

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОБРОБКИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ ІЗ УРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

В статті наведені результати математичного моделювання процесу монтажу збірної оправи при щитовій проходці. Розроблена скінченно-елементна модель перегінного тунелю, в якій можливо відтворити вплив гідравлічних циліндрів щита на оправу та проаналізовано результати моделювання такого випадку.

В статье приведены результаты математического моделирования процесса монтажа сборной обделки при щитовой проходке. Разработана конечно-элементная модель перегонного тоннеля, в которой возможно отобразить влияние гидравлических цилиндров щита на обделку и проанализированы результаты моделирования такого случая.

The results of mathematical simulation for process of assembling the sectional casing during heading works are presented in the paper. The finite-element model of wayside is developed, in which it is possible to represent the influence of hydraulic cylinders of a heading machine on the casing and the results of simulation of such a case are analysed.

Важливу роль у формуванні НДС системи «кріплення–масив» відіграють технологічні процеси проходки виробки, монтажу обробки та первинного нагнітання. Причому, частіш усього, при дослідженні розподілу напружень та переміщень у системі, наявність щита та щитового комплексу не враховують, хоча відомо, що від технології виконання прохідницьких робіт залежить стійкість лоба забою та міцність оточуючого масиву [1, 2]. Тому для більш точного відображення технологічних процесів розроблено модель, в якій окрім обробки змодельований щит із визначеними геометричними розмірами та деформаційними характеристиками. При щитовій проходці основним силовим фактором, який значно змінює картину напружень, є дія щитових гідроциліндрів (ГЦ), причому складність картини НДС при її врахуванні полягає в тому, що її напрямлення ортогональне дії гірського тиску. На рис. 1 показано частину фрагменту моделі із змодельованою дією щитових ГЦ.

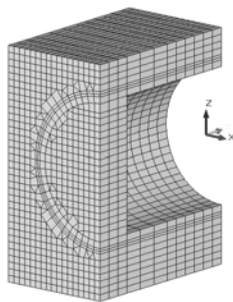


Рис. 1. Модель системи «кріплення–масив» для випадку щитової проходки

Довжина щита, яка була прийнята до розрахунку, становила 4.5 м, товщина оболонки – 5 см, матеріал щита – сталь Ст5, модуль пружності  $E=200\ 000$  МПа, коефіцієнт Пуасона  $\mu=0.3$ , густина  $\rho=7.7$  т/м<sup>3</sup>. Для того, щоб змодельувати ситуацію при проходці тунелю щитом, перед ним було залишено шар ґрунту із деформаційними характеристиками оточуючого масиву (глина спонділова суха маловолога з коефіцієнтом за М. М. Протод'яконовим  $f=1$ , модуль пружності  $E=42$  МПа, коефіцієнт Пуасона  $\mu=0.3$ , густина  $\rho=1.9$  т/м<sup>3</sup>), шириною 3 м, а після щита розміщено обробку із залізобетону В30, модуль пружності  $E=38\ 500$  МПа, коефіцієнт Пуасона  $\mu=0.02$ , густина  $\rho=2.5$  т/м<sup>3</sup>, довжиною 6 м. Таким чином, була змодельована частина системи «кріплення–масив» з урахуванням дії щита та вже змонтованої обробки. Розподіл деформаційних характеристик наведено на рис. 2, на якому також показано розміщення дії щитових ГЦ.

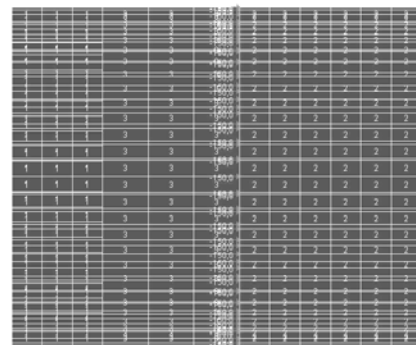


Рис. 2. Карта деформаційних характеристик моделі

На основі результатів розрахунку (рис. 3-4) проведено аналіз впливу ГЦ на НДС системи.

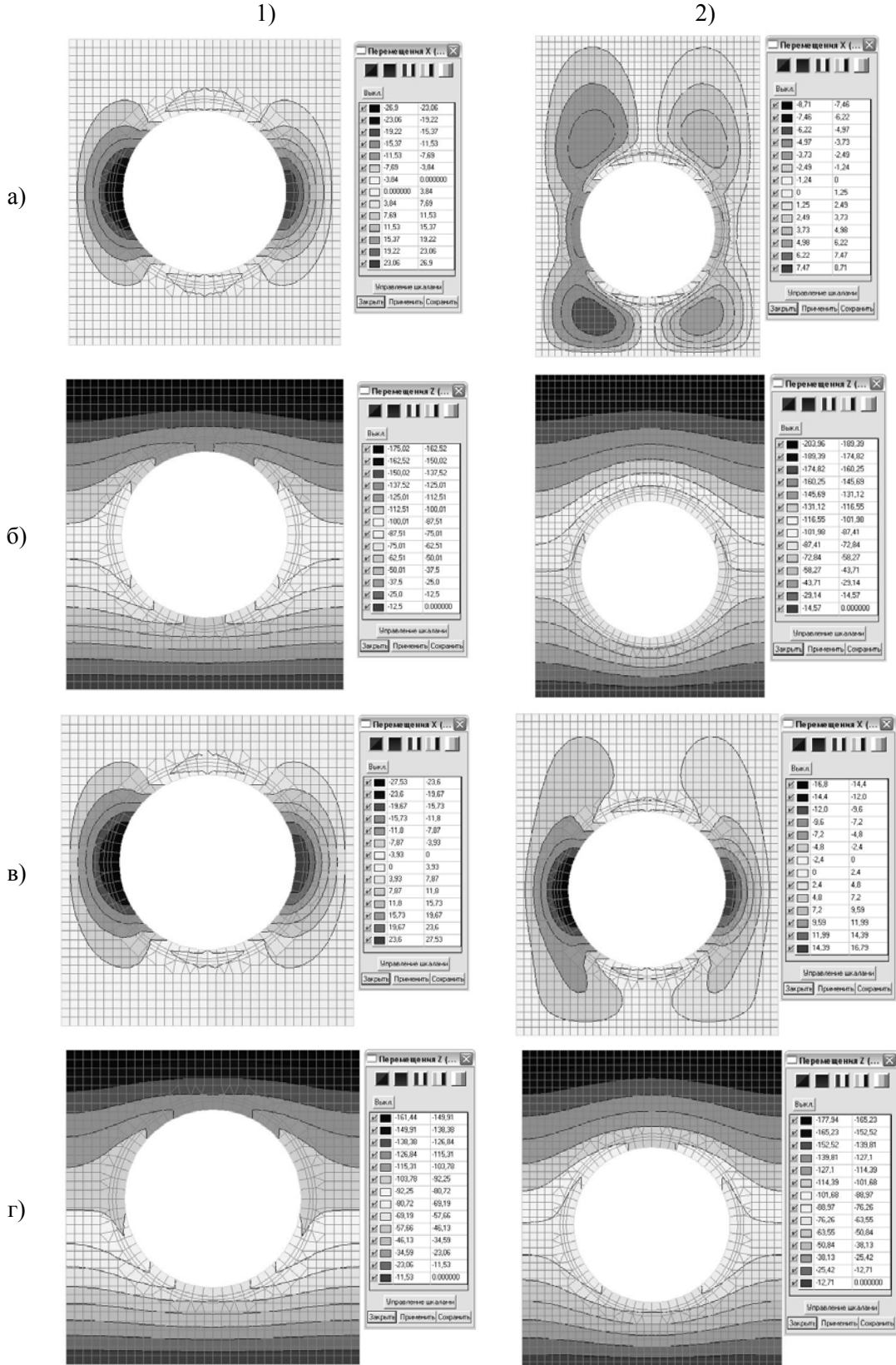


Рис. 3. Ізолії та ізополі параметрів деформованого стану перегінного тунелю з урахуванням дії щитових гідроциліндрів (з урахуванням власної ваги)

- 1) без кріплення лобу забою; 2) з кріпленням лобу забою  
 а) переміщення по осі X (переріз у місці щита); б) переміщення по осі Z (переріз у місці щита);  
 в) переміщення по осі X (переріз у місці оправи); г) переміщення по осі Z (переріз у місці оправи)

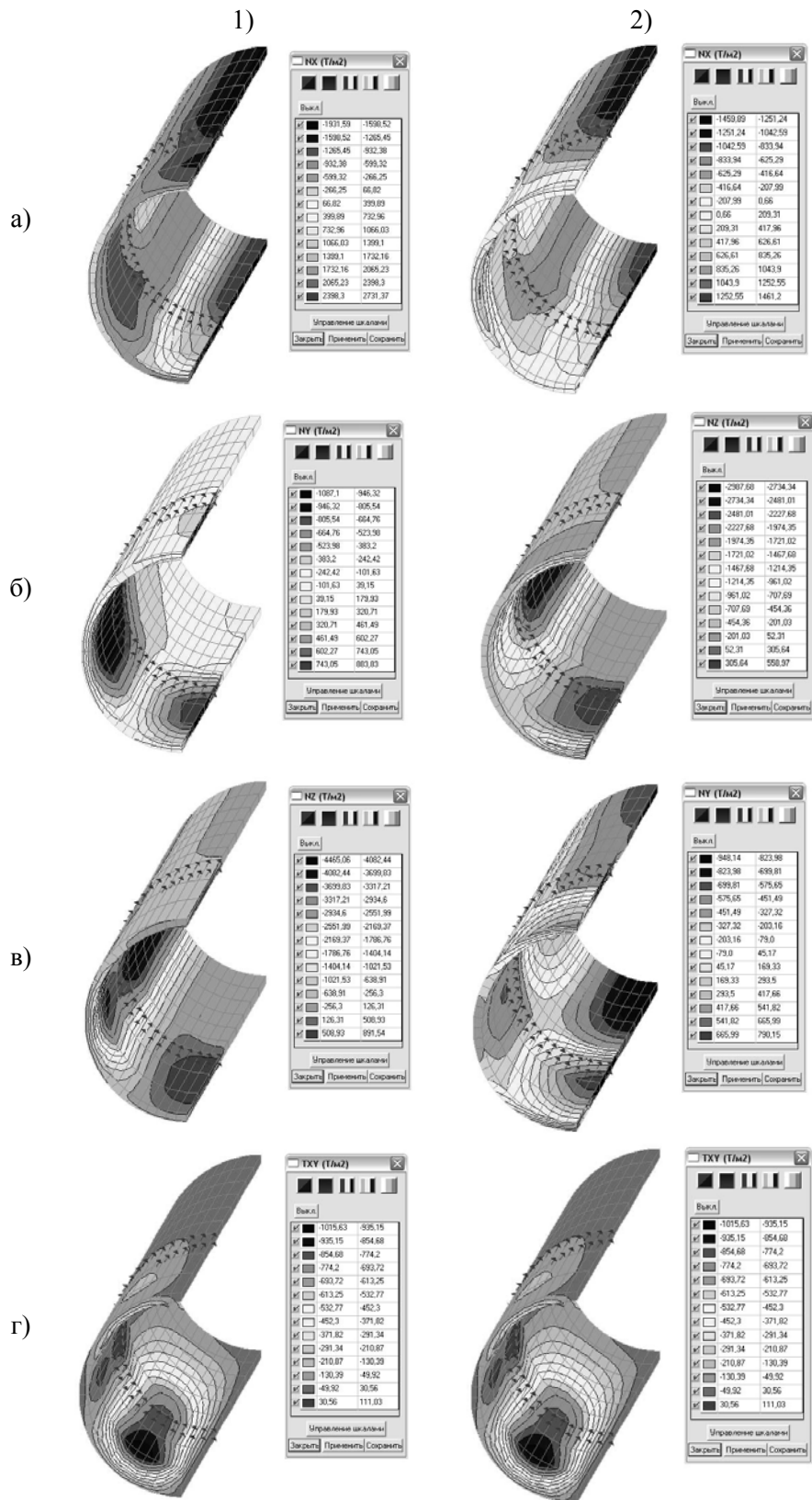


Рис. 4. Ізолінії та ізополі параметрів напруженого стану перегінного тунелю з урахуванням дії щитових гідроциліндрів (з урахуванням власної ваги)  
 а) нормальні напруження по осі X; б) нормальні напруження по осі Z;  
 в) нормальні напруження по осі Y; г) дотичні напруження в площині XY

В моделі запропоновано врахувати дію 18 щитових ГЦ із загальним значенням сили в 18 000 кН за допомогою вузлових сил, які прикладені до 120 вузлів моделі. Для спрощення задачі її постановка була квазістатичною, тобто вважається, що щит тільки почав рухатися, розвиваючи тиск на обробку, але не зрушився з місця. Таким чином, хоча і не враховуються сили тертя оболонки щита по ґрунту оточуючого масиву, можна зробити висновок, що дія щитових ГЦ на обробку у цей момент є максимальною, так як протидія масиву тільки починає зростати. Окрім дії щитових ГЦ в моделі змодельована ситуація, коли лоб забою залишається відкритим. Це відбувається тоді, коли щит подає робочий орган в протилежному ходу щита напрямку при його передвижді на довжину заходки. В результаті на обробку діє комплекс навантажень, який складається із власної ваги масиву та дії щитових ГЦ, який значно більше за величиною, ніж тільки дія власної ваги, що ще раз доводить, що розрахунок з урахуванням технологічних навантажень більш інформативний, ніж на експлуатаційні навантаження. Наявність щиту в передній частині моделі надає загальній системі «щит–кріплення–масив» більшої жорсткості, що позначається в більших переміщеннях.

Значний інтерес становить розподілення переміщень двох випадків проведення робіт по проходці: без кріплення та з кріпленням лоба забою. Причому надані результати дають змогу аналізувати ці переміщення як в перетині в місці розташування щита, так і в місці обробки. Відсутність кріплення лоба забою аналогічно ситуації вже змонтованої обробки, але із підвищеною жорсткістю в передній частині (в місці щиту). Цей висновок можна зробити після аналізу деформаційної картини рис. 3,1-2, який свідчить про те, що кріплення забою значно зменшує переміщення по осі X (в 3.0 рази в місці щита та в 1.63 рази в місці обробки), причому характер деформування змінюється не тільки кількісно, а й якісно рис. 3,1а-2а. При цьому ж вертикальні переміщення моделі (по осі Z), тобто мульда осідання, у випадку кріплення лоба забою значно збільшуються по причині підвищення жорсткості (30 мм у перерізі щита та 16 мм в місці обробки). Причому повні осідання обробки у двох випадках залишаються на одному рівні (114...115 мм – осідання замку, 69...76 мм – осідання лотку, 39...45 мм – загальні осідання обробки). Це свідчить про те, що проходка щитом значно впливає на розвиток деформацій земної поверхні, тобто і при проходці щитом виникає мульда осідання, але значення осідань не є критичними, так як не входять у межі (вертикальні осідання – до 150 мм). На загальні осідання обробки у двох випадках кріплення лобу не впливає, так як монтаж об-

робки проходить на відстані від забою 5...6 м, тому відмічається затухання впливу.

На рис. 4,1-2 надано картину напружень у випадку дії щитових ГЦ, причому вона значно змінюється у випадку кріплення лоба забою як кількісно, так і якісно. Для більш глибокого кількісного аналізу застосуємо четверту теорію міцності (енергетичну), виразом для якої є

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_x \sigma_z + \sigma_z^2 + 3\tau_{xz}^2} \leq [\sigma]^2 \quad (1)$$

де  $\sigma_x$  та  $\sigma_z$  – компоненти нормальних напружень по глобальних осях X та Z;  $\tau_{xz}$  – дотична компонента в площині XZ;  $[\sigma]$  – межа міцності матеріалу.

При кріпленні забою напруження змінюються в 1.32...1.87 рази (напруження по осі X), в 1.12...1.14 рази (напруження по осі Y) та 1.49...1.59 рази (напруження по осі Z). Слід відзначити, що розподіл напружень у місці щита та у місці обробки якісно відрізняються (рис. 4) і можна зробити висновок, що при дії щитових ГЦ на обробку без кріплення лоба забою напруження в обробці, а саме в замку та на горизонтальному діаметрі, більше межі міцності бетону обробки, що може бути причиною тріщин бетону і виведення обробки із умов нормальної експлуатації. Тому дія щитових ГЦ повинна врівноважуватися закріпленням лоба забою чи вчасно проведеним первинним нагнітанням. Для більш повного аналізу перевіримо напруження в обробці від дії щитових ГЦ за умовою  $[\sigma] \geq \sigma_y$ , де  $[\sigma]$  – межа міцності бетону на стиск, бетон В30  $[\sigma] = 21.0$  МПа). В точках на горизонтальному діаметрі напруження по осі Y складають близько 6.65 МПа у варіанті 1 та 9.48 МПа у варіанті 2, що в 2...3 рази менше межі міцності бетону. Таким чином, можна свідчити про те, що дія щитових ГЦ у комплексі з дією власної ваги майже не впливає на напружено-деформований стан обробки.

Для того, щоб відокремити вплив на формування загального НДС системи «щит–кріплення–масив», проведено розрахунок перегінного тунелю на дію щитових ГЦ без урахування власної ваги масиву. Результати цього розрахунку дають змогу зробити висновок, що дія щитових ГЦ найбільш усього впливає на складову напружень по осі Y, тобто по тій осі, по якій прикладена їх дія. Дві другі компоненти змінюються від дії щитових ГЦ незначно, на відміну від компоненти по осі Y, значення якої і у випадку незакріпленого лоба, так і випадку закріпленого в 1.2...1.34 рази більше, ніж той же параметр у випадку тільки дії вертикальної складової гравітаційної сили (власна вага масиву).

Картина розподілу дотичних напружень (рис. 4, г) також доводить той факт, що дія щит-

тових ГЦ значно впливає на компоненту нормальних напружень по осі Y, не впливаючи на інші компоненти. Про це свідчить розподіл дотичних напружень лише в зоні впливу щитових ГЦ та їх невеликі значення (до 0.095 МПа у першому випадку та 0.72 МПа у другому випадку); також відмічається збільшення значень дотичних напружень у випадку закріплення лоба забою.

Після з'ясування впливу дії щитових ГЦ проведено розрахунок на сумісну дію їх із гравітаційною складовою власної ваги системи

(рис. 3-4). Обчислимо для двох варіантів еквівалентні напруження (без кріплення лоба забою – варіант 1; з кріпленням – варіант 2) (табл. 1).

Для розрахунку еквівалентних напружень обрано переріз із більшими значеннями напружень – у місці прикладення дії щитових ГЦ, тому що картина розподілу напружень в системі є дуже складною. Також обчислимо для двох варіантів еквівалентні напруження за формулою (3) для площини XY (табл. 2).

Таблиця 1

**Розрахунок еквівалентних напружень за четвертою теорією міцності**

№ п/п	Вид кріплення лоба забою	Напруження, МПа			Еквівалентне напруження, МПа
		Нормальне по осі X	Нормальне по осі Z	Дотичне в площині XZ	
1.	Варіант 1	-1.59	-0.64	-0.95	2.58
2.	Варіант 1	2.38	-0.64	-0.95	2.69
3.	Варіант 1	-0.59	-4.47	0.99	5.09
4.	Варіант 2	-1.25	-0.20	-0.069	1.37
5.	Варіант 2	0.63	-0.20	-0.069	0.57
6.	Варіант 2	-0.63	-2.98	0.75	3.58

Примітка. В таблиці 2 під порядковим номером йдуть такі випадки: 1) та 4) – замок; 2) та 5) – лоток; 3) та 6) – точка на горизонтальному діаметрі.

Таблиця 2

**Розрахунок еквівалентних напружень за четвертою теорією міцності**

№ п/п	Вид кріплення лоба забою	Напруження, МПа			Еквівалентне напруження, МПа
		Нормальне по осі X	Нормальне по осі Y	Дотичне в площині XY	
1.	Варіант 1	-1.59	-0.24	-0.046	1.74
2.	Варіант 1	2.38	0.46	-0.046	2.64
3.	Варіант 1	-0.59	-0.81	-0.59	1.59
4.	Варіант 2	-1.25	-0.45	0.11	1.54
5.	Варіант 2	0.63	0.29	0.11	0.84
6.	Варіант 2	-0.63	-0.45	0.11	0.96

Примітка. В таблиці 2 під порядковим номером йдуть такі випадки: 1) та 4) – замок; 2) та 5) – лоток; 3) та 6) – точка на горизонтальному діаметрі.

Проведені два розрахунки еквівалентних напружень в площинах XZ та XY свідчать про те, що їх значення майже на порядок менше значення межі міцності бетону на стиск (бетон В30  $[\sigma] = 21.0$  МПа), тобто сумісна дія щитових ГЦ із власною вагою системи не викликає в обробці руйнування.

Проведені розрахунки свідчать про те, що дія щитових ГЦ врівноважує дію власної ваги системи, перерозподіляючи компоненти напружень, і, таким чином, відіграє велику роль у формуванні загального НДС, тому проведені розрахунки доводять, що розрахунок обробки

тільки в стадії експлуатації недостатньо для комплексного аналізу напружень та переміщень в обробці перегінного тунелю.

**БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК**

1. Петренко В. И. Современные технологии строительства метрополитенов в Украине / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин. – Д.: Наука і освіта, 2005. – 252 с.
2. Юркевич П. Геомеханические модели в современном строительстве // Подземное пространство мира, 1996, № 1-2. – С. 10-31.

Надійшла до редколегії 17.01.2008.