

УДК 624.96:624.07

## Циклічні навантаження і розрахунок на витривалість сталевих конструкцій рамних укісних шахтних копрів

### Cyclic Loads and Fatigue Analysis of Steel Structures of Frame Mine Headframes

Кущенко В. М., д.т.н., професор кафедри будівельних конструкцій та мостів, Шуляр Р.А., ст. викл. кафедри будівельних конструкцій та мостів (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)

Volodymyr Kushchenko, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Structures and Bridges, Rostyslav Shulyar, Senior Lecturer at the Department of Building Structures and Bridges (Lviv Polytechnic National University, Lviv)

*У статті розглянуто актуальні питання розрахунку сталевих конструкцій шахтних копрів, які нормативно недостатньо визначені. На підставі аналізу технологічного циклу роботи шахтних підйомних установок визначено типовий цикл динамічного навантаження, який визначається двома розрахунковими ситуаціями, що відповідають виникненню максимальних і мінімальних напружень в розрахункових перерізах конструкцій шахтних копрів. Для характерної споруди встановлені типи конструкцій і розрахункових перерізів підйомних рам і конструкцій укосин, а також виконано чисельний аналіз їх втомної міцності за критерієм граничної кількості типових циклів навантаження. Встановлено обмежений ресурс за втомною міцністю конструкцій головних балок укосин.*

*The structures of mine headframes are classified as lifting and transport mining structures, which fall under the highest responsibility class. Most mine headframes in Ukraine have been in operation for extended periods, subjected to intense cyclic dynamic loads and aggressive environmental conditions. Consequently, there is a need to assess the residual life of these structures and ensure they meet the required service life in terms of fatigue strength. Currently, fatigue analysis for mine headframe structures is not covered by existing standards, as there is no established methodology for determining typical load cycles. Based on an analysis of the key stages in the technological cycle of mine hoisting installations, it is proposed to define a typical load cycle as the sequential application of loads from two design scenarios: the design scenario of the maximum total tension force in the hoisting rope branches, and the design scenario of the minimum total force in the hoisting rope branches. These scenarios, combined with constant and long-term loads, define the maximum and minimum stresses in the load cycle for the critical sections of the structures. This methodology accounts for dynamic forces arising from forced oscillations of the lifting vessels when calculating the cyclic forces in the hoisting ropes. For the characteristic structure, the types of structural elements and critical*

sections for endurance analysis are identified in accordance with the provisions of the standard methodology. Through the analysis of the stress-strain state in the critical sections of the mine headframe structure, the characteristics of dynamic stress cycles were determined, and a fatigue strength calculation was performed. The analysis revealed a limited fatigue life for the main beams of the headframe structure. The proposed engineering method for analyzing the fatigue strength of mine headframe structures can be applied both in the design of new structures and in the development of systems for monitoring the technical condition of operating mine headframes.

*Ключові слова:* шахтні копри, сталеві конструкції, циклічні навантаження, амплітуда напружень, коефіцієнт асиметрії циклу, межа втоми, припустима гранична кількість циклів навантажень.

*Keywords:* mine headframes, steel structures, cyclic loads, stress amplitude, cycle asymmetry coefficient, fatigue limit, the permissible maximum number of load cycles.

**Постановка проблеми.** Конструкції укісних шахтних копрів (рис. 1) відносяться до підйомно-транспортних гірничотехнічних споруд і поширені в промисловому комплексі України [1]. Як показано на рис.1, розрізняють чотири основні типи конструктивних систем укісних шахтних копрів: а) станкова; б) напівшатрова; в) шатрова; г) комбінована, які являють собою просторові стержньові системи консольного типу, в складі яких є укосини, призначені для сприйняття горизонтальних складових навантажень від роботи підйомної машини. Висота укісних шахтних копрів визначається позначкою обпирання напрямних шківів, які несуть підйомні канати і фіксують їх точку сходу в шахтний ствол. Матеріалом основних несучих конструкцій укісних шахтних копрів є сталь і залізобетон. За конструктивною формою розрізняють рамні копри (рис. 1б, в, г) і копри у вигляді ферм (рис. 1а). За кількістю підйомних машин на одній споруді розрізняють копри: одно- і двох-підйомні. Висота цих споруд залежно від технологічних ознак складає діапазон від 15 до 70 м.

Конструкції шахтних копрів відносяться до класу відповідальності СС-3, оскільки вони забезпечують: а) вертикальну комунікацію між гірськими виробітками та технологічним комплексом шахтної поверхні; б) функціонування системи вентиляції; в) роботу систем забезпечення безпеки шахтного підйому. Відмова хоча б однієї з вище означених технологічних функцій призводить до важких катастрофічних наслідків і великих матеріальних збитків.

В цілому для цих споруд характерним є наявність важких умов експлуатації, таких як: а) вплив агресивних корозійних середовищ; б) абразивний знос; в) дія циклічних динамічних навантажень при роботі підйомної машини; г) дія динамічних аварійних навантажень. Внаслідок впливу цих факторів у процесі експлуатації спостерігається фізичний знос сталевих конструкцій шахтних копрів [1, 2].



а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Основні типи конструктивних систем укiсних шахтних копрiв:  
а) станкова; б) напiвшатрова; в) шатрова; г) комбiнована

Нормативний термiн експлуатацiї цих споруд складає 50 рокiв, однак на гiрничодобувних пiдприємствах України середнiй термiн iх експлуатацiї дещо бiльший – 60...70 рокiв. У зв'язку з циклическим характером технологiчних навантажень, актуальним є питання оцiнки залишкового ресурсу сталевих конструкцiй шахтних копрiв при монiторингу iх технiчного стану [3, 4]. Крім того, для основних несучих конструкцiй шахтних копрiв при проектуваннi iснує завдання забезпечення ресурсу за втомною мiцнiстю протягом нормативного термiну експлуатацiї, вирiшення якого не регламентовано галузевими нормами [5]. Таким чином,

дослідження у напрямку розробки та удосконалення методики розрахунку сталевих конструкцій на втомну міцність є актуальними у зв'язку з проблемою забезпечення технологічної безпеки шахтних підйомних установок.

**Аналіз попередніх публікацій і постановка завдань.** Згідно нормативних вимог [6] для сталевих конструкцій шахтних копрів необхідно виконувати перевірку втомної міцності у зв'язку з циклічним характером технологічних навантажень, кількість циклів яких, як правило, перебільшує  $10^5$  [3, 7]. У чинному галузевому нормативному документі [5] технологічні навантаження на конструкції шахтних копрів визначаються як рівнодійні від статичних зусиль в підйомних канатах з додаванням сил інерції в період нерівномірного руху підйомної машини, однак при цьому нормами характеристики циклічності навантажень не визначаються. В роботах [2, 3, 4, 7] визначено динамічний характер експлуатаційних навантажень, який зумовлений наявністю: а) циклів завантаження-розвантаження підйомних посудин; б) етапами прискореного, рівномірного і сповільненого руху підйомної машини; в) пульсаційної складової внутрішніх зусиль в підйомних канатах, яка виникає внаслідок вимушених коливань підйомних посудин. Однак, в нормативному документі [8] для конструкцій шахтних копрів не визначені розрахункові циклічні значення зусиль в підйомних канатах, внаслідок цього розрахунок конструкцій шахтних копрів на втому за методикою [6] на даний час нормативно не забезпечений. У роботі [2] констатовано циклічний характер навантажень на конструкції шахтних копрів і виконано статистичний аналіз коефіцієнтів динамічності зусиль в підйомних канатах на різних етапах технологічного циклу шахтної підйомної установки, які характеризують пульсаційну складову зусиль в підйомних канатах, зумовлену вимушеними коливаннями підйомних посудин. Однак у роботах [2, 7] відсутнє визначення поняття типового циклу навантаження у зв'язку з завантаженням і розвантаженням підйомних посудин і дією інерційної складової від прискореного руху підйомної машини, тому результати роботи [7], в якій констатовано недостатній ресурс за втомною міцністю підшківних конструкцій, потребують уточнення.

На даний час існує нормативна методика розрахунку на втомну міцність елементів сталевих конструкцій у формі оцінювання довговічності (строку експлуатації), яка залежить від значень амплітуд і коефіцієнтів асиметрії динамічних напружень типових циклів навантаження [6]. Однак, для сталевих конструкцій шахтних копрів відсутні публікації стосовно визначення типових циклів навантаження для використання чинної нормативної методики розрахунку на витривалість конструктивних елементів і з'єднань [6].

**Мета роботи** – визначення поняття типового циклу динамічних напружень, а також аналіз втомної міцності характерних конструктивних форм рамних сталевих укісних шахтних копрів. Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання: а) на підставі аналізу складових технологічних навантажень запропонувати методика визначення їх розрахункових циклічних значень; б) для характерних конструктивних форм виконати класифікацію по групах конструкцій відповідно до нормативних даних [6]; в) для характерних конструктивних елементів визначити розрахункові перерізи; г) для характерної споруди визначити характеристики циклів динамічних напружень, виконати аналіз втомної міцності за чинною нормативною методикою [6] і визначити ресурс за кількістю циклів навантаження.

**Методика визначення розрахункових типових циклічних навантажень** розроблена на підставі аналізу змінного характеру зусиль у підйомних канатах [2, 7]. На рис. 2 показано основні етапи технологічного циклу роботи шахтної підйомної установки, якому відповідає змінний характер зусиль в гілках підйомного канату.

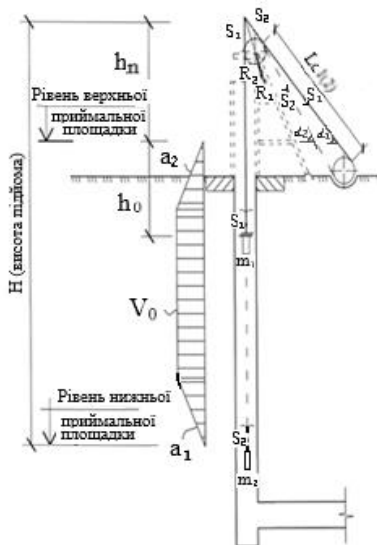


Рис. 2. Основні етапи технологічного циклу і тахограма роботи підйомної машини: завантаження, прискорений і уповільнений рух, розвантаження

Зусилля в підйомних канатах  $S_p$  на різних етапах роботи підйомної машини слід розглядати як суму статичного натягу  $S_1$ , сил інерції  $S_2$ , сил опору руху підйомної посудини в стволі  $S_3$ , динамічних зусиль  $S_4$ , що

виникають при коливаннях підйомної посудини відносно динамічного положення рівноваги [2]:

$$S_p = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (1)$$

Розрахункове граничне значення статичного натягу підйомного каната визначається за наступною формулою:

$$S_1 = (m_c \gamma_{f1} + m_r \gamma_{f2} + \rho_k L \gamma_{f3}) g, \quad (2)$$

де:  $\gamma_{fi}$  - коефіцієнт надійності за навантаженням: для власної ваги підйомної посудини з причіпним пристроєм і вагонетками – 1,05; від ваги підйомного каната – 1,2; від ваги корисного вантажу: насипних – 1,2; інших – 1,1;  $m_c$  – маса посудини з причіпним пристроєм;  $m_r$  – маса корисного вантажу;  $\rho_k$  – вага погонного метра підйомного каната;  $L$  – змінна довжина гілки підйомного каната, що залежить від положення підйомної посудини по висоті ствола.

Найбільше значення  $S_{1max}$  називається максимальним статичним натягом і відповідає положенню нерухомої вантаженої посудини на рівні нижнього завантажувального пристрою, тобто коли довжина гілки підйомного каната максимальна. Мінімальне значення  $S_{1min}$  відповідає положенню розвантаженої посудини на рівні верхньої приймальної площадки.

Сили інерції виникають під час руху підйомної машини з прискоренням або уповільненням і визначають за формулою:

$$S_2 = \pm (m_c \gamma_f + m_r \gamma_f + \rho_k L \gamma_f) a = \pm S_1 a / g, \quad (3)$$

де:  $a$  – прискорення чи уповільнення руху посудини; знак «+» відповідає випадку прискореного руху посудин, що піднімаються, і «-» відповідає прискореному руху посудин, що опускаються.

Оскільки величина  $S_1$  змінна, отже, сили інерції у процесі роботи підйомної машини також змінюються. Зміна сил інерції зумовлена зміною маси гілки підйомного каната, довжини яких при русі підйомної машини змінюються. Таким чином, для посудини, що піднімається, максимальні значення сил інерції виникають на початку прискореного руху, а для посудини, що опускається, – в кінці уповільнення.

Сили опору руху посудини у стволі визначають за формулою [2]:

$$S_3 = \pm k_c S_1, \quad (4)$$

де:  $k_c = 0,06 \dots 0,15$  - коефіцієнт опору; знак «+» для посудини, що піднімається; знак «-» для посудини, що опускається.

Динамічні зусилля  $S_4$  від коливання підйомних посудин щодо положення статичної або динамічної рівноваги визначають залежно від статичного натягу за такою формулою:

$$S_4 = (S_1 + S_2)(k_d - 1), \quad (5)$$

де:  $K_d$  – коефіцієнт динамічності зусилля в підйомному канаті для відповідного режиму роботи підйомної установки, який визначається на підставі статистичного аналізу експериментальних даних (див. табл. 1) [2].

Таблиця 1

Числові характеристики коефіцієнтів динамічності зусиль у підйомних канатах під час основних режимів роботи шахтних підйомних установок

№ п.п.	Стадія роботи ШПУ	Математичне сподівання	Дисперсія	Довірчий інтервал ( $\beta=0,95$ )	Квантиль $P_0=0,9973$
1	Спуск А	1,21	0,0122	1,15; 1,28	1,61
2	Спуск Б	1,12	0,0052	1,09; 1,15	1,29
3	Спуск В	1,14	0,0074	1,1; 1,18	1,43
4	Спуск Г	1,08	0,0023	1,06; 1,1	1,24
5	Спуск Д	1,17	0,0074	1,14; 1,20	1,40
6	Підйом А	1,26	0,039	1,15; 1,37	1,96
7	Підйом Б	1,12	0,0046	1,08; 1,15	1,32
8	Підйом В	1,14	0,0055	1,11; 1,17	1,394
9	Підйом Г	1,08	0,003	1,06; 1,1	1,27
10	Підйом Д	1,18	0,0198	1,123; 1,24	1,66

**Примітка.** В таблиці прийнята наступна система позначень: ШПУ – шахтна підйомна установка; «Спуск», «Підйом» – напрямок руху розглянутої гілки підйомного канату; «А» – маневри і завантаження підйомних судин; «Б» – зняття з посадкових пристроїв; «В» – прискорений рух; «Г» – рівномірний рух; «Д» – уповільнений рух.

У даній роботі в якості розрахункового значення коефіцієнта динамічності зусилля в підйомному канаті приймалося значення  $K_d = 1,17$ , яке відповідає верхній границі довірчого інтервалу математичного сподівання при імовірності  $\beta=0,95$  (див. табл. 1 п. 8) для етапу прискореного руху підйомної машини на початку підйому.

Навантаження від натягу підйомних канатів на конструкції укисних шахтних копрів прикладається у вигляді рівнодіючих від натягу гілок каната, які визначають за формулою:

$$R_i = 1,414S_i\sqrt{(1 + \sin \alpha)}, \quad (6)$$

де  $\alpha$  – кут нахилу відповідної гілки підйомного каната до горизонталі.

За наявності двох гілок підйомного каната (збігаючої і набігаючої на барабан підйомної машини) рівнодійні відповідних гілок підйомного канату мають різні кути нахилу до горизонту, їх горизонтальні і вертикальні складові дещо відрізняються. Однак, при аналізі втомної міцності,

розглядалась умовна рівнодійна, яка складалася з максимальних значень вертикальних (для збігаючої гілки підйомного каната) і горизонтальних (для набігаючої гілки підйомного каната) складових зусиль. Це припущення можна вважати коректним у зв'язку з наявністю зміни кута нахилу рівнодійних зусиль від підйомних канатів внаслідок впливу сил інерції мас копрових шківів, що обертаються, при прискореному або уповільненому русі.

Для визначення характеристик типового циклу динамічних напружень в розрахункових перерізах конструкцій шахтного копра розглядаються наступні розрахункові ситуації:

1 – розрахункова ситуація максимального сумарного зусилля натягнення гілок підйомного канату: завантажена підйомна посудина рухається з прискоренням на початку підйому ( $S_1^{max}$ ), порожня посудина на початку спуску ( $S_{01}^{max}$ ) в комбінації з постійним і довготривалим навантаженням (вага копрових шківів);

2 – розрахункова ситуація мінімального сумарного зусилля в гілках підйомного каната: розвантажені підйомні посудини нерухомі і знаходяться на рівні нижньої ( $S_1^{min}$ ) і верхньої приймальної площадки ( $S_{01}^{min}$ ) в комбінації з постійним і довготривалим навантаженням (вага копрових шківів).

Коефіцієнти сполучення для розрахункових ситуацій приймалися відповідно до нормативних положень [8]. Означені дві розрахункові ситуації визначають цикл навантаження при роботі підйомної установки. Розрахункові ситуації: «1» і «2» визначають відповідно: а) максимальні  $\sigma_{max,i}$  і мінімальні  $\sigma_{min,i}$  рівні напруження циклу у розрахункових перерізах конструкцій шахтного копра. На підставі значень:  $\sigma_{max,i}$  та  $\sigma_{min,i}$  визначаються амплітуди напружень циклу  $\sigma_{a,i}$ , а також коефіцієнти асиметрії напружень  $\rho_i$ . При такому підході кількість циклів динамічних напружень  $n_i$  відповідає кількості технологічних циклів підйомної установки за нормативний термін експлуатації (зазвичай значно більше  $1 \times 10^6$ ).

**Класифікація по групах конструкцій** виконувалась для характерних конструктивних форм укисних шахтних копрів відповідно до таблиці Т.3 [6]. Сталеві укисні шахтні копри це просторова стержньова система, яка складається з наступних основних конструктивних частин: а) підкопрової рами, яка обпирається на залізобетонні конструкції шийки шахтного ствола; б) конструкції станка, які є функціональним продовженням шахтного ствола і обпираються на підкопрову раму; в) укосини, яка обпирається на окремо стоячі масивні залізобетонні фундаменти; г) підшківних конструкцій, які обпираються на конструкції станка і на головну балку укосини (рис. 3) [2]. За компонуванням шахтної підйомної установки розрізняють копри: однопідйомні і багатопідйомні (частіше двопідйомні)



[2]. За конструктивною формою розрізняють два основних типи шахтних копрів: а) у вигляді просторових ферм – копри станкової системи (рис. 1,а); б) у вигляді просторових рам – рамні укісні копри шатрові і напівшатрові (рис. 1,б, в, г).

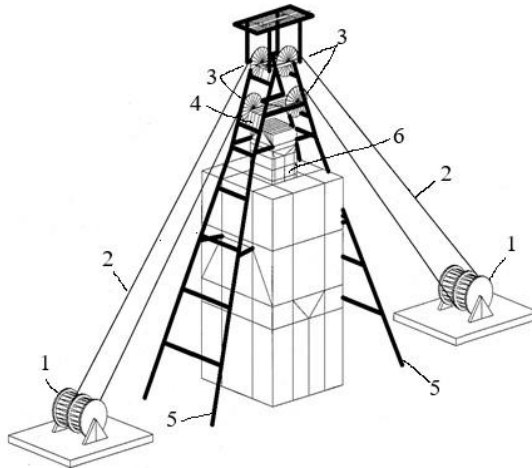


Рис. 3. Принциповий склад споруди двопідйомного шатрового укісного шахтного копра: 1 – барабан підйомної машини; 2 – гілки підйомного каната; 3 – шківів; 4 – підшківні конструкції; 5 – укосини; 6 – станок

Рамні напівшатрові і шатрові укісні копри відрізняються від станкових принципом незалежної роботи підшківних конструкцій та укосини від конструкцій станка, тобто конструкції станка не сприймають навантаження від натягу підйомних канатів. Оскільки циклічні навантаження на конструкції шахтних копрів виникають від натягу підйомних канатів – питання втомної міцності для рамних укісних копрів існує тільки для укосини і підшківних конструкцій. Те саме характерне і для копрів станкової системи, оскільки 80...90% рівнодійних зусиль в гілках підйомного канату сприймається підшківними конструкціями і укосиною.

У даній роботі аналіз втомної міцності обмежується рамними укісними копрами, для яких характерні конструктивні форми підшківних конструкцій і головної балки укосини наведено на рис. 4.

Циклічне навантаження від рівнодійних зусиль в підйомних канатах прикладається на підшківні конструкції у вигляді опорних реакцій шківів. Для підшківних конструкцій є характерним складний напружено-деформований стан (рис. 5) [9]. Головна балка укосини працює переважно на згин, характерні перерізи головних балок – коробчасті (рис. 4).

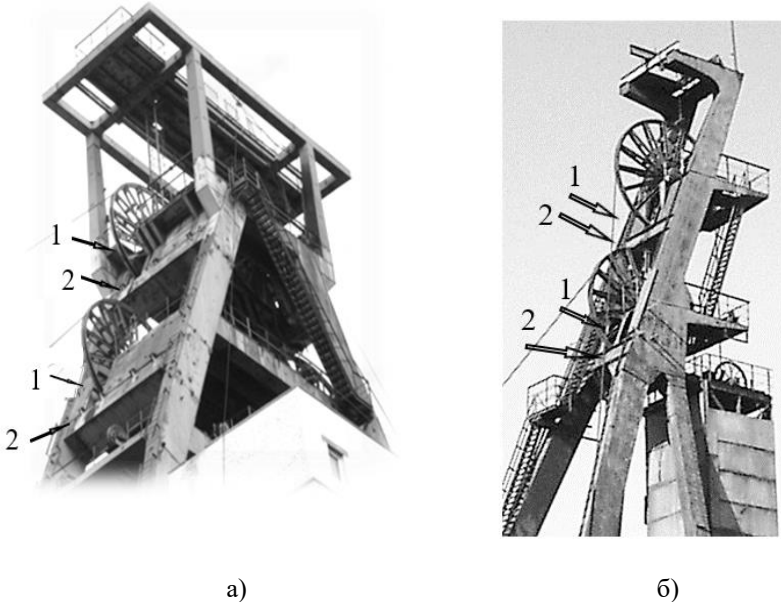


Рис. 4. Характерні конструктивні форми підшківних конструкцій рамних укисних шахтних копрів: а) двотавровий складений переріз; б) коробчастий переріз. 1- підшківні конструкції; 2 – головна балка укосини

Як показує аналіз напружено-деформованого стану конструкцій шахтних копрів при дії технологічних навантажень, завдання розрахунку на втому виникає для перерізів підшківних конструкцій у вузлах обпирання шківів, а також в перерізах головної балки укосини в місцях сполучення з підшківними конструкціями [7, 9]. В зоні вузла обпирання шківа виявлено чотири характерних ділянки, які відрізняються за рівнем концентрації напружень: А – ділянка локальних напружень під підшоною опорного підшипника; В, С – ділянка складного напружено-деформованого стану і концентрації напружень; D – ділянка плоского напружено-деформованого стану без суттєвої концентрації напружень (рис. 5) [9]. Найбільший рівень концентрації напружень спостерігається на ділянці «А» локальних напружень – у місці прикладання зосереджених зусиль від натягу підйомного каната (рис. 5,б).

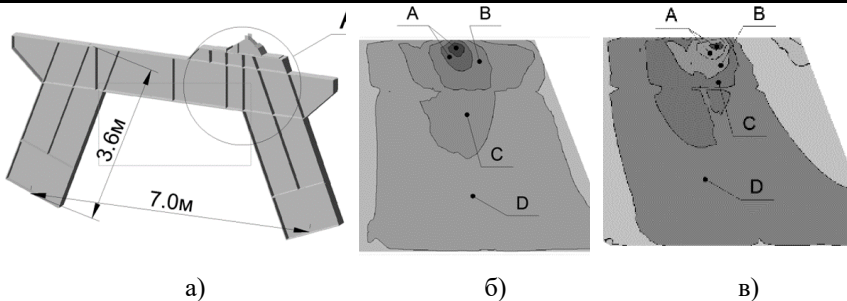


Рис. 5. Складний напружено-деформований стан підшківних конструкцій у вузлі опирання шківів: а) загальний вигляд підшківної рами шатрового копра; б) розподіл зведених напружень  $\sigma_{red}$ ; в) розподіл дотичних напружень

Відповідно до таблиці Т.3 [6] для підшківних конструкцій і головної балки укосини встановлено наступні групи елементів і з'єднань при розрахунку на витривалість (рис. 6):

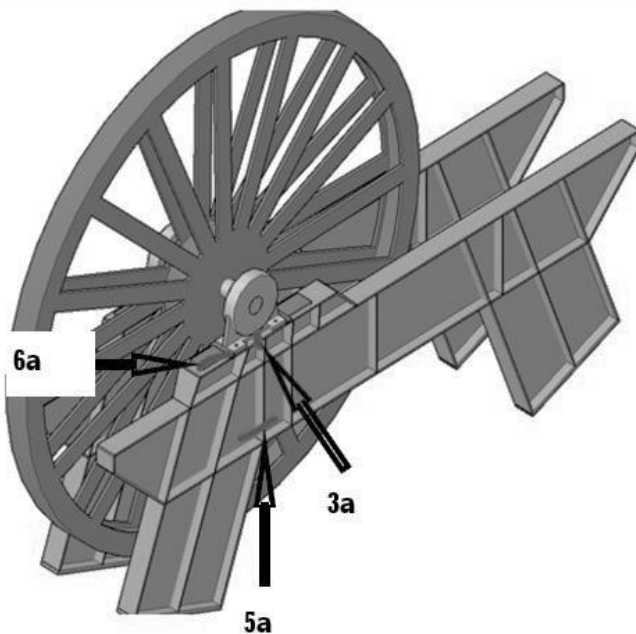


Рис. 6. Класифікація розрахункових перерізів підшківної конструкції за групами елементів конструкцій і з'єднань при розрахунку на витривалість (табл. Т.3 [6])

- група 3а – зварні двотаврові перетини вдвож зварного шва – вузли обпирання шківів (рис. 5, б);
- група 6а – верхній пояс двотаврового перерізу в місці кріплення фланговими швами упору підшипника шківа – вузли обпирання шківів (рис. 5, в);
- група 5а – кріплення зварними швами поперечних ребер жорсткості до стінки і поясів підшківної конструкції в перерізі вузла обпирання шківа (рис. 5, а);
- група 5 а – зварний коробчастий переріз головної балки укосини за наявності поперечних ребер жорсткості у вузлах обпирання підшківних конструкцій.

**Аналіз напружено-деформованого стану характерної споруди при дії циклічних навантажень.** Для реальної характерної споруди (скіповий копер головного підйому) виконано аналіз циклів динамічних напружень в розрахункових перерізах конструктивних елементів (загальний вигляд споруди та її частин наведено на рис. 3, 5, 6). За конструктивною схемою шахтний копер шатровий. Напрявні шківів розташовані в одній площині та обпираються на позначках: +52.00м і +60.00м. Тип підйомних посудин скіпи – СН15-221-1,5. Швидкість підйому – 12 м/с, прискорення та уповільнення – 1,5 м/с<sup>2</sup>. Максимальна висота підйому – 853 м. Позначка верху ригеля монорейки монтажного пристрою +67.00 м. Перерізи конструктивних елементів основних несучих конструкцій є складеними, зварні, коробчасті та двотаврові. Основні несучі конструкції виконано зі сталі марок С245, С255. Аналіз напружено-деформованого стану конструкцій копра на дію циклічних технологічних навантажень виконано на просторовій розрахунковій моделі у вигляді апроксимації конструктивної схеми споруди стержньовими скінченими елементами в ПК SCAD, яка наведена на рис. 7.

В табл. 2 наведені значення розрахункових циклічних зусиль в підйомних канатах:  $S_1^{max}$ ;  $S_{01}^{max}$ ;  $S_1^{min}$ ;  $S_{01}^{min}$ , які визначають рівень максимальних і мінімальних напружень в розрахункових перерізах конструкцій копра. Рівнодіючі відповідних зусиль в гілках підйомного канату, обчислені за формулою (6) в комбінації з постійним і довготривалими навантаженнями, почергово прикладаються до верхніх і нижніх підшківних конструкцій для отримання максимальних і мінімальних рівнів напружень типового циклу в розрахункових перерізах підшківних конструкцій і укосин.

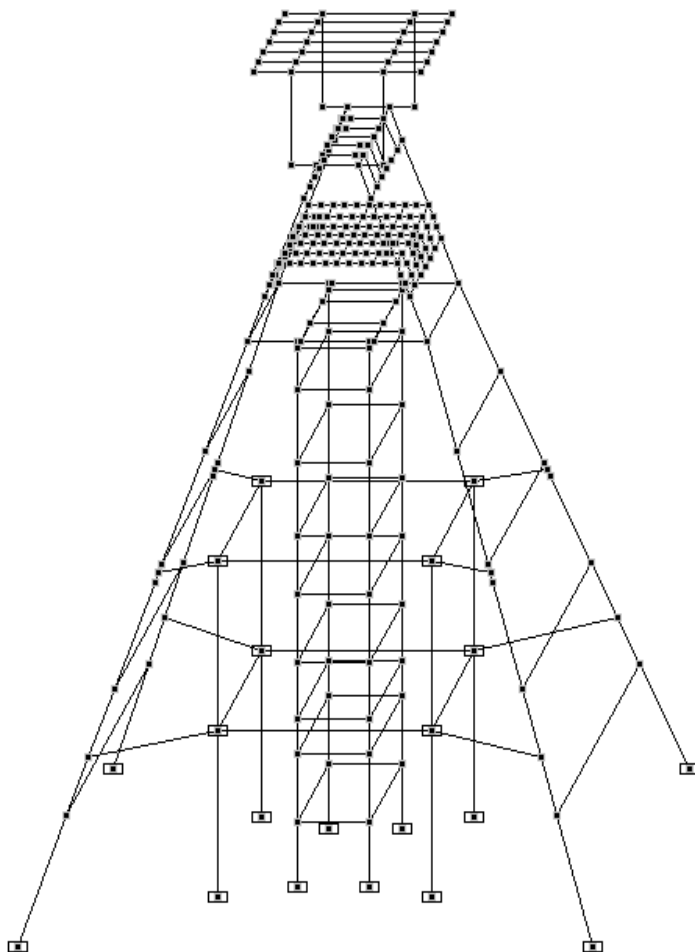


Рис. 7. Розрахункова модель шахтного копра у вигляді апроксимації стержньовими скінченими елементами в ПК SCAD

Розрахункові циклічні зусилля в гілках підйомного канату

Найменування розрахункового циклічного навантаження	Величина зусилля в підйомному канаті, кН
1. Розрахункові циклічні зусилля в гілках підйомного канату для розрахунку $\sigma_{max,i}$ :	
$S_1^{max}$ - завантажена підйомна судина рухається з прискоренням на початку підйому	620,3
$S_{01}^{max}$ - порожня судина на початку спуску ( $S_{01}^{max}$ )	152,2
2. Розрахункові циклічні зусилля в гілках підйомного канату для розрахунку $\sigma_{min,i}$ :	
$S_1^{min}$ - розвантажена підйомна судина нерухома і знаходиться на рівні нижньої приймальної площадки	266,44
$S_{01}^{min}$ - розвантажена підйомна судина нерухома і знаходиться на рівні верхньої приймальної площадки	130,1

У табл. 3 наведені результати розрахунку рівнів циклічних напружень і відповідних коефіцієнтів асиметрії напружень в розрахункових перерізах підшківних конструкцій і укосин. Відповідно до даних табл. 3, амплітудні значення циклічних напружень і коефіцієнти асиметрії складають: а) для підшківних конструкцій:  $\sigma_{max,i} = -9,3 \dots + 11,7$  МПа,  $\rho_i = 0,2 \dots 0,4$ ; б) для головних балок укосини:  $\sigma_{max,i} = +56,6$  МПа,  $\rho_i = 0,3$ .

У подальшому аналізі втомної міцності до розгляду приймалися ті конструкції і розрахункові перерізи, для яких виконується наступна умова [6]:

$$\frac{2\sigma_{a,i}}{(1-\rho_i)} > R_{vi}. \quad (7)$$

Згідно з даними, наведеними в табл. 3, означена умова виконується для розрахункових перерізів «5а» головних балок укосин у вузлах опирання підшківних конструкцій. Відповідно до положень [6] виконання умови (7) означає наявність обмеженого ресурсу за витривалістю.

Таблиця 3

Характеристики циклічних напружень у розрахункових перерізах

Конструкція і типи розрахункових перерізів	Характеристики циклічних напружень				
	$\sigma_{max,i}$ МПа	$\sigma_{min,i}$ МПа	$\sigma_{a,i}$ МПа	$\rho_i$	$\frac{2\sigma_{a,i}}{(1 - \rho_i)}$ МПа
1. Верхні підшківні конструкції:					
3а – вузли обпирання шківів	-33,6	-12,7	-10,5	0,4	35,7
5а – перетинання розтягнутого поясу двотаврового перерізу з поперечним ребром жорсткості	+35,0	+8,0	+13,5	0,2	33,8
6а – верхній пояс двотаврового перерізу в місці кріплення фланговими швами упору підшипника шківа	-25,6	-7,0	-9,3	0,3	26,6
2. Нижні підшківні конструкції:					
3а – вузли обпирання шківів	-34,7	-11,0	-11,7	0,4	39
5а – перетинання розтягнутого поясу двотаврового перерізу з поперечним ребром жорсткості	+32,4	+11,4	+10,5	0,4	35
6а – верхній пояс двотаврового перерізу в місці кріплення фланговими швами упору підшипника шківа	-37,1	-11,6	-11,35	0,4	35
3. Верхня головна балка укосини:					
5а – вузол обпирання підшківної конструкції	+56,6	+18,7	+18,5	0,3	55,9
4. Нижня головна балка укосини:					
5а – вузол обпирання підшківної конструкції	+56,5	+17,4	+19,6	0,3	49,7

У табл. 4 наведені результати аналізу втомної міцності розрахункових перерізів 5а головних балок укосини у вузлах обпирання підшківних

конструкцій. Відповідно до отриманих результатів, ресурс за втомною міцністю конструкцій копра визначається гранично-допустимою кількістю технологічних циклів для верхньої головної балки укосини  $1,3 \times 10^6$ .

Таблиця 4  
Гранично-допустима кількість циклів в розрахункових перерізах  
головних балок укосин  $N_i$

Конструкція і типи розрахункових перерізів	Межа витривалості $R_{vi}$ , МПа	$\frac{2\sigma_{a,i}}{(1 - \rho_i)R_v}$	$N_i$
1. Верхня головна балка укосини: 5а – вузол обпирання підшківної конструкції	36,4	1,53	$1,3 \times 10^6$
2. Нижня головна балка укосини: 5а – вузол обпирання підшківної конструкції	34,6	1,43	$1,6 \times 10^6$

## Висновки

1. Розрахунковій ситуації  $\sigma_{max,i}$  відповідає наступний етап роботи шахтної підйомної установки: завантажена підйомна посудина рухається з прискоренням на початку підйому, а порожня посудина рухається з прискоренням вниз. Розрахунковій ситуації  $\sigma_{min,i}$  відповідає статичне положення порожніх посудин на рівні верхньої і нижньої приймальних площадок.

2. Для підшківних конструкцій характерні такі типи елементів за класифікацією табл. Т.3 [6]: 3а – вузли обпирання шківів; 5а – нижній пояс зварного двотаврового перерізу в місці перетинання з ребром жорсткості; 6а – верхній пояс двотаврового перерізу в місці кріплення кутовими швами упору шківа.

3. Головні балки укосини працюють на згин, максимальні значення нормальних і дотичних напружень виявлено у вузлах сполучення з підшківними рамами – тип елемента 5а за табл. Т.3 [6].

4. Розрахунки за нормативною методикою [6] показали обмежений ресурс за втомною міцністю для головних балок укосини. Припустима гранична кількість циклів навантажень складає: для верхньої головної балки –  $N_i = 1,3 \times 10^6$ ; для нижньої головної балки –  $N_i = 1,6 \times 10^6$ .



### References

1. Kushchenko V.N., Kulish V.A. Analysis of damage and emergency conditions of sloping mine headframes. Coal of Ukraine. 2011 №10. – P. 39-43.
2. Kushchenko V. N. Ensuring the safety of construction structures of sloping mine headframes: Monograph Makeevka: DonNASA, 2006. – 202 p.
3. Kushchenko V.M., Khomitskiy D.O. Vibration Monitoring of Steel Shaft Headgears/ Springer Nature Switzerland AG 2020/ Z. Blikharsky (ED): Eco CEE 2019, LNCE 47, pp 227-234.
4. Kushchenko V.M., Nechytailo O.E. Monitoring of Dynamic Loads on Steel Headframes/ Springer Nature Switzerland AG 2020/ Z. Blikharsky (ED): Eco Comfort 2020, LNCE 100, pp 245-252.
5. RD 12.005-94. Metal structures of mine headframes. Operating requirements. Kyiv: Gosugleprom Ukrainy, 1994. – 68 p.
6. DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Design norms. With amendment No. 1 – K: Ministry of Community Development of Ukraine, 2022. – 220 p.
7. Kushchenko V.M., Nechytailo O.E. Analysis of fatigue strength of structures of sloping mine headframes. – 2012. – vol. 18, No. 3 – P. 171 – 183. 8. DBN V.1.2-2: 2006 Loads and impacts. Kyiv: Ministry of Construction of Ukraine, 2006. – 75 p.
8. DBN V.1.2-2: 2006 Loads and influences. - K: Ministry of Construction of Ukraine, 2006. - 75p.
9. Kushchenko V.M., Nechytailo O.E. Ensuring the design reliability of support nodes of guide pulleys of frame sloping mine headframes / Bulletin of Lviv Polytechnic National University No 82: Theory and Practice of Construction. 2015. – P. 191 – 199.

### Література

1. Кущенко В.Н., Кулиш В.А. Анализ повреждаемости и аварийные состояния укосных шахтных копров. *Уголь Украины*. 2011 №10. – С. 39-43.
2. Кущенко В. Н. Обеспечение безопасности строительных конструкций укосных шахтных копров: Монография Макеевка: ДонНАСА, 2006. – 202 с.
3. Kushchenko V.M., Khomitskiy D.O. Vibration Monitoring of Steel Shaft Headgears/ Springer Nature Switzerland AG 2020/ Z. Blikharsky (ED): Eco CEE 2019, LNCE 47, pp 227-234.
4. Kushchenko V.M., Nechytailo O.E. Monitoring of Dynamic Loads on Steel Headframes/ Springer Nature Switzerland AG 2020/ Z. Blikharsky (ED): Eco Comfort 2020, LNCE 100, pp 245-252.
5. РД 12.005-94. Металлические конструкции шахтных копров. Требования к эксплуатации. – К: Госуглепром Украины, 1994. – 68 с.
6. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі зміною №1 – К: Міністерство розвитку громад України, 2022. – 220 с.
7. Кущенко В.М., Нечитайло О. Є. Аналіз втомної міцності конструкцій укисних шахтних копрів / Металеві конструкції. – 2012. – т. 18, №3 – С. 171 – 183.
8. ДБН В.1.2-2: 2006 Навантаження і впливи. – К: Мінбуд України, 2006. – 75с.
9. Кущенко В.М., Нечитайло О.Є. Забезпечення проектної надійності вузлів обпирання напрямних шківів рамних укисних шахтних копрів/ *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»* № 82: Теорія і практика будівництва». 2015. – С. 191 – 199.