товариство з обмеженою відповідальністю «Виробнича компанія ЕЛТЕКО»; 85103, м. Костянтинівка, Донецька обл., вул. Олексі Тихого, 3.

E-mail: gendir@eme.kiev.ua

Когтєва Ольга Павлівна - аспірант ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; 85300, м. Покровськ, пл. Шибанкова 2; orcid.org/0000-0001-7282-8243.

E-mail: olha.kohtieva@donntu.edu.ua

Подкопась Євген Сергійович - аспірант ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; 85300, м. Покровськ, пл. Шибанкова 2.

E-mail: podkopaev96@gmail.com

Єфремов Олег Ігорович - аспірант ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; 85300, м. Покровськ, пл. Шибанкова 2.

E-mail: 2207250@gmail.com

Король Антон В'ячеславович - аспірант ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; 85300, м. Покровськ, пл. Шибанкова 2; orcid.org/0000-0001-6667-425X.

E-mail: korolv2017@gmail.com

Григорєв Максим Олегович - аспірант ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; 85300, м. Покровськ, пл. Шибанкова 2; orcid.org/0000-0003-1646-5294.

E-mail: maksym.hryhorets@donntu.edu.ua

EXPERIMENTAL STUDIES OF DEFORMATION CHARACTERISTICS OF MINE PROTECTION STRUCTURES

The purpose of the article. Studying deformation characteristics of protective structures under the influence of external loads used to maintain lateral rocks in the coal massif behind the production face.

Methods. To achieve this goal, laboratory studies of the deformation characteristics of security structures under uniaxial compression were performed.

Results. As a result of the research it has been established that at uniaxial compression of wooden protective constructions in the form of rolling fires from sleepers or bushes from risers, change of their rigidity is caused both by differences in properties of wood at action of external force along or across fibres, and design features. In cases where a constant compressive force is applied to the experimental sample across the fibres (rolling fires from sleepers), the change in stiffness is quadratic and reaches minimum values when the deformation of the model by 30-35%, and with a further increase in deformation to 50% stiffness increases. This indicates an increase in the resistance of rolling fires to external loads after their compression, without losing the strength of the structure. Under the action of compressive force along the fibres (bushes of risers), the stiffness of the experimental samples increases until the moment of destruction, when there is a loss of strength of the structure. The change in the stiffness of embedded arrays of crushed rock, if possible, their lateral expansion occurs due to the compaction of embedded material, i.e. recomposition of particles of crushed rock of different fractions in the total volume.

Novelty. *The nature of the deformation of security structures considered as prefabricated structures can be described by the change in the specific potential deformation energy spent on changing the shape and/or volume of the protective structures.*

Practical meaning. *To ensure the stability of the side rocks in the coal massif containing the workings, it is necessary to focus on the use of flexible protection structures located above the retractable roadway.*

Key words: *protection of mine workings, protective constructions, rigidity, deformation module, uniaxial compression, lateral rocks.*

Bachurin Leonid, Associate Professor of the Department of Mining Management, Donetsk National Technical University (2, Shybankova Ave., Pokrovsk, Ukraine, 85300).

E-mail: leonid.bachurin@donntu.edu.ua

Yordanov Igor, Candidate of Technical Sciences, General Director of Limited Liability Company Manufacturing Company ELTEKO (LLC MC ELTEKO) (3, Oleksy Tyhoho str., Kostiantynivka, Ukraine, 85103).

E-mail: gendir@eme.kiev.ua

Kohtieva Olha, PhD Student of the Department of Mineral Deposits, Donetsk National Technical University (2, Shybankova Ave., Pokrovsk, Ukraine, 85300).

E-mail: olha.kohtieva@donntu.edu.ua

Podkopyayev Yevgen, PhD Student of the Department of Mineral Deposits, Donetsk National Technical University (2, Shybankova Ave., Pokrovsk, Ukraine, 85300).

E-mail: podkopyayev96@gmail.com

Yefremov Oleh, PhD Student of the Department of Mineral Deposits, Donetsk National Technical University (2, Shybankova Ave., Pokrovsk, Ukraine, 85300).

E-mail: 2207250@gmail.com

Korol Anton, PhD Student Donetsk National Technical University (2, Shybankova Ave., Pokrovsk, Ukraine, 85300).

E-mail: akorolv2017@gmail.com

Hryhorets Maksym, PhD Student of the Department of Mineral Deposits, Donetsk National Technical University (2, Shybankova Ave., Pokrovsk, Ukraine, 85300).

E-mail: maksym.hryhorets@donntu.edu.ua