ISSN 1996-8159

ПБіС
1'2021

ПРОМИСЛОВЕ БУДІВНИЦТВО ТА ІНЖЕНЕРНІ СПОРУДИ



ЗАСНОВНИКИ

ДЕРЖАВНА КОРПОРАЦІЯ
«УКРМОНТАЖСПЕЦБУД»

ТОВ «УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ
ім. В.М. ШИМАНОВСЬКОГО»

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 17750-6600 ПР від 07.04.2011 р.

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР
Адріанов В.П.

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР
Лукашевич Т.І.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Абрашкевич Ю.Д., д.т.н., проф.
Беркута А.В., к.е.н.
Гайдайчук В.В., д.т.н., проф.
Голоднов О.І., д.т.н., проф.
Гончаренко Д.Ф., д.т.н., проф.
Гордеєв В.М., д.т.н., проф.
Гуляєв В.І., д.т.н., проф.
Єгоров Є.А., д.т.н., проф.
Кваша В.Г., д.т.н., проф.
Корольов В.П., д.т.н., проф.
Лантух-Лященко А.І., д.т.н., проф.
Лобанов Л.М., академік НАНУ, д.т.н., проф.
Оглобля О.І., д.т.н., проф.
Пасечнюк В.Л.
Пічугін С.Ф., д.т.н., проф.
Стоянов В.В., д.т.н., проф.
Харченко В.В., академік НАНУ, д.т.н., проф.
Шимановський О.В., член-кор. НАНУ, д.т.н., проф.

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА
на 2021 — 2022 роки

Абель Д., д.т.н., проф. (США)
Агощ З., д.т.н., проф. (Словаччина)
Бєлоєв М., к.т.н. (Болгарія)
Ведяков І.І., д.т.н., проф. (Росія)
Грінченко В.Т., академік НАНУ, д.т.н., проф. (Україна)
Каравайченко М.Г., д.т.н., проф. (Росія)
Като Ш., д.т.н., проф. (Японія)
Лан Т., д.т.н., проф. (Китай)
Назаров Ю.П., д.т.н., проф. (Росія)
Новак А., д.т.н., проф. (США)
Розерт Х., д.т.н., проф. (Німеччина)
Сидорович Є.М., д.т.н., проф. (Білорусь)
Спарлінг Б., д.т.н., проф. (Канада)
Трощенко В.Т., академік НАНУ, д.т.н., проф. (Україна)
Тулєбаєв К.Р., д.т.н. (Казахстан)
Янковяк Р., д.т.н., проф. (Польща)

НАУКОВО–ВИРОБНИЧИЙ ЖУРНАЛ

ПБіС
1'2021

ПРОМИСЛОВЕ БУДІВНИЦТВО ТА ІНЖЕНЕРНІ СПОРУДИ

Виходить 4 рази на рік

Заснований у листопаді 2007 року

ЗМІСТ

ЛАУРЕАТИ ДЕРЖАВНОЇ ПРЕМІЇ УКРАЇНИ
В ГАЛУЗІ НАУКИ І ТЕХНІКИ 2020 РОКУ 2

МОСТОВІ СПОРУДИ

О.В. Шимановський, Д.О. Котлубей, В.В. Шалінський, Б.П. Кобернюк, І.А. Корнаков
ДЕЯКІ ПИТАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МОСТА ім. Є.О. ПАТОНА 3

В.Д. Позняков, В.П. Дядін, Є.О. Давидов, Р.І. Дмитрієнко
ТЕХНІЧНИЙ СТАН МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ГОЛОВНИХ БАЛОК МОСТА ім. Є.О. ПАТОНА ЧЕРЕЗ р. ДНІПРО У м. КИЄВІ. 9

НОРМАТИВНА БАЗА

В.М. Гордеєв
НАСТАНОВА З ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ 18

НАУКА – ВИРОБНИЦТВУ

А.М. Онищенко, В.В. Ковальчук, О.В. Федоренко, Ю.Є. Ковальчук
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД 24

Ю.Д. Абрашкевич, О.А. Марченко, Г.М. Мачишин, С.Ю. Комоцька
ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА НАВАНТАЖЕННЯ АБРАЗИВНИХ АРМОВАНИХ КРУГІВ. 32

ПРОСТОРОВІ КОНСТРУКЦІЇ

Е.И. Гезенцвей, В.И. Олевский, А.В. Олевский
АНАЛИЗ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ФУТЕРОВКИ БУНКЕРА РУДНЫХ ВЕСОВ. 38

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

І.І. Ніконець, І.М. Мартинюк, Є.М. Шматов, Р.В. Казмірчук
ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА КРЕЙДО-БАЗАЛЬТОВОГО ЦЕМЕНТУ 45

Київ • 2021

© Промислове будівництво та інженерні споруди, 2021

ЛАУРЕАТИ ДЕРЖАВНОЇ ПРЕМІЇ УКРАЇНИ В ГАЛУЗІ НАУКИ І ТЕХНІКИ 2020 РОКУ

за роботу «Прогресивні будівельні конструктивні системи та технології їх зведення»



ШИМАНОВСЬКИЙ Олександр Віталійович
член-кореспондент Національної академії наук України,
генеральний директор товариства з обмеженою
відповідальністю «Український інститут сталевих конструкцій
імені В.М. Шимановського»



БАБАЄВ Володимир Миколайович
доктор наук з державного управління,
ректор Харківського національного університету
міського господарства імені О.М. Бекетова



СУХОНОС Марія Костянтинівна
доктор технічних наук,
проректор Харківського національного університету
міського господарства імені О.М. Бекетова



ШМУКЛЕР Валерій Самуїлович
доктор технічних наук, завідувач кафедри
Харківського національного університету
міського господарства імені О.М. Бекетова



ЄВЕЛЬ Сергій Михайлович
кандидат технічних наук, голова товариства
з обмеженою відповідальністю «Стальконструкція ЛТД»



ЄВЗЕРОВ Ісаак Данилович
доктор технічних наук, директор товариства
з обмеженою відповідальністю «ВЕГА КАД»



ШЕВЕТОВСЬКИЙ Валентин Валентинович
доктор філософії, директор товариства
з обмеженою відповідальністю
«Керамічна група «Голден Тайл», PhD



ЛАНТУХ-ЛЯЩЕНКО Альберт Іванович
доктор технічних наук, пенсіонер

Указ Президента України № 608/2020 про присудження Державних премій України в галузі науки і техніки 2020 року

ДЕЯКІ ПИТАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МОСТА ім. Є.О. ПАТОНА



О.В. Шимановський
генеральний директор
ТОВ «Укрінсталькон
ім. В.М. Шимановського»,
член-кореспондент НАН України,
заслужений діяч науки і техніки
України, д.т.н., професор



Д.О. Котлубей
радник заступника голови КМДА
з питань технічного стану, ремонту
і реконструкції вулично-дорожньої
мережі, заслужений будівельник
України



В.В. Шалінський
завідувач відділу
мостів та спеціальних споруд
ТОВ «Укрінсталькон
ім. В.М. Шимановського», к.т.н.,
старший науковий співробітник



Б.П. Кобернюк
в.о. начальника Комунального
підприємства по ремонту
та утриманню мостів і шляхів м. Києва
«Київавтошляхміст»



І.А. Карнаков
директор по виробництву ТОВ
«Дорожнє будівництво «Альтком»,
заслужений будівельник України

Відкриття унікальної інженерної споруди – моста імені Євгена Патона через р. Дніпро у м. Києві, яке відбулося 5 листопада 1953 року, без перебільшення можна назвати історичною подією (рис. 1). Адже на той час це був найбільший у світі суцільнозварний міст, який посів першу сходинку у відповідному світовому рейтингу. Слід зазначити, що у проєктній документації моста, розробленій київським проєктним бюро «Проектстальконструкція» (нині ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського»), міст мав достатньо буденну назву – Київський міський міст. Свою ж сучасну назву на честь видатного українського вченого у галузі мостобудування й зварювальних процесів, автора новітньої на той час технології автоматичного зварювання під флюсом, Героя Соціалістичної Праці, лауреата Державної премії СРСР, заслуженого діяча науки України, академіка НАН України і першого керівника Інституту електрозварювання України Євгена Оскаровича Патона він отримав 18 серпня 1953 року, коли була прийнята відповідна Постанова Бюро ЦК КП України (рис. 2).

Проєкт моста почав розроблятися наприкінці 1944 року ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського» (на той час київське проєктне бюро «Проектстальконструкція») під загальним керівництвом Є.О. Патона. Причому в проєкті повною мірою були застосовані результати експериментальних і наукових досліджень, виконаних Є.О. Патоном при розробленні передових зварювальних технологій. А застосування уточнених методів розрахунку дало змогу врахувати просторову роботу прогонової будови, що сукупно зі всебічним використанням резервів міцності й застосуванням нових конструктивних рішень дозволило знизити витрати сталі до 250 кг/м^2.

Розгляд і затвердження проєкту моста Радою Міністрів УРСР пройшло вельми швидко і відбулося 1 квітня 1949 р., а його урочисте відкриття, про що вже було згадано вище, 5 листопада 1953 року. На жаль, Євген Оскарович Патон не дожив до цього величного моменту усього лише три місяці, його життя обірвалося на світанку 12 серпня 1953 р.

Слушно зазначити, що міст ім. Є. О. Патона – це перший автодорожній міст у м. Києві через р. Дніпро, введений в експлуатацію у післявоєнний період. Пізніше були зведені: міст Метро у 1965 році, Північний міст (до 2018 року – Московський міст) – у 1976 році, Південний міст – у 1990 році, а останній, Дарницький міст – у 2010 році.

З наведеного вище випливає, що міст імені Є.О. Патона експлуатується вже майже 68-м років і, на превеликий жаль, нині перебуває у непраце-

© Шимановський О.В., Котлубей Д.О., Шалінський В.В., Кобернюк Б.П., Карнаков І.А.



Рис. 1. Відкриття моста ім. Є.О. Патона 05.11.1953 р.



Рис. 2. Загальний вигляд моста ім. Є.О. Патона сьогодні

здатному стані, що було встановлено за результатами раніше проведених планових обстежень у 2017 та 2018 роках [1, 2]. Через це, а також відповідно до вимог чинних нормативних документів [3, 4] у 2020 році відбулося чергове планове обстеження моста, яке крім зазвичай виконуваних робіт із обстеження, додатково передбачало низку інструментально-вишукувальних робіт



Рис. 3.
Засідання президії НАН України за участі представників Київської міської ради, Київської міської державної адміністрації, Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона і ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського», присвячене ліквідації наслідків аварійних ситуацій на мосту ім. Є.О. Патона та проведенню ремонтних робіт.

На фото в центрі президент Національної академії наук України академік Б.Є. Патон, ліворуч – Київський міський голова, голова Київської міської державної адміністрації В.В. Кличко, праворуч – генеральний директор ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського» член-кореспондент НАН України О.В. Шимановський
Київ, 12 липня 2018 року.

щодо головних балок (серед них ультразвуковий та магнітно-порошковий контроль зварних з'єднань) і динамічні випробування моста.

За результатами останнього обстеження встановлено, що основні зафіксовані дефекти конструкцій моста, причини їх виникнення та розвинення є наслідками недотримання міжремонтних термінів, тобто відсутності планових капітальних ремонтів. Виявлені дефекти негативно впливають на довговічність конструкцій, знижують безпеку та комфортність руху по мосту, і в деяких випадках не тільки призводять до зменшення його несної здатності, а навіть до виникнення неодноразових, особливо останніми роками, аварійних ситуацій [5].

Слід зазначити, що процесу ліквідації наслідків аварійних ситуацій особливу увагу приділяв Борис Євгенович Патон, обговорюючи виконання відповідних ремонтних робіт на засіданнях президії НАН України за участі керівників м. Києва та фахівців наукових і проєктних організацій, які були залучені до їх реалізації (рис. 3).

Що ж безпосередньо стосується результатів чергового планового обстеження моста ім. Є.О. Патона, яке було здійснено в 2020 році, то до переліку конструкцій моста, які мають дефекти, що потребують термінового усунення, відносяться:

- підводна та надводна частини опори № 21, на яких виявили вивали фрагментів кам'яної кладки (рис. 4). Оскільки цей дефект знаходиться в зоні коливання рівня води, то він вимагає невідкладного поновлення кладки;



Рис. 4. Вивали фрагментів кам'яної кладки опори № 21



Рис. 5. Сколи бетону, оголення та корозія арматури підферменників опори № 11

- надводна частина опори № 11, на якій зафіксоване часткове руйнування бетону ригеля опори під підферменником (рис. 5). З метою уникнення погіршення технічного стану споруди в цілому і недопущення можливого виникнення в подальшому аварійних ситуацій, першочерговими заходами для опори № 11 є термінове виконання ремонтних робіт із відновлення ригеля опори та підферменників верхових головних балок прогонових будов;
- горизонтальні та вертикальні в'язі за всією довжиною моста потребують невідкладного ремонту внаслідок значної корозійної деградації в межах від 50 % і більше, а деякі з них навіть зруйновані повністю (рис. 6);
- оглядові проходи через корозію та руйнацію багатьох їх несних елементів (рис. 7) є непридатними для пересування технічного персоналу, а тому вимагають термінового капітального ремонту відповідно до проєкту, розробленого ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського» у 2020 році;
- деформаційні шви ковзного типу не відповідають вимогам безпеки руху (рис. 8) та потребують капітального ремонту шляхом влаштування нових швів, а також заміни поперечних балок у місцях деформаційних швів. Відповідна проєктно-кошторисна документація була розроблена ТОВ «Укрінсталькон ім. В. М. Шимановського» у 2016 році;
- залізобетонна плита проїзної частини має окремі місця з глибиною карбонізації бетону до 20 мм й з корозійними пошкодженнями арматури від 6 % до 58,4 % площі поперечного перерізу (рис. 9), що свідчить про необхідність проведення капітального ремонту або повної реконструкції плити;
- корозія і руйнування вузлів кріплення стовпів освітлення (рис. 10) мають негативний вплив на безпеку руху автомобілів на проїзній частині та перехожих на тротуарах. Стовпи освітлення необхідно якнайшвидше відремонтувати або замінити їх новими;
- руйнування секцій перильної огорожі та їх кріплень (рис. 11) загрожує не тільки безпеці руху пішоходів, а й пропливаючим під мостом плавзасобам. Оскільки майже всі конструкції перил перебувають в аварійному стані, то вони потребують повної заміни.

З вище викладеного випливає, що **НЕВІДКЛАДНО (терміново, негайно) потрібно виконати наступні роботи:**

- ремонт або повну заміну поперечних балок за всією довжиною моста;
- ремонт або повну заміну вертикальних та горизонтальних в'язей прогонових будов;
- ремонт проміжних опор № 21 та № 11;
- заміну деформаційних швів із прилеглими поперечними балками;
- ремонт стовпів освітлення та перил.

Вкажемо на те, що невиконання вищезазначених робіт у найкоротший термін призведе до того, що конструкції моста, які наразі перебувають у стані 5 (непрацездатний), можуть повністю зруйнуватися та спричинити численні аварії. Також варто окремо підкреслити, що невиконання невідкладних робіт із капітального ремонту (заміни) перил та стовпів освітлення може мати непоправні наслідки.

Отримані в результаті обстеження дані та результати розрахунків вантажопідйомності, визначення остаточного ресурсу моста та експертної оцінки його технічного стану дали змогу виконати оцінку та прогнозування технічного стану моста відповідно до вимог [2]. У такий спосіб основні елементи моста віднесено до таких експлуатаційних станів: мостове полотно – стан 5 (непрацездатний); сталезалізобетонна проїзна частина – стан 5 (непрацездатний); прогонова будова – стан 4 (обмежено працездатний); опори та опорні частини – стан 5 (непрацездатний); фундаменти – стан 3 (працездатний); підходи – стан 3 (працездатний).

З урахуванням аварійного стану поперечних балок, а також технічного стану інших конструкцій моста в цілому, задля можливості забезпечення його подальшої експлуатації були рекомендовані наступні вимушені обмеження щодо навантажень від автотранспорту: заборонити в'їзд на міст будь-якого транспорту, навантаження на вісь якого перевищує 7 т; обмежити максимальну вагу окремих одиничних транспортних засобів на мосту, яка не повинна перевищувати 17 т; обмежити максимальну вагу автотранспортних засобів у колоні на мосту, яка не повинна перевищувати 12 т. Більше того, було вказано також на те, що подальша експлуатація моста можлива винятково за умови постійного моніторингу технічного стану його конструкцій.



Рис. 6. Корозія горизонтальної в'язі більше 50 % перерізу



Рис. 7. Руйнування та деформація металоконструкцій оглядових проходів



Рис. 8. Пружини та упори деформаційного шва, зруйновані корозією



Рис. 9. Руйнування захисного шару бетону плити проїзної частини



Рис. 10. Корозійне руйнування балкової клітки бази ліхтарної щогли



Рис. 11. Руйнування перильної огорожі

Враховуючи складність та обсяги ремонтних робіт, пов'язаних із приведенням несних конструкцій проїзної частини, і в першу чергу – поперечних балок, до належного технічного стану, рекомендовано провести реконструкцію (реставрацію) моста з повною заміною зазначених конструкцій.

Зауважимо, що за результатами лабораторних досліджень, виконаних у жовтні 2020 року НТК «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона», хімічний склад, механічні властивості (межа плинності, межа міцності, відносне подовження, ударна в'язкість) та структура металу головних балок у цілому відповідають вимогам сталі М16С за ГОСТ 6713-53 та її сучасному аналогу – сталі 16Д за ДСТУ 8817:2018 та ГОСТ 6713-91. Також за результатами неруйнівного контролю головних балок моста ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві встановлено, що наразі суцільнозварні металеві головні балки після майже 68-річної експлуатації загалом не втратили своїх експлуатаційних властивостей, але з метою відновлення початкової несної здатності потребують місцевого підсилення перерізів, яке може бути здійснене шляхом відновлення товщини металу наплавленням та приварюванням додаткових вертикальних ребер жорсткості.

Враховуючи теперішній технічний стан головних балок моста, за умови виконання робіт, спрямованих на відновлення їх початкової несної здатності, за висновками фахівців НТК «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона» головні балки можуть бути використані при реконструкції (реставрації) моста. А збільшення несної здатності головних балок може бути реалізоване шляхом приварювання додаткових підсилювальних елементів, зокрема підсилювальних листів до поясів балок.

У випадку реконструкції (реставрації) моста рекомендовано наступне:

- провести моніторинг руху автотранспорту на мосту з метою визначення фактичної інтенсивності руху та дійсних автомобільних навантажень на міст;
- визначитися з величинами автомобільних навантажень на міст, а також із кількістю та шириною смуг руху автотранспорту на мосту після реконструкції (реставрації), узгодивши їх з усіма зацікавленими сторонами. За необхідності розробити відповідні технічні умови;
- за можливості демонтувати труби теплотраси, що збільшують навантаження на міст та у разі виникнення на них аварійних ситуацій шкодять несним конструкціям моста.

Висновок.

У разі неусунення найближчим часом виявлених при останньому обстеження дефектів та невиконання робіт із реконструкції (реставрації) моста, деградація його конструкцій буде не тільки продовжуватися, але й пришвидшуватиметься, що може спричинити повне руйнування окремих конструкцій (в тому числі – несних), та, як наслідок, призведе не тільки до можливих людських жертв, а й колапсу всієї транспортної інфраструктури м. Києва. Виходячи з цього, наразі необхідно невідкладно розпочинати роботи із ремонту та реконструкції (реставрації) моста.

[1] *Шимановський О.В., Котлубей Д.О., Шалінський В.В.* Міст ім. Є.О. Патона – нинішній стан та перспективи // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2018. – № 1. – С. 2–9.

[2] *Шимановський О.В., Котлубей Д.О., Шалінський В.В.* Щодо технічного стану моста ім. Є.О. Патона // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2019. – № 1. – С. 20–25.

[3] ДБН В.2.3-6:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження та випробування. – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2009. – 44 с.

[4] ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. – 45 с.

[5] *Шимановський О.В., Котлубей Д.О., Шалінський В.В.* Аварійна ситуація на мосту ім. Є.О. Патона та заходи щодо її вирішення // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2018. – № 4. – С. 30–33.

Надійшла 04.02.2021 р.

ТЕХНІЧНИЙ СТАН МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ГОЛОВНИХ БАЛОК МОСТА ім. Є.О. ПАТОНА ЧЕРЕЗ р. ДНІПРО У м. КИЄВІ



В.Д. Позняков
завідувач відділу
Інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України,
чл.-кор. НАН України,
д.т.н.



В.П. Дядін
старший науковий співробітник
Інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України,
к.т.н.



Є.О. Давидов
старший науковий співробітник
Інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України,
к.т.н.



Р.І. Дмитрієнко
провідний інженер-технолог
Інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України

Київський міський міст ім. Є.О. Патона через р. Дніпро є першим у світі суцільнозварним автодорожнім мостом, який увійшов до анналів світового мостобудування. Наказом Комітету охорони і реставрації пам'яток № 10 від 16.05.1994 р. міст ім. Є. О. Патона був визнаний сучасною пам'яткою архітектури. У 1995 році міст отримав визнання Американської асоціації зварювання як видатна зварна споруда XX століття.

Будівництво моста було розпочато ще до Другої світової війни. Прогонові споруди на той час були запроєктовані у вигляді наскрізних розрізних ферм. Передбачалося, що з'єднання елементів конструкції, які виготовляються на заводі, будуть зварними, а на монтажному майданчику – клепаними. У зв'язку з початком війни будівництво моста було припинене та відновилося лише після її закінчення. На той час Є.О. Патон змінив концепцію побудови моста і запропонував виготовити його суцільнозварним. Такий підхід викликав необхідність у розробленні нових конструктивних рішень прогонових будов та сталі для їх виготовлення.

Окремо треба відзначати, що для виготовлення металевих конструкцій моста було запропоновано використати передові на той час технології механізованого зварювання під шаром флюсу, які добре себе зарекомендували під час Другої світової війни, зокрема, на підприємствах, що виробляли корпуси броньових машин. Саме ці технології зварювання були взяті за основу та застосовані під час виготовлення металевих конструкцій моста ім. Є.О. Патона в заводських умовах, а також під час їх монтажу на будівельному майданчику [1, 2, 3]. Це дало змогу отримати суттєві переваги перед існуючими на той час підходами до будівництва сталевих мостів, а саме:

- перенести складання великоблокових елементів із використанням автоматичного та напівавтоматичного зварювання на завод, який виготовляв конструкції, що значно спростило й скоротило монтажні операції (рис. 1);
- застосувати автоматичне та напівавтоматичне зварювання під шаром флюсу під час складання двотаврових балок в умовах монтажу (рис. 2);
- звести номенклатуру монтажних з'єднань до однотипних стиків суцільних ферм двотаврового перетину (рис. 3), що дозволило значно спростити складання й скоротити час на виконання зварювальних робіт, які раніше виконувалися переважно з використанням ручного дугового зварювання покритими електродами.

Комплекс цих рішень забезпечив необхідну надійність та якість вузлових зварних з'єднань мостових споруд, що підтверджено часом.

Міст складається з 24-х прогонових споруд та має загальну довжину 1542,2 м. Правобережна частина моста складається з десяти прогонів, які перекриті двома суцільнозварними 5-прогоновими нерозрізними спорудами (5×58) + (5×58) м. Середня частина моста, яка розташована над судноплавною ділянкою річки, має шість про-

© Позняков В.Д., Дядін В.П., Давидов Є.О., Дмитрієнко Р.І.

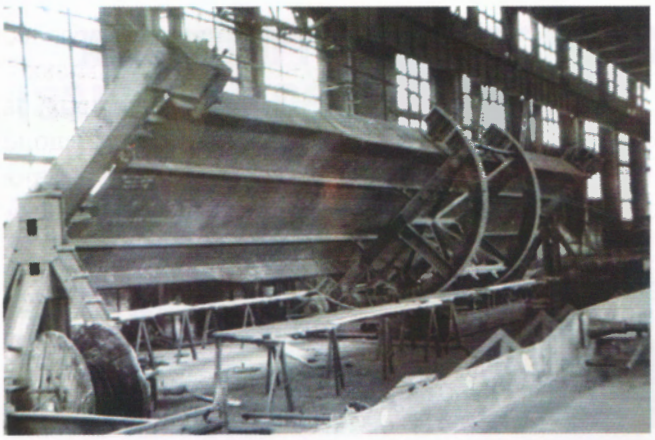


Рис. 1. Зварювання поздовжніх ребер жорсткості та поясних швів ферми [2]

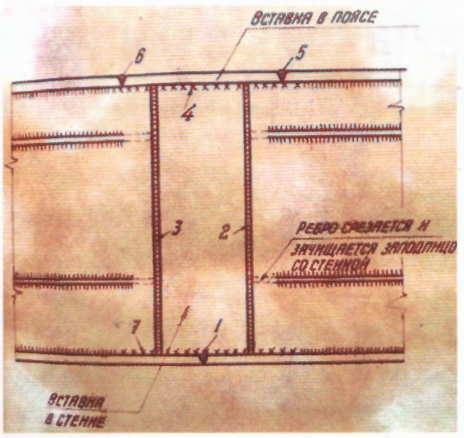


Рис. 3. Порядок монтажного складання та зварювання типових ферм моста [2]



Рис. 2. Приклад застосування автоматичного зварювання під шаром флюсу при стикуванні ферм головних балок [2]

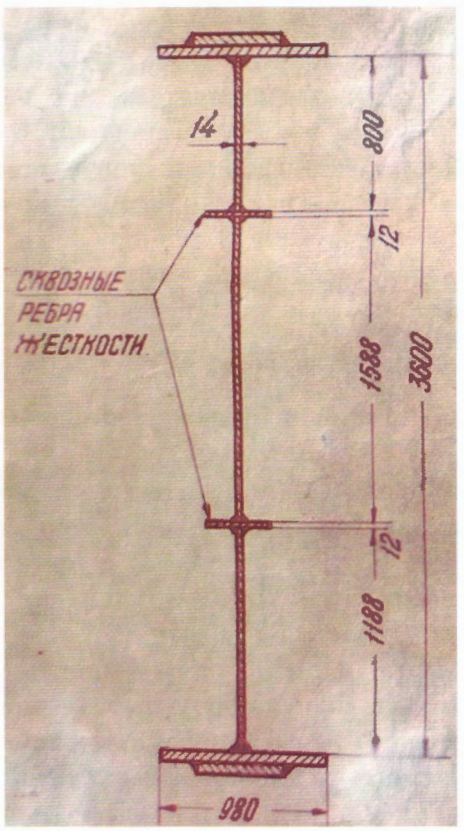


Рис. 4. Поперечний переріз ферми головних поздовжніх балок 4- та 5-прогонових споруд моста

гонів, які перекриті нерозрізним суцільнозварним спорудами 58 + 4×87 + 58 м. Лівобережна частина моста має 8 прогонів по 58 м, яка перекрита двома 4-прогоновими суцільнозварними нерозрізними спорудами (4×58) + (4×58) м.

У поперечному перерізі кожна споруда має чотири головні поздовжні балки двотаврового перетину, що складаються з вертикальної стінки, заввишки 3600 мм і завтовшки 14 мм і поясів різної товщини, яка змінюється від 30 мм до 80 мм, при ширині до 1000 мм (рис. 4). Стійкість стінки балки додатково забезпечується вертикальними ребрами, встановленими з кроком 7,25 м. У 6-прогонових спорудах висота стінки над проміжними опорами за рахунок пристрою вутів збільшена до 6200 мм.

Головні поздовжні балки складаються з ферм, які зварені між собою встик із використанням автоматичного зварювання під флюсом під час монтажу металевих конструкцій. Кількість

ферм у кожній з 4-прогонових головних поздовжніх балок становить 9 шт, в 5-прогонових головних балках – 11 шт, а в 6-прогонових головних балках – 21 шт. Ферми виготовлені з низьковуглецевої сталі марки М16С.

Міст ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві було запроектовано виходячи з умов, що проєктна інтенсивність руху має складати 10 тис. автомобілів на добу. В процесі тривалої експлуатації моста навантаження на його несні елементи поступово зростали, що пов'язано як із збільшенням інтенсивності руху автомобілів на добу, наразі вона зросла практично в десять разів, так і зі збільшенням ваги автомобілів. Окрім цього збільшилися постійні навантаження на міст внаслідок прокладання труб теплотраси та збільшення товщини асфальтобетонного покриття. У зв'язку з цим у 1994–1998 роках було виконано підсилення поперечних балок моста, які розташовані біля деформаційних швів, та встановлено додаткові ребра жорсткості на окремих ділянках вертикальних стінок ферм головних балок [4].

Враховуючи важливе для м. Києва значення моста ім. Є.О. Патона, він із певною періодичністю обстежується фахівцями ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського». До 2018 року головна увага при обстеженні технічного стану моста приділялась дорожньому полотну, тротуарам, деформаційним швам, поперечним елементам і зв'язкам між головними балками [4]. Що стосується основних несних елементів моста – головних поздовжніх балок, то їх обстежували лише візуально без використання інструментальних та фізичних методів контролю, що не дозволяло отримати більш детальну інформацію фактичного технічного стану металевих конструкцій.

З часом металеві конструкції моста почали зазнавати втрат металу від корозії. Перша згадка про корозійні пошкодження елементів головних поздовжніх балок з'явилася в статтях [4, 5], що були опубліковані спеціалістами ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського» за результатами обстеження моста, виконаному наприкінці 2018 року. Саме тоді вони звернули увагу на те, що на стінках головних балок споруди в місцях розташування деформаційних швів відбулася значна корозія металу та дійшли висновку, що міст ім. Є.О. Патона перебуває в аварійному стані та невідкладно потребує капітального ремонту з частковою заміною його конструктивних елементів. У подальшому ці питання неодноразово обговорювалися на нарадах в Київській міській державній адміністрації та КП «Київавтодор», за підсумками яких було прийняте рішення щодо реконструкції моста та необхідності проведення більш детального обстеження його конструктивних елементів. Зокрема, вперше увага була акцентована на необхідності перевірки технічного стану головних поздовжніх металевих зварних балок та на тому, що такі роботи мають бути виконані з використанням сучасних неруйнівних методів контролю. За результатами тендера, який відбувся у 2019 році, відповідальність за виконання таких робіт було покладено на ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського» з залученням фахівців Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в частині обстеження головних поздовжніх балок моста. Зазначені роботи було виконано у 2020 році.

При обстеженні технічного стану головних балок споруд моста робота виконувалася за наступними напрямками:

1. Вибірковий ультразвуковий контроль стикових заводських і монтажних зварних з'єднань балок.

2. Вибірковий ультразвуковий контроль основного металу елементів балок на наявність розшарування.

3. Вибіркова товщинометрія основних елементів головних балок.

4. Вибірковий магнітний контроль кутових і стикових зварних з'єднань.

Необхідність і достатність саме таких методів контролю було визначено за результатами попереднього обстеження головних поздовжніх балок моста, розташованих між 2-ю і 3-ю опорами, яке було виконано фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в липні 2019 р.

Беручи до уваги значну загальну довжину заводських та монтажних зварних з'єднань (більше 110 км), вибірковий ультразвуковий контроль стикових швів виконувався в місцях, визначених за результатами візуального огляду головних балок. Основна увага приділялась місцям, в яких при монтажі та виготовленні елементів ферм були виявлені дефекти [1, 2] в зварних з'єднаннях та проводився їх частковий ремонт. Усього було проконтрольовано 150 м зварних з'єднань, 50 % з яких складали монтажні шви, якими через вставки з'єднувалися між собою ферми (рис. 3, 5, 6).



Рис. 5. Контроль стикових вертикальних швів з'єднувальної вставки



Рис. 6. Контроль стикового шва у верхньому поясі з'єднувальної вставки

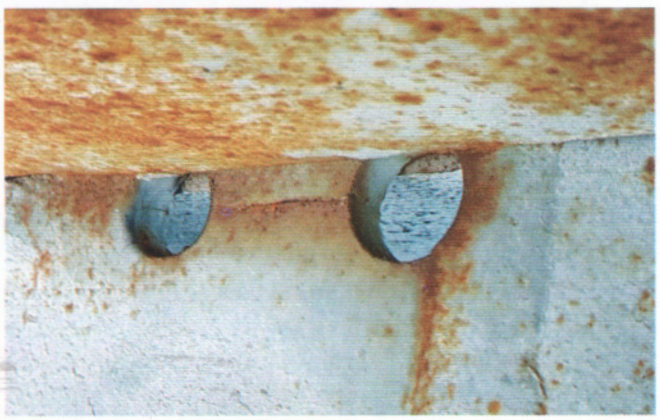


Рис. 7. Дефект, не усунений під час монтажу (кінці тріщини були зупинені методом свердлення), що не набув подальшого розвитку [2]

Результати ультразвукового контролю монтажних і заводських зварних швів прогонових споруд свідчать про те, що зварні з'єднання головних балок перебувають у задовільному стані. Навіть ті де дефекти, що були виявлені ще на етапі будівництва моста, в процесі тривалої експлуатації розвитку не набули (рис. 7).

З використанням ультразвукового контролю вибірково було також перевірено суцільність основного металу головних балок. Необхідність проведення такого типу неруйнівного контролю пов'язана з тим, що, як свідчать результати звіту з будівництва моста, при виготовленні ферм головних поздовжніх балок у ряді випадків фіксувалися локальні місця з розшаруванням в металі горизонтальних ребер жорсткості. Якщо розшарування не доходило до зварних з'єднань, такі ділянки не ремонтувалися та в подальшому контролювалися на предмет можливого збільшення несуцільностей [2]. Після 80-х років минулого сторіччя такі спостереження припинили і тому було прийняте рішення щодо їх огляду в рамках даного обстеження головних балок моста. Для оцінки ймовірного збільшення розшарування металу в місцях розташування Т-подібних та Х-подібних зварних з'єднань було вибірково проконтрольовано 7 м^2 металу. Контролювали ділянки основного металу різної товщини, які безпосередньо примикають до зварних з'єднань та в яких під час монтажу було виявлено розшарування. Результати такого контролю показали, що в жодній з проконтрольованих ділянок поширення розшарування на інші ділянки не виявлено. Слід зазначати, що при проєктуванні горизонтальних ребер жорсткості було передбачено їх приварювання до вертикальної стінки ферми без повного проплавлення (рис. 4). Це дало змогу значно зменшити залишкові напруження у напрямку товщини металу та за рахунок цього суттєво знизити ризик розвитку даного дефекту металу.

Оскільки ультразвуковий метод контролю не дозволяє надійно проконтролювати поверхневі та приповерхневі шари зварного з'єднання, при обстеженні металевих конструкцій головних балок моста було додатково застосовано магнітний метод контролю. Такий метод контролю було обрано з урахуванням того, що він виконується відносно швидко та не потребує значних зусиль на підготовку поверхні для контролю.

Враховуючи велику кількість зварних з'єднань та обмежений доступ до місць контролю, вибір ділянок, де виконувався такий контроль, базувався на наступному.

1. Ділянки контролю вибиралися випадково.

2. Вибір місць контролю, в більшості випадків, здійснювався в найбільш навантажених зонах (зазвичай вибиралися зварні з'єднання в нижній розтягнутій зоні).

3. З огляду на те, що монтажні зварні шви виконувалися в більш складних умовах, ніж заводські, контроль монтажних з'єднань був у більшому пріоритеті незалежно від їх розрахункового навантаження.

4. Оскільки утворення тріщин хоч і підпорядковується певним правилам, але, тим не менш, має ймовірнісний характер, контролювалися не лише значно навантажені по відношенню до інших ділянки конструкції, а й ті місця, де розрахункові навантаження є відносно невеликими.

Всього в різних місцях прогонових споруд було проконтрольовано 124 ділянки зварних з'єднань із біляшовними зонами загальною площею 40,0 м^2. Такий обсяг контролю цілком достатній для виявлення системних втомних тріщин. Результати контролю вносились до робочих карт контролю, які були прив'язані до номерів ферм, із яких виготовлена повздовжня балка, та номерів опор, між якими вона знаходиться. Загалом за результатами цих досліджень було встановлено, що в процесі тривалої експлуатації тріщини втоми в зварних з'єднаннях металевих конструкцій головних балок не утворилися і конструкції перебувають в задовільному стані. Ґрунтуючись на даних магнітного контролю, можна також зазначити, що обстежені металоконструкції мають необхідний запас циклічної міцності та відповідають вимогам ДСТУ EN ISO 23278.

Оскільки, як зазначалося вище, метал головних балок зазнав певних втрат товщини від корозії, значна увага при їх обстеженні приділялась тому, щоб оцінити ступінь корозійного ураження елементів металевих конструкцій балок (пояс, стінка, горизонтальні і вертикальні ребра жорсткості, які посилюють накладки поясів, опорні ребра та ін.) та виявити основні чинники, які сприяли розвитку корозії. Враховуючи значну довжину головних балок, товщинометрія зазначених елементів конструкції виконувалася шляхом вибіркового, а тому нерівномірного по довжині всієї конструкції, вимірювання фактичної товщини. З метою уточнення і виявлення найбільш характерних ушкоджень елементів головних балок і супутніх їм факторів при обстеженні прогонових споруд інструментальними методами контролю кількість вимірювань на крайніх балках (№ 1, № 4) була більш щільною, ніж на балках № 2 та № 3. Необхідність збільшення щільності вимірювань була викликана великим скупченням сміття на крайніх балках споруди та обмеженим доступом до елементів контролю зі зворотного боку конструкції.

Крім вимірювання товщини відстежувалася наявність можливого розшарування металу вузлових з'єднань, в місці приварювання горизонтальних і вертикальних ребер жорсткості до стінок балки. Місця, де були виявлені розшарування в металі та витягнуті неметалічні включення, фіксувалися на робочих картах контролю.

При вибірковому контролі товщини елементів ферм у місцях скупчення сміття було виконано 12640 вимірювань. При частковому обстеженні головних поздовжніх балок прогонових споруд було виконано 16876 вимірювань товщини. За результатами вимірювань були побудовані робочі карти контролю (168 карт-ферм). Типові приклади корозійних ушкоджень зварних вузлів головних балок моста представлено на рис. 8.

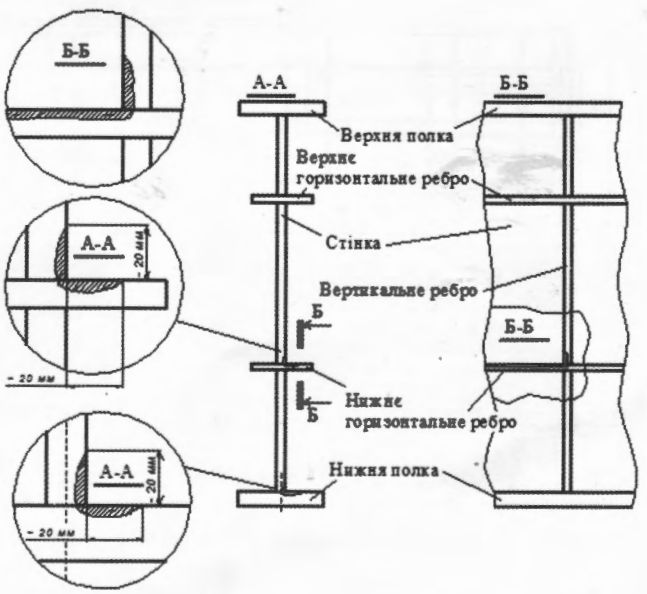


Рис. 8. Типове корозійне пошкодження зварних з'єднань елементів ферм головних балок

Найбільш типові пошкодження головних балок прогонових споруд показані у вигляді фрагментів робочих карт контролю, які представлені на рис. 9–11. Причому на картах контролю застосовано наступні умовні позначення: Ф – ферма; ділянки, на яких втрата металу від корозії знаходиться в межах від 2 мм до 4 мм – ,

а у разі більше за 4 мм – . Цифра зверху над кольором означає приблизну довжину відповідної зони вздовж ферми. Окремий квадрат або відповідає довжині приблизно 100 мм. Якщо зона відокремлюється конструктивними елементами, наприклад, вертикальними ребрами або зварними з'єднаннями листів, тоді цифра над кольором не позначена. Неметалеві включення – . Границі ферм позначені синім кольором, а рухома та нерухома опори відповідно – 22 23. У квадратних дужках надані номера фотографій деяких ділянок. Місця, де не проводився вибірковий контроль, позначені пунктирним перехрестям.

Чорним кольором нанесені дефекти згідно з даними ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського», які були наведені в звіті, складеному за результатами обстеження моста в 2018 році.

Загалом за результатами виконаних вимірювань товщини та проведеного аналізу було визначено, що внаслідок протікання скрізь деформаційні шви дощової води та води, що утворилася після танення снігу (містить солі) на металеві конструкції головних балок, метал кінцевих ділянок ферм, які примикають до деформаційних швів, зазнав локальних, але місцями значних корозійних ушкоджень. Через корозію товщина металу в елементах конструкції, а саме: в нижніх поясах, нижніх горизонтальних ребрах та в нижній частині стінок головних балок, суттєво зменшилася. В окремих місцях на 40 % ... 50 %.

Найменші пошкодження від корозії спостерігаються біля деформаційних швів у фермах середніх головних балок № 2 та № 3, а більш масштабні втрати металу від корозії виявлені в фермах крайніх № 1 та № 4 головних балок. Останнє пов'язано з наявністю на нижньому горизонтальному ребрі та нижньому поясі цих балок значної кількості сміття, яке концентрує в собі вологу та не дає можливості просихати металу довгий час (рис. 12, 13). Окрім ділянок головних балок № 2 та № 3, які розташовані біля деформаційних швів, інші елементи цих балок перебувають у задовільному стані.

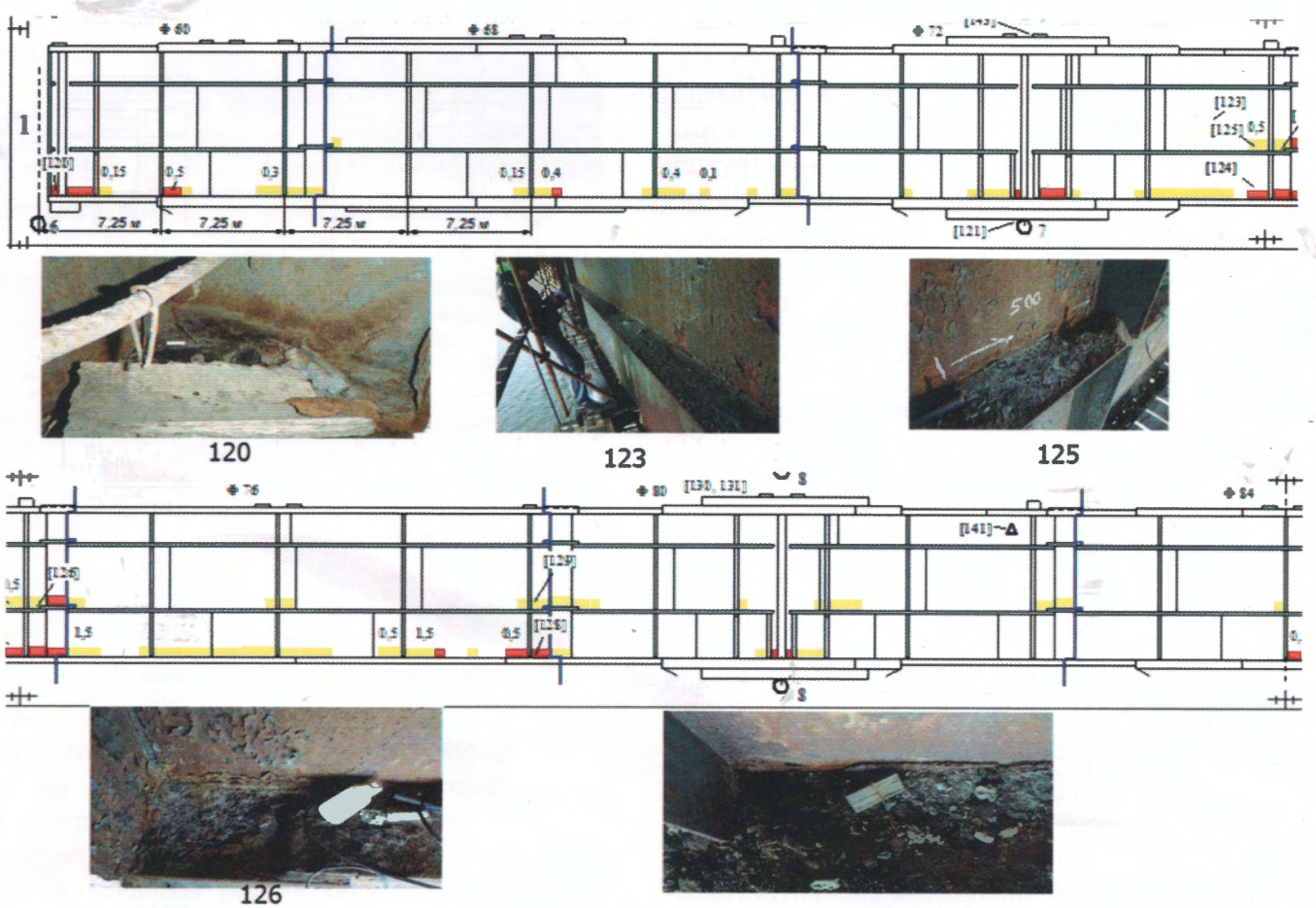


Рис. 9. Фрагмент зведених результатів контролю елементів балки № 1, розташованої між 6–9 опорами

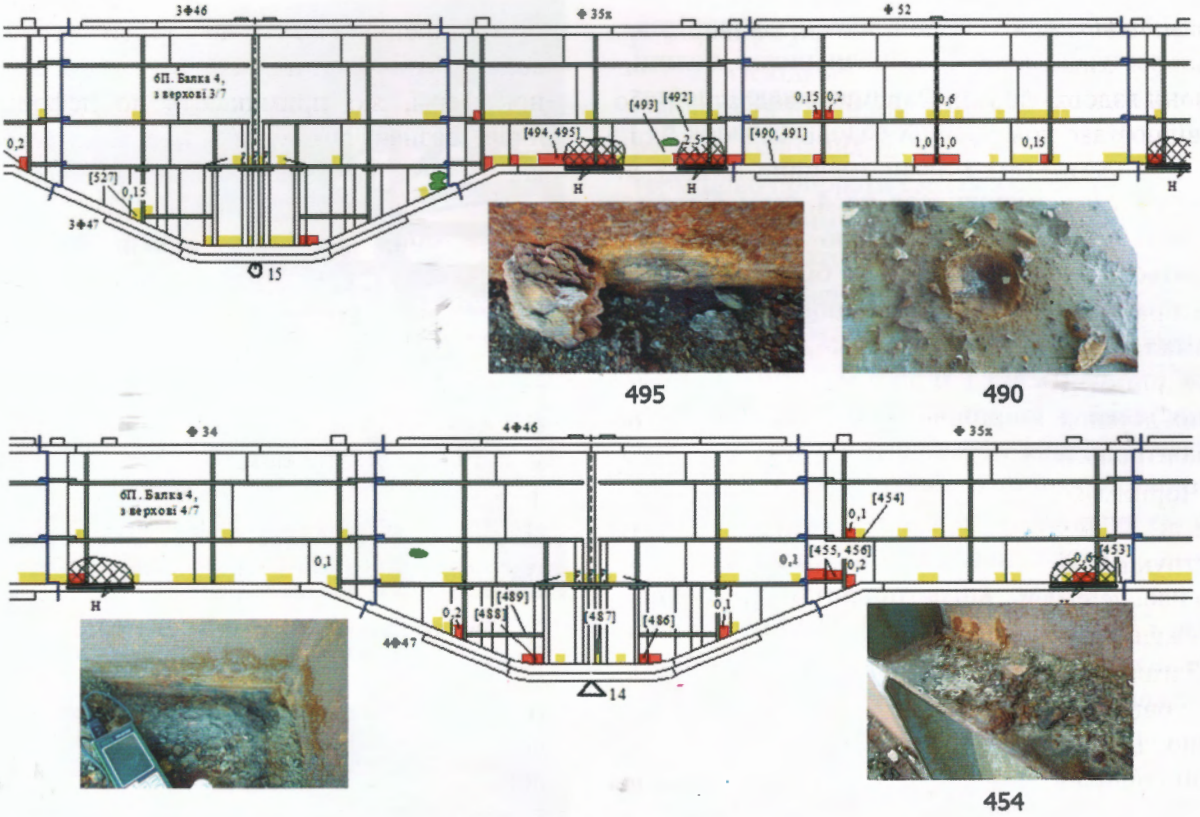


Рис. 10. Фрагмент зведених результатів контролю елементів балки №4, розташованої між 13–15 опорами

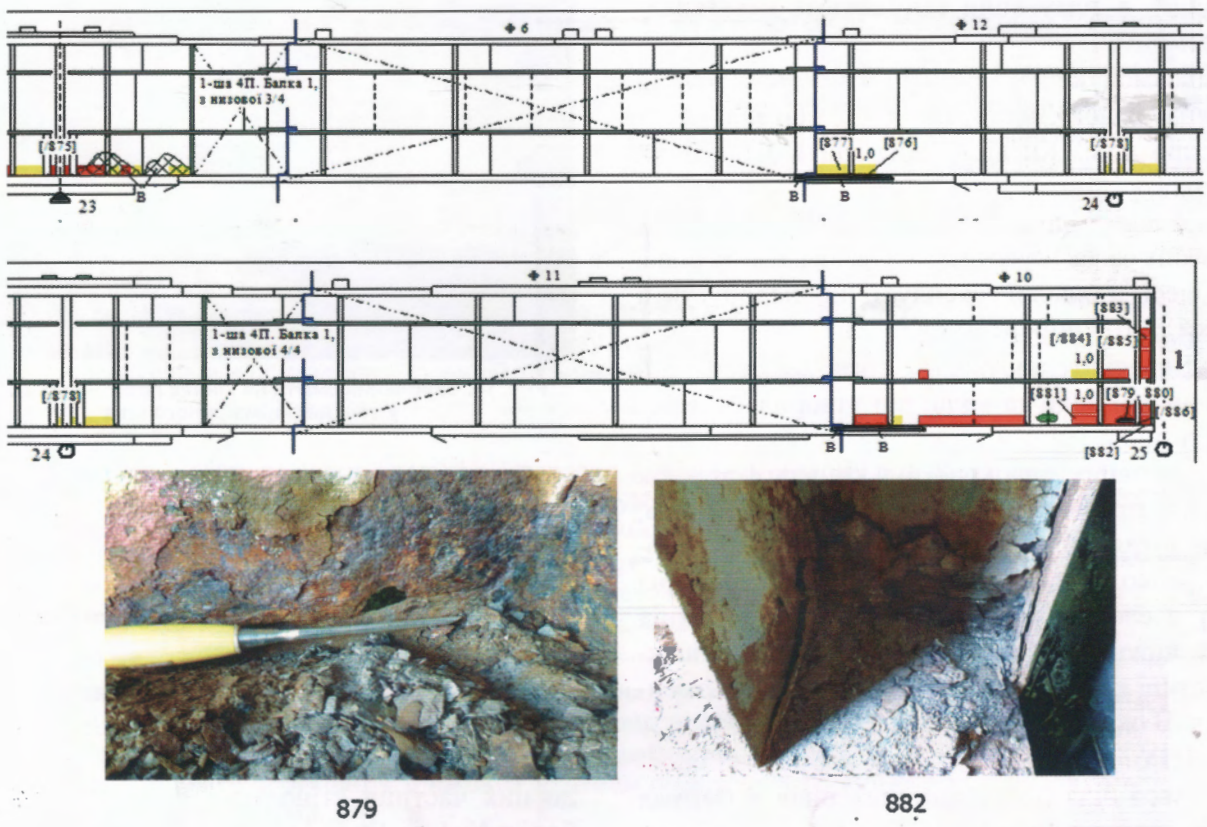


Рис. 11. Фрагмент зведених результатів контролю елементів балки № 4, розташованої між 21–25 опорами

Локальних, але місцями значних втрат товщини металу від корозії зазнали нижні полиці, нижні горизонтальні ребра та примикаючі до них частини стінок ферм крайніх головних балок № 1 та № 4. В результаті корозії товщина металу в окремих місцях зменшилася на 4 мм і більше. Найбільш пошкоджені корозією ділянки, які знаходяться по кінцях ферм та біля рухомих і нерухомих опор, а в шести прогонових балках ще і в місцях розташування вутів. Довжина цих ділянок становить від 1 м до 4 м, а ширина майже співставна з шириною навколошовної зони зварного з'єднання і становить 20 мм … 30 мм. Причиною корозійних пошкоджень є наявність сміття на нижньому горизонтальному ребрі та нижньому поясі балок, в якому накопичується вода, що протікає крізь покриття тротуарів, головним чином через щілини біля стовпів освітлення. Максимальна глибина корозійних пошкоджень у ряді випадків сягає 5 мм – 8 мм, що становить 40 % … 65 % від товщини стінки.

Найбільш катастрофічна ситуація склалася в фермах Ф10 та Ф15 головної балки № 1 та фермах Ф1 і Ф3 головної балки № 4. В цих фермах спостерігаються значні корозійні ураження (місцями наскрізні), а тому вони потребують невідкладного ремонту.

Підсумовуючи результати обстеження головних балок моста ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві, можна дійти наступних висновків:

1. Зварні з'єднання елементів ферм головних поздовжніх балок перебувають у задовільному стані. В процесі тривалої експлуатації недопустимі дефекти та тріщини втоми в них не утворилися.

2. Внаслідок протікання крізь деформаційні шви дощової води та води, що утворилася через танення снігу (містить солі) на металеві конструкції головних балок, метал кінцевих ділянок ферм, які примикають до деформаційних швів, зазнав локальних, але місцями значних корозійних ушкоджень. У результаті корозії товщина металу в елементах конструкції, а саме нижніх поясах, нижніх горизонтальних ребрах та в нижній частині стінок головних балок суттєво зменшилася. В окремих випадках на 40 % ... 50 %.

3. Найменші пошкодження від корозії спостерігаються біля деформаційних швів у фермах середніх головних балок № 2 та № 3, а більш масштабні втрати металу від корозії виявлені в фермах крайніх № 1 та № 4 головних балок.



Рис. 12. Скупчення сміття на крайній балці № 4 першої п'ятипрогонової споруди моста



Рис. 13. Скупчення сміття на кінцях прогонових споруд у зоні деформаційного шва

Останнє пов'язано з наявністю на нижньому горизонтальному ребрі та нижньому поясі цих балок значної кількості сміття, яке концентрує в собі вологу та не дає можливості просихати металу довгий час.

4. Локальних, але місцями значних втрат товщини металу від корозії зазнали нижні полиці, нижні горизонтальні ребра та примикаючі до них частини стінок ферм крайніх головних балок № 1 та № 4. Аналогічні ділянки головних балок № 2 та № 3 перебувають у задовільному стані.

5. Найбільш катастрофічна ситуація склалася в фермах Ф10 та Ф15 головної балки № 1 та фермах Ф1 і Ф3 головної балки № 4. В цих фермах спостерігаються значні корозійні ураження (місцями наскрізні), а тому вони потребують невідкладного ремонту.

6. Враховуючи існуючий на даний час технічний стан головних балок моста ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві, за умови виконання робіт, спрямованих на відновлення їх початкової несної здатності, головні балки можуть бути використані при реконструкції (реставрації) моста.

7. Оскільки основними причинами корозії є волога та наявність сміття на металевих конструкціях головних балок № 1 та № 4 необхідно: терміново прибрати сміття з балок; відновити під деформаційними швами лотки для стікання води; загерметизувати тротуарне покриття навколо стовпів освітлення. Якщо цього не зробити, процеси корозії будуть продовжуватись і відповідно технічний стан головних балок погіршиться.

[1] Отчет о заводском изготовлении элементов пролетных строений Киевского городского моста на заводе им. Молотова в г. Днепропетровске. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. – 1953 г.– 244 с.

[2] Отчет по теме «Монтажная сварка пролетных строений Киевского городского моста им. Е.О. Патона НАН УССР через р. Днепр». – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. – 1953. – 342 с.

[3] *Лобанов Л.М., Кирьян В.И.* Шестьдесят лет цельносварному мосту им. Е.О. Патона // Автоматическая сварка. – 2013 – № 12. – С. 35–40.

[4] *Шимановський О.В., Котлубей Д.О., Шалінський В.В.* Міст ім. Є.О. Патона – нинішній стан та перспективи // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2018. – № 1. – С .2–9.

[5] *Шимановський О.В., Котлубей Д.О., Шалінський В.В.* Аварійна ситуація на мосту ім. Є.О. Патона та заходи щодо її вирішення // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2018. – № 4. – С. 30–33.

Надійшла 02.03.2021 р.

Інформація

В Асоціації «Український центр сталевого будівництва»

23 лютого ц.р. відбулась IX Національна конференція учасників ринку сталевого будівництва. У роботі конференції взяли участь народний депутат України Олена Шуляк, перший заступник Міністра розвитку громад та територій України Василь Лозинський, представники організацій і підприємств - учасники Асоціації. У зв'язку з карантинними обмеженнями усім бажаючим була надана можливість спостерігати за роботою конференції онлайн.

Відповідно до порядку денного на конференції було розглянуто 3 блока питань.

- ✓ Блок № 1
  Аналітика сегментів сталевого будівництва: приводи для оптимізму, у якому були висвітлені основні тренди ринку сталевої продукції, приведені результати аналізу ринку будівельних металоконструкцій та ринку металу з покриттям, а також очікувані наслідки для галузі від змін у Законодавстві України.
- ✓ Блок № 2
  Найкращі практики роботи галузі в інтересах замовника, у якому розглянуті питання щодо шляхів підвищення якості проєктування, застосування одностадійного проєктування металевих конструкцій та його переваги для замовника, очікувані зміни в процесах проєктування і проведення робіт із вогнезахисту конструкцій, екологічна доцільність виконання монтажу каркаса будівлі паралельно з улаштуванням огорож, а також приведені приклади результативної співпраці девелопера та Асоціації «Український центр сталевого будівництва».
- ✓ Блок № 3
  Ключові проблеми галузі і шляхи їх вирішення, призначений ознайомленню учасників конференції зі змінами у сфері нормування і стандартизації галузі сталевих конструкцій, використанням стандартного складського сортаменту металопрокату як необхідного інструмента для замовників і проєктантів, а також із шляхами підвищення експертного потенціалу галузі сталевого будівництва.

Після завершення основних доповідей була проведена дискусійна панель із всебічного розгляду широкого кола питань з підвищення рівня конкурентоспроможності галузі сталевого будівництва.

НАСТАНОВА З ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Стаття висвітлює передумови розроблення та основні положення першої редакції державного стандарту України «Конструкції сталеві будівельні. Настанова з оцінювання якості конструктивних рішень». Розглядається стан проєктування металевих конструкцій в Україні. Висловлюється думка про те, що на якість проєктування будівельних сталевих конструкцій позитивно вплине стандарт, який визначатиме набір якісних і кількісних показників, що багатосторонньо характеризують технічний і економічний рівень конструктивних рішень. Серед них якісні характеристики проєкту, показники середньозваженого використання несної здатності елементів конструкції, середній рівень міцності сталі, частка вітчизняного прокату у загальних витратах металу, питомі показники цих витрат. Розглядається декілька варіантів застосування стандарту. Перевага віддається варіанту, в якому показники якості визначаються авторами проєкту у процесі його створення. Наголошується на придатності стандарту для комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень.

The article highlights development background and main provisions of the first edition of the State Standard of Ukraine «Building steel structures. Guidelines for quality estimate of structural designs». The state of the metalwork design process in Ukraine. The opinion is expressed that the quality of building steel structures design will be positively affected by the standard, which shall determine a set of qualitative and quantitative indicators that multilaterally characterize the technical and economic level of design solutions. Among them are the qualitative characteristics of the design, indicators for weighted average use of the bearing capacity of structural elements, the steel strength average level, the share of domestic rolled products in total metal consumption, specific indicators of these consumption. Several options for applying the standard are considered. Preference is given to the option in which the quality indicators are determined by the authors of the project in the process of its creation. The conclusion is made that the standard is suitable for a computer decision support system.

Ключові слова: конструкції сталеві будівельні, якість конструктивних рішень, державний стандарт України, коефіцієнт використання.



В.М. Гордеєв
заступник генерального директора
з наукової роботи
ТОВ «Укрінсталькон
ім. В.М. Шимановського»,
д.т.н., професор

Вступ. Будівельна діяльність в Україні регламентується державними будівельними нормами (ДБН) та державними стандартами України (ДСТУ) [1]. Будівельні норми – це документ технічного характеру, що встановлює мінімальні вимоги до об'єкта будівельної діяльності. Стандарт – це технічний документ, схвалений визнаною організацією, який встановлює для загального та багаторазового застосування певні правила та містить вказівки. Дотримання норм є обов'язковим, дотримання стандартів – добровільним.

Правильно побудована система норм та стандартів позитивно впливає на культуру проєктування і сприяє створенню будівельних об'єктів, безпечних для життя і здоров'я людей, та формуванню і підтриманню сталого навколишнього середовища.

Деякі аспекти проєктування металевих конструкцій. Норми та стандарти проєктування будівельних металевих конструкцій [2–8] орієнтовані, в основному, на технічні питання, які пов'язані з надійністю та безпекою об'єктів будівництва. З появою ДБН «Науково-технічний супровід будівельних об'єктів» [9] набуло більшої актуальності впровадження у проєктування металевих конструкцій досягнень науки, техніки і нових технологій. Проте дотримання вимог щодо раціонального використання природних, енергетичних, трудових ресурсів або охорони довкілля виконується факультативно і без належного контролю.

Тривалий час будівельні норми містили в собі як вимоги міцності, стійкості або жорсткості конструкцій, так і вимоги щодо недопущення великих запасів. Так у нормах проєктування сталевих конструкцій [10], які діяли в Україні до 2011 року, була вимога, що обмежувала відносне недонапруження поперечних перерізів рівнем 5 %. У наступних нормах ця вимога була усунена, оскільки вона трактувалася як сугубо економічна.

У теперішній час культура проєктування сталевих конструкцій не досить висока. Замовники проєктів з метою заощадження коштів шукають дешевого проєктувальника і знаходять його, здебільшого, серед малокваліфікованих. У результаті з'являються робочі креслення, які завдають багато проблем і заводчанам, і монтажникам, а в гіршому випадку конструкція виявляється непридатною до використання. Більш кваліфіковані проєктувальники працюють за принципом «які гроші – такий товар» і видають спрощені конструктивні рішення з великими запасами. Питання щодо економічності проєкту, раціонального використання природних, енергетичних, трудових ресурсів, охорони довкілля тощо залишаються поза увагою.

Мотиви розроблення стандарту. З метою підвищення культури й якості проєктування металевих конструкцій Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського за підтримки Українського центру сталевого будівництва розробив першу редакцію державного стандарту України «Конструкції сталеві будівельні. Настанова з оцінювання якості конструктивних рішень». Цей документ визначає стандартизований набір показників, які всебічно характеризують якість конструктивних рішень запроєктованих будівельних металевих конструкцій і мають бути надані замовнику додатково до робочих креслень марки КМ (надалі проєкт КМ) або до іншої подібної проєктної документації за додаткові кошти. Стандартизований набір показників може конкретизувати явні та розкрити приховані характеристики якості конструктивних рішень і дозволити замовнику, підряднику, виготовлювачу, монтажнику або іншим зацікавленим особам оцінити проєкт зі своєї точки зору.

Автори стандарту вбачають принаймні три шляхи його використання.

1. *Незалежне оцінювання проєкту КМ.* У цьому випадку зацікавлена сторона (забудовник, підрядник або хтось інший) замовляє сторонньому експертові оцінку якості проєкту КМ і надає йому для цього креслення марки КМ, розрахунки та інформацію про проєктну організацію, яка виконала проєкт. Тоді цей експерт, користуючись стандартом як настановою до виконання експертизи, визначає якісні і кількісні показники проєкту КМ і на їхній основі оцінює конструктивні рішення.

2. *Авторське оцінювання проєкту КМ.* У цьому випадку замовник проєкту КМ доручає проєктувальнику за додаткову плату додатково до проєкту КМ надати інформацію про конструктивні рішення відповідно до даного стандарту. Ця інформація сприяє самоконтролю виконавця і є основою для оцінювання якості конструктивних рішень замовником.

3. *Підтвердження ефективності доопрацювання проєкту КМ.* Використовується як завдання для поглибленого проопрацювання проєкту та для отримання стандартизованих звітних матеріалів у випадку доопрацювання або коригування проєкту КМ з метою його покращення за додаткові кошти.

Стандарт рекомендує авторське визначення показників якості. Тоді трудомістськість виконання цієї роботи буде мінімальною, а користь від її виконання максимальною. Авторське визначення стандартизованого набору показників має ряд переваг. У першу чергу, автори проєкту добре знають організацію, де вони працюють, і у них немає потреби її вивчати. Вони також знають завдання на проєктування, всі деталі проєктування і всі конструктивні рішення. Важливим є і те, що кількісні показники якості конструктивних рішень базуються на аналізі специфікації металопрокату. Якщо заздалегідь знати номенклатуру цих показників, то, складаючи специфікацію, можна в один захід отримати потрібні показники.

Користь від авторського виконання цієї роботи полягає в тому, що надати показники, які негативно характеризують власний проєкт, немає ніякого сенсу, навпаки з'являється стимул, щоб конструкція була запроєктована якісно. Тим більше, надання показників оплачується додатково. Частину цих коштів можна використати для більш детального пророблення проєкту. І, нарешті, є змога усунути помічені недоліки, не витрачаючи додаткового часу. Таким чином, авторське виконання можна розглядати як механізм самоконтролю і саморегулювання.

Цю ідею можна розвинути далі. Відомо, що заощаджувати кошти треба не на проєктних роботах, а на будівельному об'єкті. Є сенс переплатити проєктувальнику, але отримати від нього хороший ретельно виконаний проєкт. Адже зайва гривня, вкладена у проєкт, за сприятливих обставин на 20–30 гривень зменшує вартість конструкцій. Якщо проєктувальнику поставити завдання розробити проєкт підвищеної якості, то його звіт, виконаний відповідно до стандарту, дозволить оцінити конструктивні рішення цього проєкту.

Основні положення стандарту. Стандарт призначений для оцінювання якості конструктивних рішень сталевих будівельних конструкцій на основі проєктів КМ для будинків, споруд та об'єктів інженерно-транспортної інфраструктури, в якому форму та розміри поперечних перерізів конструкційних елементів визначають розрахунковим шляхом або на основі технічної документації, відмінної від проєктів КМ, якщо ця документація має у своєму складі розрахунки для визначення поперечних перерізів конструкційних елементів, відомість елементів та специфікацію металопрокату.

В основу оцінювання покладено інтерактивний принцип, у відповідності до якого якість конструктивних рішень визначає людина (особа, яка приймає рішення, або експерт), користуючись інформацією, встановленою стандартом. За результатами оцінювання можуть бути надані рекомендації щодо перегляду виду прокату, поперечних перерізів, товщин, виду та міцності сталі для елементів сталевих конструкцій.

Конструктивна схема і розміри будинку, споруди чи об'єкта інженерно-транспортної інфраструктури перегляду не підлягають.

Стандарт встановлює такий склад інформації, яку надають для оцінювання якості конструктивних рішень на основі проєкту КМ:

- якісні характеристики;
- кількісні характеристики;
- додаткові витрати металу;
- питомі показники витрат металу.

Ця інформація має міститися у звіті з оцінювання якості конструктивних рішень проєкту КМ, що розглядається.

Якісні характеристики. Якісні характеристики визначаються на основі загальних даних про автора проєкту КМ, про замовника, про об'єкт будівництва та шляхом вивчення і аналізу безпосередньо проєкту КМ. Вони наводяться у звіті описово за чотирма розділами.

Розділ 1. Принципові конструктивні рішення.

У цьому розділі мають бути висвітлені:

- принципові конструктивні рішення і їхня відповідність призначенню;
- вжиті заходи щодо покращення конструктивних рішень (варіантне проєктування, використання оптимізаційних методів тощо);
- ступінь уніфікації елементів конструкції та її деталей;
- врахування у проєкті КМ технології виготовлення конструкцій;
- врахування у проєкті КМ методу транспортування конструкцій;
- врахування у проєкті КМ методу монтажу конструкцій;
- врахування у проєкті КМ захисту конструкцій від корозії;
- врахування у проєкті КМ вогнезахисту конструкцій;
- врахування у проєкті КМ архітектурно-планувальних рішень та технологічного призначення будівлі;
- врахування концепції сталого розвитку, адаптивності, можливості реконструкції, мобільності;
- інші питання стосовно принципових конструктивних рішень.

Розділ 2. Автоматизація розрахунків.

У цьому розділі потрібно описати:

- програмне забезпечення для виконання будівельно-механічних розрахунків;
- вид розрахункової схеми;
- типи елементів розрахункової схеми;
- ступінь деталізації конструкції та кількісні характеристики розрахункової схеми;
- програмне забезпечення для перевіряння міцності, стійкості та експлуатаційної придатності елементів конструкції;
- інші питання стосовно автоматизації розрахунків.

Розділ 3. Автоматизація конструювання.

У цьому розділі потрібно описати:

- програмне забезпечення, яке використовується для підбирання поперечних перерізів або товщин елементів та деталей металевих конструкцій (зокрема, з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності);
- програмне забезпечення, яке використовують для автоматизації конструювання;
- програмне забезпечення, яке використовують для виготовлення креслень;
- ступінь застосування 3D-технологій та BIM-технологій;
- інші питання стосовно автоматизації конструювання.

Розділ 4. Система управління якістю.

У цьому розділі потрібно описати:

- систему та організацію перевіряння розрахунків та креслень;
- систему довгострокового зберігання креслень і розрахунків;
- систему управління якістю проєктування;
- інші питання стосовно системи управління якістю.

Кількісні характеристики. Для оцінювання конструктивних рішень стандарт передбачає визначення та використання таких кількісних характеристик:

- теоретичної маси металу за проєктом M;
- частки металу вітчизняного виробника D;
- середньозваженої міцності металу R;

- середньозваженого коефіцієнта використання без урахування надбавок на уніфікацію *K*;
- середньозваженого коефіцієнта використання з урахуванням надбавок на уніфікацію *Ku*.

У завданні на виконання оцінювання якості конструктивних рішень можуть бути визначені додаткові кількісні характеристики, наприклад приєднана використана енергія, приєднані викиди вуглецю тощо.

Кількісні характеристики визначаються на основі комплекту креслень, відомості елементів, специфікації металопрокату, механічних розрахунків конструкцій, розрахунків несної здатності та експлуатаційної придатності елементів металевих конструкцій та їх деталей, а також з використанням номенклатури вітчизняного виробництва металопрокату. Кількісні характеристики визначаються для кожного елемента конструкції * і для конструкції в цілому.

Основою для визначення кількісних характеристик є специфікація металопрокату з проєкту КМ, якої треба суворо дотримуватися. Кількісна характеристика – теоретична маса металу за проєктом *M* – точно відповідає масі металу за специфікацією. Визначення інших кількісних характеристик потребує більш детальної інформації про конструкцію, ніж та, яку містить специфікація металопрокату. Тому, крім специфікації, потрібно використовувати відомість елементів, щоб деталізувати конструкцію до рівня деталей її елементів, проаналізувати склад металу, виробника прокату і коефіцієнти використання для кожної з деталей, а потім узагальнити цю інформацію до рівня кожного з елементів конструкції, до рівня групи уніфікованих елементів і до рівня проєкту КМ в цілому.

Частка металу вітчизняного виробника *D* для елемента конструкції і для конструкції в цілому обчислюється на основі номенклатури вітчизняного виробництва металопрокату.

Наступні три показники названі середньозваженими. Середньозважений показник *pa* – це числова характеристика сукупності довільних об'єктів, кожен з яких характеризується числовим показником *p* і ваговим коефіцієнтом $m > 0$. Середньозважений показник визначають так:

$$pa = pm/M; \quad pm = \Sigma p \cdot m; \quad M = \Sigma m, \qquad (1)$$

де сума поширюється на всі об'єкти сукупності.

У нашому випадку об'єктами є основні деталі металевої конструкції, які є складовими частинами специфікації металопрокату у проєкті КМ, а ваговими коефіцієнтами – маса цих деталей.

Середньозважену міцність металу *R* визначають за допомогою показника міцності для кожної деталі у Н/мм^2.

Два наступні середньозважені показники *K* та *Ku* визначають за допомогою коефіцієнтів використання. Поняття коефіцієнт використання стосується розрахунків і потребує пояснень. Як правило, розрахунки закінчуються перевіркою розрахункових нерівностей (умови міцності, стійкості, жорсткості тощо), порушення яких є неприпустимим. Для визначення коефіцієнтів використання потрібні нормовані розрахункові нерівності, тобто нерівності, зведені до форми

$$K \le 1, \text{ де } K > 0. \qquad (2)$$

Коефіцієнт використання – це максимальне значення лівої частини нормованих розрахункових нерівностей *K*, вибране з набору розрахункових нерівностей, пов'язаних із даною деталлю конструкції.

Зауважимо, що з метою уніфікації один і той самий елемент з усіма своїми деталями повторюється в конструкції деяку кількість (для конкретики – *n*) разів. Експлуатаційну придатність кожного екземпляра деталі у проєкті КМ перевіряють розрахунками, в результаті чого для кожної деталі з'являється певна кількість нормованих розрахункових нерівностей такого типу:

$$K_{pi} \le 1 \quad (i = 1,\ldots,n), \qquad (3)$$

де *p* – вид перевірки (за міцністю, стійкістю, гнучкістю тощо); *i* – номер екземпляра. Деталь вважають експлуатаційно придатною, якщо всі ці нерівності задовольняються. За цими нерівностями для кожного екземпляра деталі необхідно визначити коефіцієнт використання, обираючи з усіх видів перевірки максимальне значення лівої частини нормованої розрахункової нерівності

$$K_i = \max_p K_{pi} \quad (i = 1,\ldots,n). \qquad (4)$$

Якщо для деякої деталі не вдалося встановити жодної нерівності (наприклад, це конструктивна деталь), слід прийняти умовно $K_i = 0{,}5$. Потім треба знайти максимальний та середній коефіцієнти використання для даної деталі:

* Тут і далі: елемент конструкції – це виділена у проєкті КМ частина металевої конструкції, позначена маркою елемента на схемі розташування елементів металевих конструкцій або на аркуші загального виду.

$$K = \max_i K_i; \quad Ku = \sum_i K_i / n, \qquad (5)$$

де пошук максимуму і підсумовування виконують з урахуванням усіх n екземплярів даної деталі. Таким чином знаходять коефіцієнт використання без урахування надбавок на уніфікацію K і коефіцієнт використання з урахуванням надбавок на уніфікацію Ku для множини уніфікованих елементів конструкції. Кількісні характеристики для конструкції в цілому визначають як відповідні середньозважені значення цих коефіцієнтів.

Стандарт може бути використаний і для визначення кількісних характеристик для частини металевих конструкцій проєкту КМ. Щоб отримати кількісні характеристики для частини металевих конструкцій, потрібно скористатися відомістю елементів і специфікацією для цієї частини металевих конструкцій.

Основою для обчислення кількісних характеристик можуть бути розрахунки, виконані автоматизованим способом, ручним способом або інакше.

Додаткові витрати металу. Середньозважені коефіцієнти використання без урахування надбавок на уніфікацію K та з урахуванням надбавок на уніфікацію Ku дають змогу оцінити додаткові витрати металу для кожного з елементів конструкції, групи уніфікованих елементів і для конструкції в цілому.

Додаткові витрати металу для елемента конструкції або конструкції в цілому, без урахування витрат металу на уніфікацію елементів конструкції та їх деталей, можуть бути оцінені коефіцієнтом

$$Z = 1 - K. \qquad (6)$$

Цей коефіцієнт враховує не тільки витрати, зумовлені нерегельним призначенням перерізів елементів конструкції, але і витрати, викликані дискретністю сортаменту металопрокату.

Додаткові витрати металу, що виникли у зв'язку з уніфікацією елементів конструкції та їх деталей для групи уніфікованих елементів і для конструкції в цілому, можуть бути оцінені коефіцієнтом

$$Zu = K - Ku. \qquad (7)$$

Цей коефіцієнт враховує не тільки витрати, зумовлені уніфікацією елементів конструкції та їх деталей, але і витрати, викликані дискретністю сортаменту металопрокату.

Додаткові витрати металу в одиницях маси визначаються як добуток відповідного коефіцієнта на масу елемента конструкції, масу групи уніфікованих елементів або масу конструкції в цілому.

На жаль, відділити витрати, викликані дискретністю сортаменту металопрокату, від витрат, обумовлених нерегельним призначенням перерізів елементів, не вдається.

Питомі показники витрат металу. Наступною характеристикою конструктивного рішення є питомі показники витрат металу. Це – відношення маси металу за проєктом до ключового показника, який характеризує об'єкт будівництва.

Ключовим показником може бути:

- корисна площа – для будівель;
- прогін або довжина – для лінійних споруд;
- корисний об'єм – для резервуарів чи газгольдерів;
- кількість посадкових місць для глядацьких залів та стадіонів;
- кількість паркомісць – для паркінгів;
- потужність – для електростанцій;
- інші показники.

Для об'єкта можна визначити декілька питомих показників. Питомі показники витрат металу для усталених типів об'єктів будівництва відомі спеціалістам. Порівняння показників, отриманих за цим стандартом, з такими самими показниками для вже реалізованих об'єктів є хорошим критерієм якості конструктивних рішень.

Звіт. Результати оцінювання якості конструктивних рішень повинні бути оформлені у вигляді звіту. У звіті мають бути описані якісні характеристики, наведені та роз'яснені кількісні характеристики, додаткові витрати металу (в абсолютному і відносному вимірах) і питомі показники витрат металу, виконана оцінка якості конструктивних рішень і надані рекомендації щодо використання або коригування проєкту КМ.

Висновки.

У стандарті описано процедуру оцінювання якості конструктивних рішень металевих конструкцій на основі проєкту КМ. Для того, щоб скористатися технічною документацією, відмінною від проєкту КМ (наприклад, закордонною), якщо в ній не вистачає деяких потрібних даних, цю документацію треба доопрацювати до рівня, еквівалентного проєкту КМ, а потім скористатися цим стандартом.

Конкретну мету оцінювання якості конструктивних рішень на основі проєкту КМ цей стандарт не встановлює. Звіт з оцінювання якості конструктивних рішень може бути використаний для їх оцінювання за альтернативними критеріями, оскільки він містить у собі великий набір якісних і кількісних характеристик, що дає можливість спеціалісту виконати відповідне оцінювання.

Склад інформації, зумовлений цим стандартом, і рекомендації для її визначення можуть бути використані не тільки для оцінювання якості конструктивних рішень на основі конкретних проєктів КМ, але і для розроблення комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень.

[1] ДБН А.1.1-1:2009 Система нормування та стандартизації у будівництві. Основні положення. – К.: Мінрегіон України, 2013. – 13 с.

[2] ДБН В.1.2-14:2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. – К.: Мінрегіон України, 2018. – 30 с.

[3] ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи. Норми проектування – К.: Мінбуд України. 2006. – 75 с.

[4] ДБН В.2.3-26:2010 Мости та труби. Сталеві конструкції. Правила проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 265 с.

[5] ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 199 с.

[6] ДСТУ Б А.2.4-43:2009 Правила виконання проектної та робочої документації металевих конструкцій. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с.

[7] ДСТУ Б А.2.4-44:2013 Настанова з розроблення проектної та робочої документації металевих конструкцій. Креслення конструкцій металевих деталювальні (КМД). – К.: Мінрегіон України, 2013. – 22 с.

[8] ДСТУ Б В.2.6-177:2011 Конструкції будівельні сталеві. Умовні позначення (марки). – К.: Мінрегіон України, 2012. – 7 с.

[9] ДБН В.1.2-5:2007 Науково-технічний супровід будівельних об'єктів. – К.: Мінрегіонбуд України, 2007. – 16 с.

[10] СНиП II-23-81* Стальные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР. 1990. – 96 с.

Інформація

У Технічному комітеті стандартизації № 301

З метою удосконалення нормативної бази у галузі будівництва за рахунок впровадження сучасних цифрових технологій (BIM) Українським інститутом сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського у процесі гармонізації європейських та міжнародних стандартів завершений переклад наступних нормативних документів:

- ✓ ДСТУ EN ISO 19650-3:2020 Організація та оцифрування інформації щодо будівель і споруд включно з будівельним інформаційним моделюванням (BIM). Управління інформацією з використанням будівельно-інформаційного моделювання. Частина 3. Етап експлуатації.
- ✓ ДСТУ EN ISO 19650-5:2020 Організація та оцифрування інформації щодо будівель і споруд включно з будівельним інформаційним моделюванням (BIM). Управління інформацією з використанням будівельно-інформаційного моделювання. Частина 5. Застосування методів захисту до управління інформацією.
- ✓ ДСТУ ISO 12006-2:2020 Зведення будівель. Структура інформації про об'єкти будівництва. Частина 2. Основні принципи класифікації.
- ✓ ДСТУ ISO 15686-1:2020 Будівлі та об'єкти нерухомого майна. Планування строку експлуатації. Частина 1. Основні принципи та методологія.
- ✓ ДСТУ ISO 22263:2020 Структура інформації про об'єкти будівництва. Основи управління інформацією про проєкт.
- ✓ ДСТУ ISO 29481-1:2020 Інформаційні моделі будівель. Настанова з доставляння інформації. Частина 1. Методологія та формат.
- ✓ ДСТУ ISO 16757-1:2020 Структури даних електронних каталогів виробів для інженерних систем та обладнання будівель. Частина 1. Концепції, архітектура та модель.
- ✓ ДСТУ ISO/TS 12911:2020 Структура стандартів будівельного інформаційного моделювання (BIM).

Переклад тексту міжнародних і європейських стандартів стане в нагоді великому загалу проєктувальників, конструкторів, спеціалістів підприємств будіндустрії та служб замовників в процесі спорудження і експлуатації об'єктів промислового та соціального призначення, а також складних інженерних споруд.

УДК 624.014:624.21

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД

Проведено аналіз методів моделювання металевих гофрованих конструкцій транспортних споруд. Викладено методи заміни гофрованої ізотропної оболонки гладкою ортотропною оболонкою, метод розбиття конструкції сіткою стержневих елементів та метод моделювання металевих гофрованих конструкцій скінченними елементами. Наведено аналітичні залежності для визначення геометричних параметрів металевих гофрованих конструкцій. Проведено розрахунок напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій труби методом скінченних елементів у програмному комплексі Plaxis.

The analysis of methods of modeling of a metal corrugated cover of designs of transport constructions is carried out. Methods for replacing a corrugated isotropic shell with a smooth orthotropic shell, a method for breaking a structure with a grid of rod elements, and a method for modeling corrugated metal structures with finite elements are described. Analytical dependences for determination of geometrical parameters of metal corrugated constructions are given. The stress-strain state of corrugated metal structures of the pipe by the finite element method in the Plaxis software package is calculated.

Ключові слова: металеві гофровані конструкції, труба, напруження, прогини, ортотропна оболонка, метод скінченних елементів, еквівалентні сили.



А.М. Онищенко
завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національного транспортного університету, д.т.н., доцент



В.В. Ковальчук
професор кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національного транспортного університету, д.т.н., доцент



О.В. Федоренко
виконувач обов'язків генерального директора – заступник генерального директора з розвитку виробництва комунальної корпорації «Київавтодор»



Ю.Є. Ковальчук
аспірант Національного університету «Львівська політехніка»

Споруди з металевих гофрованих конструкцій (далі МГК) мають ряд переваг у порівнянні з аналогічними залізобетонними та бетонними спорудами. Вони потребують мінімальних фінансових витрат, невеликих витрат матеріалів та трудовитрат на будівельному майданчику, що забезпечує прискорення темпів будівництва цих споруд. Швидкість будівництва споруд із МГК у 5–7 разів вища у порівнянні з використанням бетонних конструкцій, а витрати на спорудження об'єктів до 30 % – 40 % є нижчими за аналогічні залізобетонні споруди [1, 2]. Тому металеві гофровані конструкції набули широкого застосування у транспортному будівництві у вигляді малих мостів, водопропускних труб та транспортних тунелів.

Постановка проблеми. Основним недоліком споруд із металевих гофрованих конструкцій, при збільшенні поперечних перетинів, залишається низька експлуатаційна надійність, зумовлена різними факторами впливу [3, 4, 5]. До них можна віднести специфіку роботи споруд із МГК, яка визначається характером взаємодії металевої гофрованої оболонки із ґрунтовою засипкою, забезпечення необхідних геометричних параметрів і певних габаритів при обмеженій висоті насипу залізничної колії чи автомобільної дороги. При неякісному ущільненні ґрунтової засипки можуть виникати нерівномірні осідання насипу над металевими гофрованими конструкціями, деформації укріплення укосів насипу та спотворення форми поперечного перерізу споруд із МГК. Втрата форми споруди із МГК негативно позначається на експлуатаційних властивостях залізничних та автомобільних доріг, до складу яких входить споруда, через підвищену динамічну дію рухомих транспортних одиниць.

Створення та вдосконалення методів розрахунку металевих гофрованих конструкцій у ґрунтовому середовищі та їх впровадження у практику будівництва відбувалось паралельно. У працях [4, 6, 7] зазначено, що більш достовірні результати розрахунків напружено-деформованого стану

металевих гофрованих конструкцій при взаємодії із ґрунтовою засипкою можна отримати за допомогою методу скінченних елементів. Проте не всі програми скінченно-елементного моделювання мають можливість коректного задання геометричних параметрів металевого гофрованого профілю конструкції та граничних умов на поверхні «конструкція–ґрунтова засипка». У зв'язку із цим доводиться задавати еквівалентні фізико-механічні параметри металевого гофрованого листа конструкції. Проте таких досліджень не проведено, що потребує додаткових наукових досліджень із врахуванням дії динамічного навантаження від транспортних засобів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одним із відкритих питань залишається пошук методів моделювання металевої гофрованої оболонки конструкції. У світовій практиці є три підходи до моделювання гофрованої оболонки [5, 8, 9]. Перший підхід ґрунтується на заміні гофрованої ізотропної оболонки гладкою ортотропною із перерахунком її фізико-механічних параметрів (рис. 1).

Механічні характеристики ізотропного матеріалу гофрованої оболонки, такі як модуль Юнга E та коефіцієнт Пуассона v замінюють механічними характеристиками по двох координатах оболонки E_x, E_y, v_x, v_y. Розрахунки проводять за формулами:

$$E_x = E\frac{A_a}{a\cdot h};\quad E_y = E\left(\frac{t}{h}\right)^3;\quad v_x = v;$$
$$v_y = v\frac{E_y}{E_x};\quad h = \sqrt{12(1-v_x^2)\frac{I_a}{A_a}}\ , \qquad (1)$$

де I_a, A_a – відповідно момент інерції та площа поперечного перерізу конструкції, віднесені до довжини хвилі a гофри конструкції; t – висота гофри; h – товщина ортотропної оболонки; R – радіус кривини серединної поверхні оболонки (див. рис. 1).

Другий підхід полягає у заміні гофрованої оболонки сіткою стрижневих елементів (рис. 2) із накладанням певних кінематичних умов [9]. Стрижні розташовуються по коловій координаті та вздовж твірної циліндра. Геометричні характеристики поперечних перерізів стрижнів визначаються із наступних співвідношень:

$$A_x = \frac{A_0}{a}a_y;\ I_x = \frac{I_a}{a}a_y;\ A_y = \frac{a_x a_y}{\pi R^3}\left(\frac{t}{R}\right)^3;$$
$$I_y = \frac{a_x a_y}{12\pi r^3}r^3. \qquad (2)$$

Третій підхід передбачає побудову гофрованої оболонки з її наступним скінченно-елементним розбиттям (рис. 3). Визначення напружено-деформованого стану МГК можна проводити в рамках плоскої та об'ємної математичних моде-

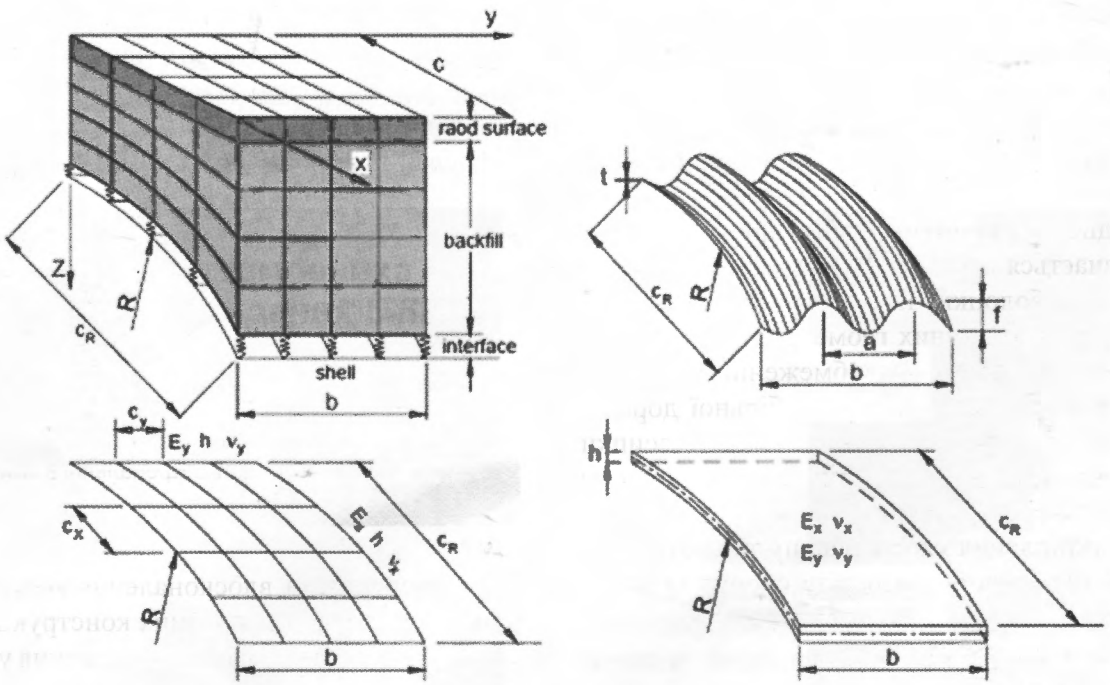


Рис. 1. Задання металевих гофрованих конструкцій двовимірними елементами із заміною гофрованої ізотропної оболонки гладкою ортотропною [8]

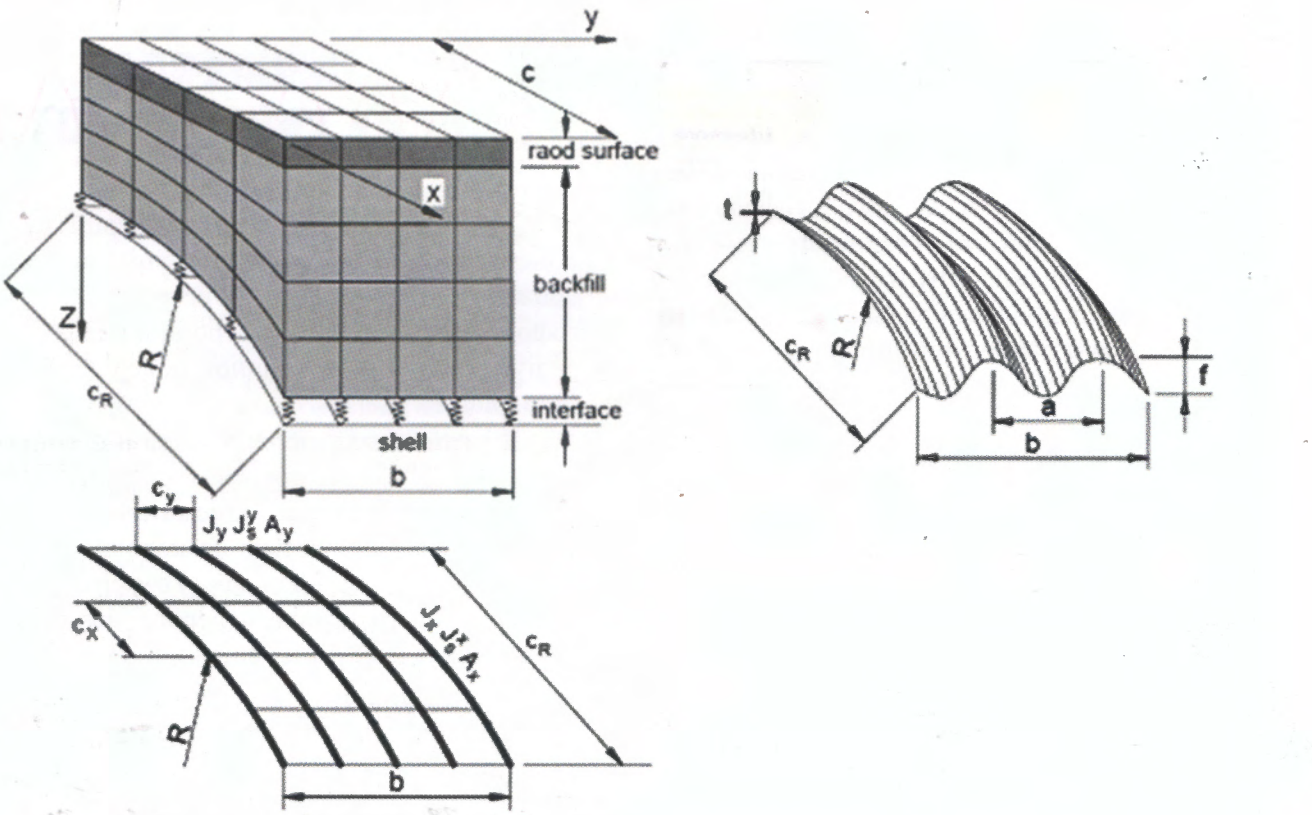


Рис. 2. Задання металевих гофрованих конструкцій сіткою стрижневих елементів [8]

лей задачі [10–14]. У плоскій задачі (див. рис. 1) переріз конструкції моделюється криволінійним стрижнем (одновимірним елементом), а ґрунтова засипка – плоскими елементами. Перевагою такого підходу є швидка підготовка моделі та порівняно невелика кількість скінченних елементів [14]. Недоліком зазначеної моделі є неможливість врахування геометричних параметрів гофр конструкції та ґрунтової ущільнювальної засипки.

Використання тривимірної моделі (рис. 4) дає кращі результати, у порівнянні із двовимірною, стосовно розподілу внутрішніх зусиль у металевій конструкції, однак вимагає для дискретизації об'єкта великої кількості скінченних елементів, а відтак і великих затрат часу для підготовки геометричної моделі задачі [15].

При тривимірному моделюванні металевих гофрованих конструкцій ґрунтову обойму розби-

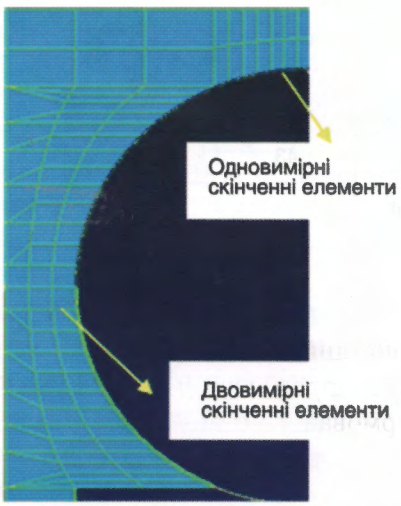


Рис. 3. Плоска скінченно-елементна модель споруди із металевих гофрованих конструкцій

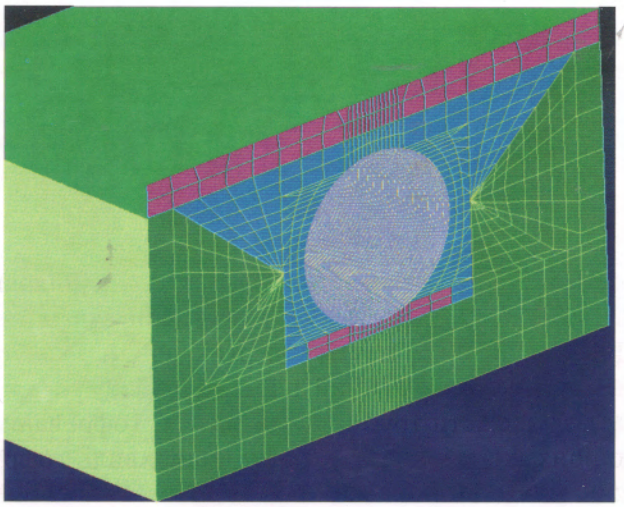


Рис. 4. Тривимірна скінченно-елементна модель споруди із металевих гофрованих конструкцій

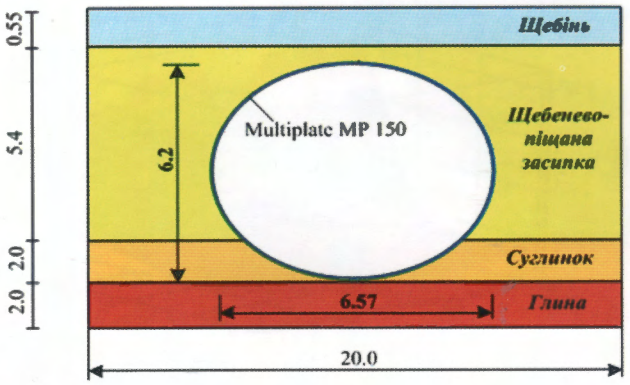


Рис. 5. Геометрична модель труби із металевих гофрованих конструкцій

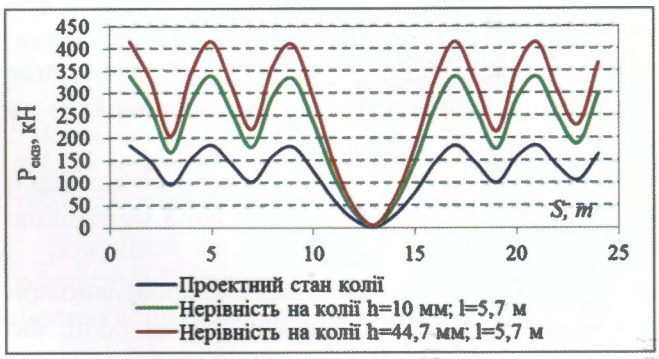


Рис. 6. Варіантний розрахунок величин еквівалентних сил від локомотива 2М62 у залежності від параметрів геометричних нерівностей на колії

вають сіткою тривимірних, а металеві конструкції – двовимірними скінченними елементами. Отримані числові результати є найбільш вірогідними і максимально наближені до натурних випробувань. Водночас підготовка моделі вимагає великого обсягу часу, високої кваліфікації дослідника та значних ресурсів обчислювальної техніки [8, 14].

Також слід зазначити, що точність і вірогідність отриманих числових результатів напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій залежить від низки факторів, зокрема: розмірності моделі задачі, прийнятих моделей матеріалів ґрунту і конструкції, крайових умов на межі контакту «конструкція–ґрунт», «ґрунт–ґрунт» та на зовнішній поверхні ґрунтової обойми, величини згущеності сітки скінченних елементів, задання достовірних фізичних параметрів ґрунтової засипки і матеріалу конструкції.

У роботі [8] зазначено, що перші два методи заміни гофрованої конструкції ортотропною оболонкою та сіткою стрижневих елементів дають завищені результати напружено-деформованого стану металевої оболонки і у практичних розрахунках застосовуються із певними обмеженнями.

Напружено-деформований стан металевих гофрованих конструкцій труби. У дослідженнях прийнято трубу із металевих гофрованих конструкцій, яка експлуатується на 310 км ділянки Вадул–Сирет–Держкордон Львівської залізниці. Довжина труби 12,69 м, вертикальний діаметр 6,2 м, а горизонтальний діаметр 6,57 м (рис. 5). Металеві листи труби виготовлені із гофрованих збірних конструкцій з довжиною хвилі гофри 150 мм, висотою хвилі гофри 50 мм і товщиною металевого листа 6 мм. Фізико-механічні характеристики сталі труби Ст3сп: модуль Юнга – E = 205000 МПа, коефіцієнт Пуассона – ν = 0,3, густина – ρ = 78,5 кН/м^3, вага металевої гофри 0,478 кН/м, межа пружності – $\sigma_{пр}$ = 210 МПа та межа плинності – $\sigma_{п}$ = 235 МПа.

Із геологічного розрізу встановлено, що в основі труби залягає глина та суглинок шаром завтовшки по 2,0 м. Ґрунтова засипка виконана із щебенево-піщаної суміші із максимальною крупністю зерен щебеню 50 мм. Над склепінням труби є щебенева засипка завтовшки 0,55 м. Фізико-механічні параметри ґрунтів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні параметри ґрунтової ущільнювальної засипки труби із МГК

Фізико-механічні параметри ґрунтів	Щебінь над склепінням труби	Щебенево-піщана засипка навколо труби	Суглинок	Глина
Питома вага, γ, кН/м^3	14,5	22,5	23,0	28,5
Коефіцієнт Пуассона, ν	0,27	0,27	0,27	0,27
Коефіцієнт зчеплення c, кПа	0,1	5	13	30
Кут внутрішнього тертя, φ^0	43	37	25	17
Кут дилантації, ψ^0	0	1	1	2
E, МПа	150	110	28	16,4

З метою оцінювання несної здатності труби із МГК були проведені дослідження її напружено-деформованого стану із врахуванням динамічного навантаження від рухомого складу залізниць у трьох технічних станах колії. Варіантний розрахунок еквівалентних сил від локомотива 2М62 наведено на рис. 6. Синьою лінією

позначені еквівалентні сили, які виникають при проходженні рухомого складу по колії без нерівності, зеленою – по нерівності, що не вимагає обмеження швидкості руху, та червоною – по експлуатаційній нерівності.

Розрахунок сил тиску рейок на шпали (далі еквівалентні сили) виконано згідно з методикою [16].

Розрахунки еквівалентних сил проведено при модулі пружності підрейкової основи колії, що дорівнює 92,1 МПа. У результаті встановлено, що максимальна величина еквівалентних сил при експлуатаційній нерівності становить 415,4 кН, тоді як при проєктному стані колії величина еквівалентних сил становить 180,7 кН, а при нерівності, що не вимагає обмеження швидкості руху, – 333 кН.

Далі за методикою Петерсона обчислюємо величину сил тисків, які припадають на вершину металевих гофрованих конструкцій [17, 18]. Де вертикальний тиск σ_v на глибині z пружного тіла (вертикально під навантаженням), що спричинений лінійним навантаженням p на півпросторі, визначається за формулою

$$\sigma_v = \frac{2p}{\pi z}. \qquad (3)$$

Результати розрахунку вертикального тиску на склепіння труби із металевих гофрованих конструкцій від локомотива 2М62 при швидкості руху 100 км/год наведено на рис. 7.

Із рис. 7 видно, що вертикальний тиск на трубу розподіляється нерівномірно, що пояснюється триосьовим навантаженням від локомотива 2М62. При цьому величина максимального вертикального тиску на склепіння труби становить 65,56 кПа. Цей тиск далі використовується при моделюванні напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій.

Далі наведемо методику визначення геометричних параметрів гофрованого металевого профілю конструкцій із використанням аналітичних залежностей. Згідно із роботами [17, 18] переріз гофрованих металевих листів складається з кругових і прямих ділянок, які характеризуються товщиною листового металу t, висотою профілю гофри h_{corr}, довжиною хвилі гофри c, радіусом кривизни гофри R, кутом α і тангенціальною довжиною m_t (пряма область між хвилями). Розрахункову схему металевого гофрованого листа конструкції із параметрами хвилі гофри 150×50 мм наведено на рис. 8.

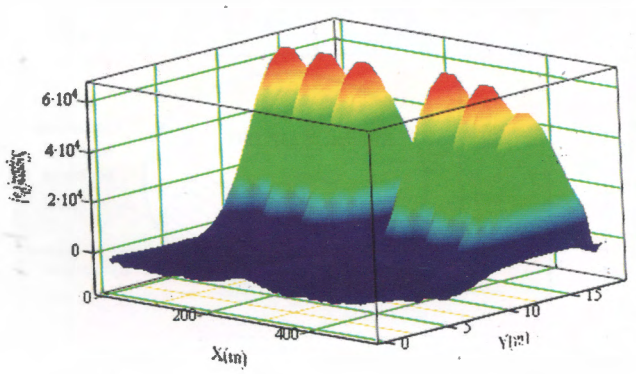


Рис. 7. Розподіл вертикального тиску на склепіння труби із МГК від локомотива 2М62 при швидкості руху 100 км/год

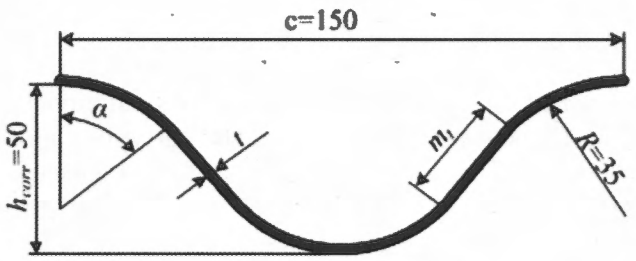


Рис. 8. Розміри гофрованого профілю 150×50 мм [18]

Розрахункові співвідношення для визначення геометричних параметрів гофрованого листа конструкції згідно із працею [18] наступні:

$$\left.\begin{aligned} h_{corr} &= 2r(1-\cos\alpha) + m_t \sin\alpha \\ c &= 4r\sin\alpha + 2m_t\cos\alpha \end{aligned}\right\}. \qquad (4)$$

Для гофрованого профілю розміром 150×50 мм ($c \times h_{corr}$), який наведено на рис. 8, геометричні параметри α та m_t визначаємо за формулами:

$$\alpha = 0{,}856 + 0{,}015t; \qquad (5)$$

$$m_t = 34{,}2 - 1{,}88t; \quad t \le 7{,}0. \qquad (6)$$

Площу та момент інерції одиниці довжини перерізу профілю гофрованого листа конструкції розраховуємо відповідно за формулами:

$$A = \frac{(4\alpha rt + 2m_t t)}{c}; \qquad (7)$$

$$I = \frac{r^3 t\left(\alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{2\sin^2\alpha}{\alpha}\right) + 4\alpha rt\left(\frac{h_{corr}}{2} - e\right)^2}{c} + \frac{\frac{2}{12}\frac{t}{\sin\alpha}(m_t\sin\alpha)^3}{c}. \qquad (8)$$

Пластичний момент опору згідно з [18] становить:

$$Z = \frac{\left[4\alpha rt\left(\frac{h_{corr}}{2} - e\right) + \frac{1}{2}\frac{t}{\sin\alpha}(m_t \sin\alpha)^2\right]}{c}, \quad (9)$$

де r та e – геометричні параметри гофрованого профілю, які визначаються за формулами:

$$r = R + t/2 ; \quad (10)$$

$$e = r\left(1 - \frac{\sin\alpha}{\alpha}\right). \quad (11)$$

У даних формулах момент опору та радіус інерції такі:

$$W = \frac{2I}{h_{corr} + t}; \quad i = \sqrt{\frac{I}{A}}. \quad (12)$$

У таблиці 2 наведено геомеричні характеристики гофрованого профілю металевої конструкції із параметрами хвиль гофр 150×50 мм у залежності від товщини гофрованого листа конструкції [18].

Таблиця 2

Геометричні характеристики гофрованого профілю 150×50 мм

t	A, мм^2/мм	I, мм^4/мм	W, мм^3/мм	Z, мм^3/мм
2	2,51	777	29,9	39,6
3	3,77	1173	44,3	59,7
4	5,04	1573	58,3	79,9
5	6,3	1978	71,9	100,4
6	**7,57**	**2387**	**85,2**	**121**
7	8,85	2801	98,3	141,9

Далі на основі наведених геометричних характеристик гофрованого листа конструкції перейдемо до методики визначення еквівалентної товщини поперечного перетину листа конструкції при заміні ізотропної гофрованої оболонки гладкою ортотропною.

У роботах [19, 20] зазначено, що гофровані оболонки можна моделювати використовуючи теорію ортотропних оболонок із заданням еквівалентної товщини оболонки, що дорівнює товщині гофри і меншому модулю пружності, щоб забезпечити дійсне значення осьової жорсткості конструкції EI. Еквівалентна товщина поперечного перерізу оболонки визначається за формулою

$$\bar{t} = \sqrt{12\frac{I}{A}}, \quad (13)$$

а еквівалентний модуль пружності сталі конструкції обчислюється за формулою

$$\bar{E} = \frac{12I}{\bar{t}^3}, \quad (14)$$

де I, A – момент інерції та площа одиниці довжини гофрованої оболонки.

Наведені формули дозволяють перейти від гофрованої оболонки до гладкої ортотропної оболонки, що наведено на рис. 9.

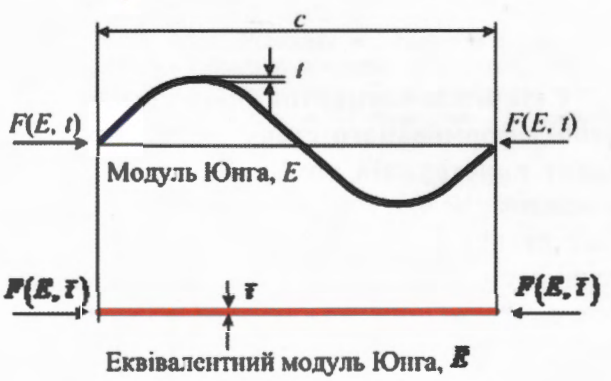


Рис. 9. Поперечний переріз гофрованої оболонки та її еквівалентний переріз [19]

Значення згинальної жорсткості EI та нормальної жорсткості EA, що наведені у таблиці 3, знайдено на основі обчислень осьового моменту інерції I та площі поперечного перерізу A із врахуванням поперечного перерізу оболонки.

За формулами (13) та (14) визначаємо відповідно значення еквівалентної товщини та модуля Юнга металевої конструкції. Після цього знаходимо осьовий момент інерції прямокутного поперечного перетину за формулою

$$\bar{I} = \frac{c\bar{t}^3}{12}. \quad (15)$$

Площа поперечного перетину листа конструкції визначається за формулою

$$\bar{A} = c\bar{t}, \quad (16)$$

а момент опору поперечного перетину листа конструкції – за формулою

$$\bar{W} = \frac{c\bar{t}^2}{6}. \quad (17)$$

За формулами (13)–(17) визначаємо еквівалентні геометричні характеристики гофрованого металевого профілю конструкції.

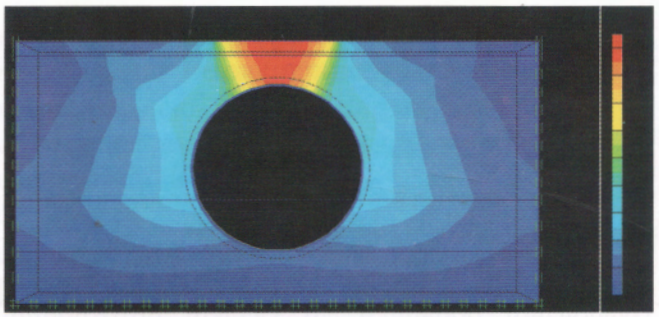


Рис. 10. Розподіл деформацій

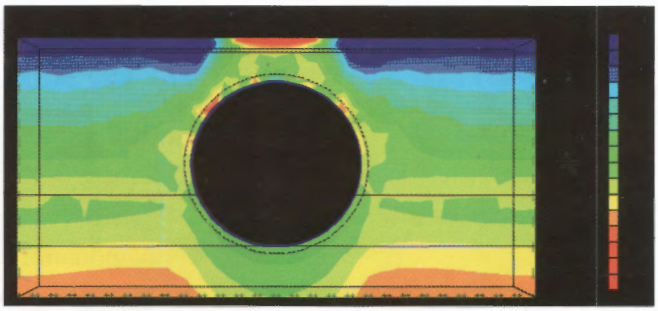


Рис. 11. Розподіл напружень

Скінченно-елементний розрахунок напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій труби. При скінченно-елементному розрахунку металевих гофрованих конструкцій труби використано стандартні скінченні елементи програми Plaxis. Згущення скінченно-елементної сітки виконували у місцях можливої концентрації напружень та в областях контакту спряжених тіл «ґрунтова засипка–металева конструкція». Зокрема, поблизу оболонки розміри скінченних елементів вибирали дрібнішими, а решту області розбивали елементами більших розмірів.

При моделюванні труби задля небезпеки виникнення пластичних деформацій у металевій оболонці під час розрахунків задавався критерій фон Мізеса. В цьому випадку додатково задано значення межі плинності металу конструкції. Для моделювання ґрунтової засипки використано ідеально пластичну модель типу Мора-Кулона.

У вузлах елементів нижньої частини ґрунтової обойми задані нерухомі шарніри, які унеможливлюють лінійні переміщення труби із МГК у вертикальному та горизонтальному напрямах, а у вузлах елементів бічних граней введена заборона горизонтальних переміщень.

На рис. 10 наведено результати розрахунку деформацій, що виникають у ґрунтовій засипці труби із МГК.

Максимальні вертикальні деформації ґрунтової засипки виникають у склепінні труби і становлять 43,40 мм, а максимальні горизонтальні – 15,41 мм.

На рис. 11 наведено результати розрахунку напружень у ґрунтовій ущільнювальній засипці. Максимальна величина напружень становить 280,9 кПа.

Результати порівняння значень прогинів та напружень, що виникають у металевій трубі при моделюванні металевих конструкцій гофрою та пластиною еквівалентної товщини, наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Напружено-деформований стан труби із МГК

Тип металевої гофрованої конструкції	Прогини, мм	Напруження, МПа
Multiplate MP150 (моделювання пластиною)	41,5	102,95
Multiplate MP150 (моделювання гофрою)	47,1	115,46

Більші за величиною напруження та деформації виникають при моделюванні металевої конструкції гофрованою оболонкою. При заміні металевої гофрованої оболонки гладкою пластиною із визначенням еквівалентної товщини, різниця обчислених значень деформацій складає 13,5 %, а напружень – 10,8 %.

Висновки.

1. Згідно з проведеним оцінюванням величин еквівалентних сил, що виникають у процесі динамічної взаємодії рухомого складу та колії, встановлено, що при модулі пружності підрейкової основи 92,1 МПа максимальна величина сил при експлуатаційній нерівності становить 415,4 кН, тоді як при проєктному стані колії величина сил становить 180,7 кН, а при нерівності, що не вимагає обмеження швидкості руху, – 333 кН.

2. Результати оцінювання напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій показали, що більші за величиною напруження та деформації виникають при моделю-

ванні металевої конструкції гофрованою оболонкою. І так при заміні металевої гофрованої оболонки гладкою пластиною величина деформацій є на 13,5 % вищою, а напружень – на 10,8 %.

3. Метод заміни гофрованої металевої конструкції на гладку пластину із визначенням еквівалентної товщини поперечного перетину пластини рекомендується для практичного застосування при оцінюванні напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій транспортних споруд, таких як труби, малі мости та тунелі.

[1] *Лучко Й.Й.* Мости і труби з гофрованих металевих конструкцій та моніторинг грунтових основ доріг і споруд: Монографія / Й.Й. Лучко, В.В. Ковальчук, І.Б. Кравець. – Львів: Світ, 2019. – 260 с.

[2] *Лучко Й.Й.* Мости, труби і тунелі: За ред. д. т. н., проф. Й.Й. Лучка / Й.Й. Лучко, О.С. Распопов, П.М. Коваль / М-во освіти і науки України; Дніпропетровський нац. ун-т залізнич. транспорту ім. Акад. В. Лазаряна. – Львів: Каменяр, 2014. – 879 с.

[3] Handbook of steel drainage and highway construction products. Published by Corrugated Steel Pipe Institute. – American Iron and Steel Institute, 2002. – 470 p.

[4] *Стасюк Б.М.* Дослідження напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій при взаємодії з грунтом засипки / Б.М. Стасюк, В.З. Станкевич, В.В. Ковальчук, Й.Й. Лучко // Збірник наук. праць Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. транспорту ім. академ. В. Лазаряна «Мости і тунелі: Теорія, дослідження, практика». – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 5. – С. 105–111.

[5] *Mechelski Czesław.* Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powlokowych. – Wroclaw, 2008. – 205 s.

[6] *Ковальчук В.В.* Скінченно-елементний розрахунок напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій при взаємодії із грунтом засипки у програмному середовищі NX NASTRAN // Вісник Львівського національного аграрного університету. – Львів, 2015. – № 16. – С. 19–25.

[7] *Лучко Й.Й.* Методи оцінки напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій / Й.Й. Лучко, Ю.Є. Ковальчук, І.Б. Кравець // Збірник наук. праць Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. транспорту ім. академ. В. Лазаряна «Мости і тунелі: Теорія, дослідження, практика». – Дніпропетровськ, 2017. – № 11 – С. 30–41.

[8] *Machelski Czesław.* Influence of live load on the soil-steel bridge / Studia Geotechnica et Mechanica. – Vol. XXVI. – No. 3–4, 2004. – p. 92–119.

[9] *Ковальчук В.В.* Основні засади розрахунку металевих гофрованих конструкцій методом скінченних елементів при взаємодії з грутовою засипкою / В.В. Ковальчук // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2014. – Випуск № 56. – С. 94–102.

[10] *Beben D.* Problemy projektowe i wykonawcze zwiazane z gruntowo-stalowymi obiektami mostowymi // Geoinżynieria. Drogi, Mosty, Tunele / D. Beben, Z. Manko. – 2009. – Nr 1.

[11] *Wysokowski Adam.* Przepusty w infrastrukturze komunikacyjnej. – Cz. 8 / Adam Wysokowski, Jerzy Howis // Metody obliczen konstrukcji przepustow. Cz. II. Tradycyjne metody obliczen. – Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Maj-Czerwiec, 2010. – P. 96-103.

[12] Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений / А.С. Городецкий, В.И. Зоворицкий, А.И. Лантух-Лященко, А.О. Рассказов. – М.: Транспорт, 1981. – 143 с.

[13] *Wysokowski A.* Przepusty w infrastrukturze komunikacyjnej: Metody obliczen konstrukcji przepustow. – Cz. III. Nowe metody obliczen / A. Wysokowski, J. Howis. – 2010. – Nr 3 (30). – S. 72–81.

[14] *Wysokowski A.* Metody obliczen konstrukcji przepustow / A. Wysokowski, J. Howis // Cz. IV: Obliczenia przepustow metoda elementow skonczonych (MES) / Przepusty w infrastrukturze komunikacyjnej. – Cz. 10. Artykul wprowadzajacy. «Nowoczesne Budownictwo Inzynieryjne. – 2011. – Nr 2 (17). – S. 54–57.

[15] *Kovalchuk V.* Study of the stressstrain state in defective railway reinforcedconcrete pipes restored with corrugated metal structures / V. Kovalchuk, R. Markul, A. Pentsak, B. Parneta, O. Gajda, S. Braichenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov. – 5/1 (89), 2017. – P. 37–44. doi:10.15587/1729-4061.2017.109611.

[16] *Даніленко Е.І.* Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість (ЦП/0117) / Е.І. Даніленко, В.В. Рибкін; Затверджено наказом Укрзалізниці від 13. 12. 2004 р. № 960 ЦЗ. – Київ: Транспорт України, 2006. – 168 с.

[17] *Pettersson L.* Fatigue design of soil steel composite bridges / L. Pettersson, J. Leander, L. Hansing // Archives of institute of civil engineering. – 2002. – Nr. 12. – S. 237–242.

[18] *Pettersson L.* Design of soil steel composite bridges / Lars Pettersson, Hakan Sundquist. – Structural Desing and Bridges, Stockholm 2007. – 98 p.

[19] *El-Sawy K.M.* Three-dimensional modeling of soil-steel culverts under the effect of truckloads. – Thin-Walled Structures, 2003. – No. 41. – P. 747–768.

[20] *Damian Beben.* Numerical study of performance of soil-steel bridge during soil backfilling / Structural Engineering and Mechanics. – Vol. 42. – No. 4 (2012). – 571-587. DOI: 10.12989/sem.2012.42.4.571.

Надійшла 22.02.2021 р.

УДК 621.924

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА НАВАНТАЖЕННЯ АБРАЗИВНИХ АРМОВАНИХ КРУГІВ

У роботі розглянуто питання з визначення впливу технологічних параметрів відрізних та зачисних операцій на навантаження абразивних армованих кругів при використанні ручних та переносних шліфувальних машин.

The article considers the issue of determining the influence of technological parameters of cutting and cleaning works on the load of abrasive-reinforced wheels using manual and portable grinding machines.

Ключові слова: абразивне різання, навантаження, абразивний армований круг, шліфувальна машина.



Ю.Д. Абрашкевич
професор кафедри «Будівельні машини ім. Ю.О. Вєтрова» Київського національного університету будівництва і архітектури, заслужений діяч науки і техніки України, д.т.н., професор



О.А. Марченко
інженер Київського національного університету будівництва і архітектури, к.т.н., доцент



Г.М. Мачишин
доцент кафедри «Будівельні машини ім. Ю.О. Вєтрова» Київського національного університету будівництва і архітектури, к.т.н., доцент



С.Ю. Комоцька
інженер Київського національного університету будівництва і архітектури

Абразивні армовані круги у поєднанні з використанням ручних та стаціонарних шліфувальних машин масово застосовують при виконанні будівельно-монтажних робіт. Вони відносяться до найбільш розповсюджених різновидів ручного інструменту. Вітчизняні та закордонні виробники абразивного інструменту пропонують продукцію для виконання відрізних, зачисних та шліфувальних операцій з різними конструктивними та фізико-механічними властивостями для оброблення різноманітних матеріалів. Оптимальний вибір технологічних та технічних параметрів роботи машин, у поєднанні з правильним підбором потрібного абразивного робочого інструменту, дає змогу забезпечити зниження трудомісткості та підвищення продуктивності та якості робіт із досягненням необхідного ефекту [1...4].

Слід зауважити, що робота такими машинами нерідко здійснюється в незручній позі, ціною великих додаткових і необґрунтованих зусиль при високих швидкостях виконуваних операцій. Процес роботи ручними шліфувальними машинами (у т.ч. з абразивними армованими кругами) має ряд особливостей, до них відносяться: нестабільність подачі по величині та направленню; безперервна зміна у межах допустимої потужності приводу інтенсивності процесу роботи; обмеження зусиль, що виникають у місці контакту робочого інструменту (абразивного армованого круга) з робочим середовищем, як потужністю приводу, так і індивідуальними фізіологічними даними оператора.

Вдосконалення умов праці, підвищення ефективності використання машин для проведення будівельно-монтажних робіт і забезпечення безпечної діяльності оператора вимагає комплексної оцінки виробничого середовища операторів з урахуванням принципів ергономіки. За явної нестачі робочої сили при проведенні будівельно-монтажних та ремонтних робіт такий фактор підвищення продуктивності праці, як максимальне використання робочих ресурсів через створення зручних умов праці та залучення ергономічно обґрунтованого інструменту та режиму його роботи у теперішній час вже не може не враховуватися.

Проведений авторами аналіз [5, 6] взаємодії у системі «оператор–машина–робоче середовище» при роботі кутовими шліфувальними машинами, оснащеними відрізними та зачисними абразивними армованими робочими органами, свідчить про тісний взаємозв'язок між навантаженням на робочому органі та зусиллями, які сприймає

оператор машини, через значний вплив режимних параметрів роботи. Визначення навантаження на робочому органі, виходячи з технологічних умов, є актуальною задачею, так як у процесі роботи абразивними армованими кругами крутний момент на шпинделі та обертання робочого органа створюється приводом машини, а всі інші функції – поздовжня та поперечна подачі, утримання машини та загальне управління – здійснюються оператором. При роботі з ручними шліфувальними машинами оператор може утримувати її у будь-якому положенні та забезпечувати достатньо точне направлення подачі круга.

Дослідження процесу роботи абразивними армованими кругами у різних режимах (різання, зачищення, шліфування), механізму зносу, параметрів міцності та теплових процесів із метою підвищення ефективності використання потребує вивчення їх навантаження.

Згідно з [7] прийнято, що для розгляду навантаження відрізного або зачисного абразивного армованого круга (рис. 1) обумовлено, що режим його роботи – усталений; стан робочого середовища та його поверхні незмінний; сили, що діють на робочу поверхню, прикладені до площадок робочої поверхні круга, а не до окремих абразивних зерен; вплив стружки, що утворюється в процесі різання, не враховується; траєкторія руху точки абразивного армованого круга – окружність, внаслідок малої величини співвідношення швидкості подачі до колової швидкості. Крім того, враховувалось, що руйнування робочого матеріалу відбувається тільки за рахунок тангенціальних сил P_τ, рівномірно розподілених по всій площині контакту з робочим середовищем, та пов'язані з нормальними P_n співвідношенням $\frac{P_\tau}{P_n} = \mu$.

Коефіцієнт μ визначається експериментально, з урахуванням прийнятих допущень у подальшому вважаємо $\mu = const$. Тоді елементарна робота, що йде на руйнування робочого середовища при різанні та зачищенні на елементарному шляху dl по дузі контакту, буде:

$$dA = P_\tau \cdot dl \qquad (1)$$

або $$dA = q \cdot dV = q \cdot b \cdot a \cdot dl, \qquad (2)$$

де q – енергоємність процесу різання; dV – елементарний об'єм зруйнованого робочого середовища; b – висота робочого органа; a – глибина зрізу, що відповідає площадці поверхні $l_к$ (див. рис. 1).

Глибина зрізу визначається залежністю [7]

$$a = \frac{v_п}{\pi \cdot D \cdot n} \Delta l \cdot \sin\alpha = \frac{v_п}{v_o} \Delta l \cdot \sin\alpha = \frac{v_п}{v_o} \int_0^{l_к} \sin\alpha \cdot dl,$$

де $v_п$, n – відповідно швидкість подачі та число обертів круга на одиницю часу; D – діаметр круга; α – поточний кут контакту для площадки зрізу; $v_o = \pi \cdot D \cdot n$ – колова швидкість круга.

Приймаючи цей вираз та враховуючи, що $a = \frac{l_к}{R} = \frac{2l_к}{D}$, отримаємо:

$$P_\tau = q \cdot b \frac{v_п}{v_o} \int_{l_0}^{l_к} (\sin\alpha \cdot dl) = \frac{D}{2} q \cdot b \frac{v_п}{v_o} \left(1 - \cos\frac{2l_к}{D}\right).$$

Потужність, що витрачається на різання та зачищення, дорівнює:

$$N_p = P_\tau v_o = \frac{D}{2} q \cdot b \cdot v_п \left(1 - \cos\frac{2l_к}{D}\right).$$

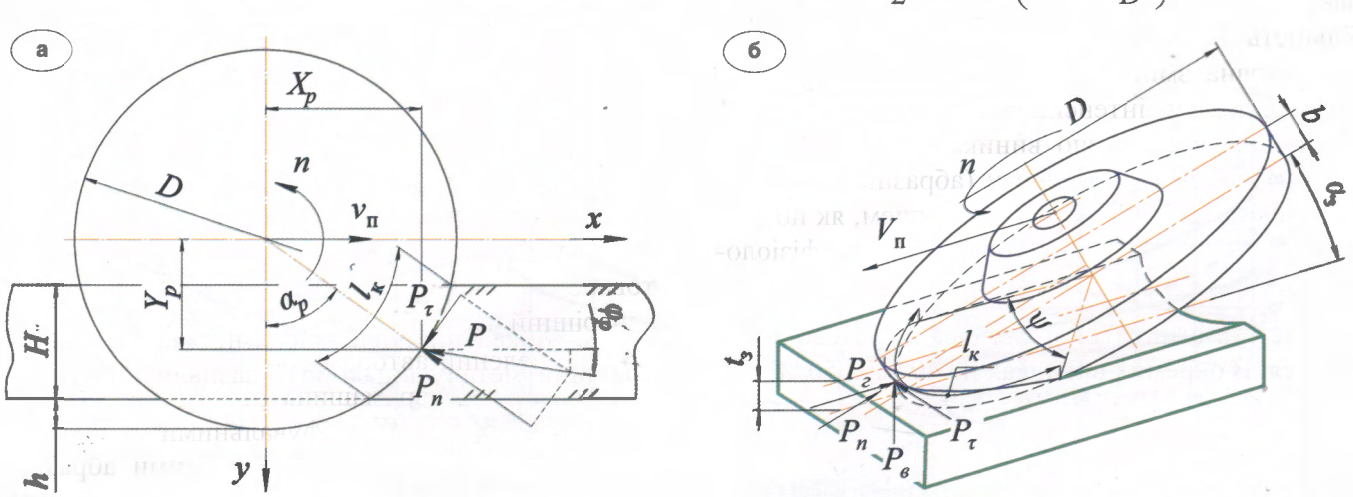


Рис. 1. Схема навантаження абразивного армованого круга
а – відрізного; **б** – зачисного

Значення величини довжини дуг контакту при роботі відрізними абразивними армованими кругами для різноманітного металевого профілю приведені в роботі [1].

Для випадку різання (див. рис. 1, а) довжина дуги контакту визначається наступним чином:

$$l_к = \frac{D}{2}\left(\arccos\left(1-\frac{2(H+h)}{D}\right)-\arccos\left(1-\frac{2h}{D}\right)\right). \quad (3)$$

Довжину контакту при зачищенні (див. рис. 1, б) периферією круга можна визначити за формулою [8]

$$l_{кзп} = \frac{D}{2}\left(1\pm\frac{v_п}{v_o}\right)\sqrt{1-\left(1-\frac{2t_з}{D}\right)^2}, \quad (4)$$

де $t_з$ – глибина врізання абразивного круга в поверхню, що оброблюється (рис. 1, б), пов'язана зі зусиллям притискання $P_в$ співвідношенням [8]

$t_з \cong 0{,}28\cdot10^{-3}P_в^{0,52}$, м,

отриманим експериментально.

Довжину контакту при зачищенні боковою поверхнею круга можна визначити за формулою [8]

$$l_{кзт} = \frac{D}{2}\psi\sqrt{1+\left(\frac{v_п}{v_o}\right)^2}, \quad (5)$$

де ψ – кутовий розмір зони контакту абразивного круга з робочим середовищем, рад.

При зачищенні, наприклад, зварного шва завширшки $h_{зш}$: у випадку $\alpha_з = 0$, $\psi = 2\arcsin\frac{t_з}{D}$, а якщо $\alpha_з \neq 0$, $\psi = 2\arccos\left(1-\frac{2t_з}{D\cdot\sin\alpha_з}\right)$.

Слід зазначити, що при виконанні зачисних операцій схема роботи визначається специфікою об'єкта, що оброблюється. Наприклад, зачищення зварного шва краще проводити боковою поверхнею внаслідок того, що забезпечується максимальна величина довжини дуги контакту. Разом із тим слід також враховувати вплив теплових процесів, тобто співвідношення часу проходження кругом зон нагрівання та охолодження. У роботі [8] встановлено, що сприятливий тепловий режим утворюється за умови $\frac{2l}{D} \le 0{,}2\ldots0{,}3$.

Потужність, що витрачається на подачу, може бути обрахована за формулою

$$N_п = P_п\cdot v_п = \frac{D}{4}q\cdot b\frac{v_п^2}{v_o}\times \times\left(\frac{2l_к}{\mu D}+\sin^2\left(\frac{2l_к}{D}\right)-\frac{1}{2\mu}\sin\left(\frac{4l_к}{D}\right)\right). \quad (6)$$

Аналізуючи вираз (6), можна бачити, що до нього входить доволі мала величина $\frac{v_п^2}{v_o}$. Це призводить до того, що потужність, яка витрачається

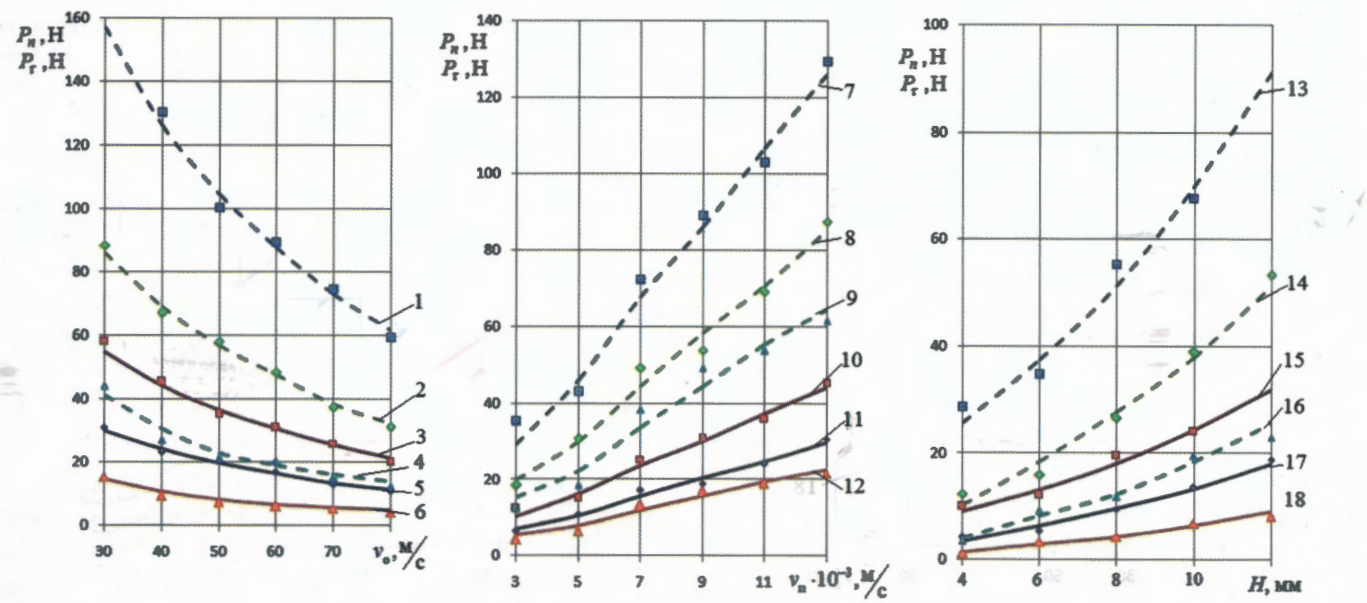


Рис. 2. Залежності нормальних $P_п$ (пунктирна лінія) і тангенціальних $P_т$ (суцільна лінія) зусиль від режимів роботи ($v_п$, v_o) і товщини H виробу при різанні (маркери – експериментальні дані)

1, 2, 13, 14 – $v_п = 13\cdot10^{-3}$ м/с; 3, 4, 15, 16 – $v_п = 7\cdot10^{-3}$ м/с; 5, 6, 17, 18 – $v_п = 3\cdot10^{-3}$ м/с;
7, 8 – $v_o = 40$ м/с; 9, 10 – $v_o = 60$ м/с; 11, 12 – $v_o = 80$ м/с

на подачу при роботі з абразивними армованими кругами, незначна.

На рис. 2 зображені залежності нормальних P_n і тангенціальних P_τ зусиль від режимів роботи ($v_п$, $v_о$) і товщини H виробу при різанні, отримані у результаті розрахунку та експериментальних досліджень.

На рис. 3 показані залежності нормальних P_n і тангенціальних P_τ зусиль від режимів роботи ($v_п$, $v_о$), зусилля притиснення $P_в$ і кута нахилу диска $\alpha_з$ до поверхні, що обробляється, при використанні зачисних абразивних армованих кругів.

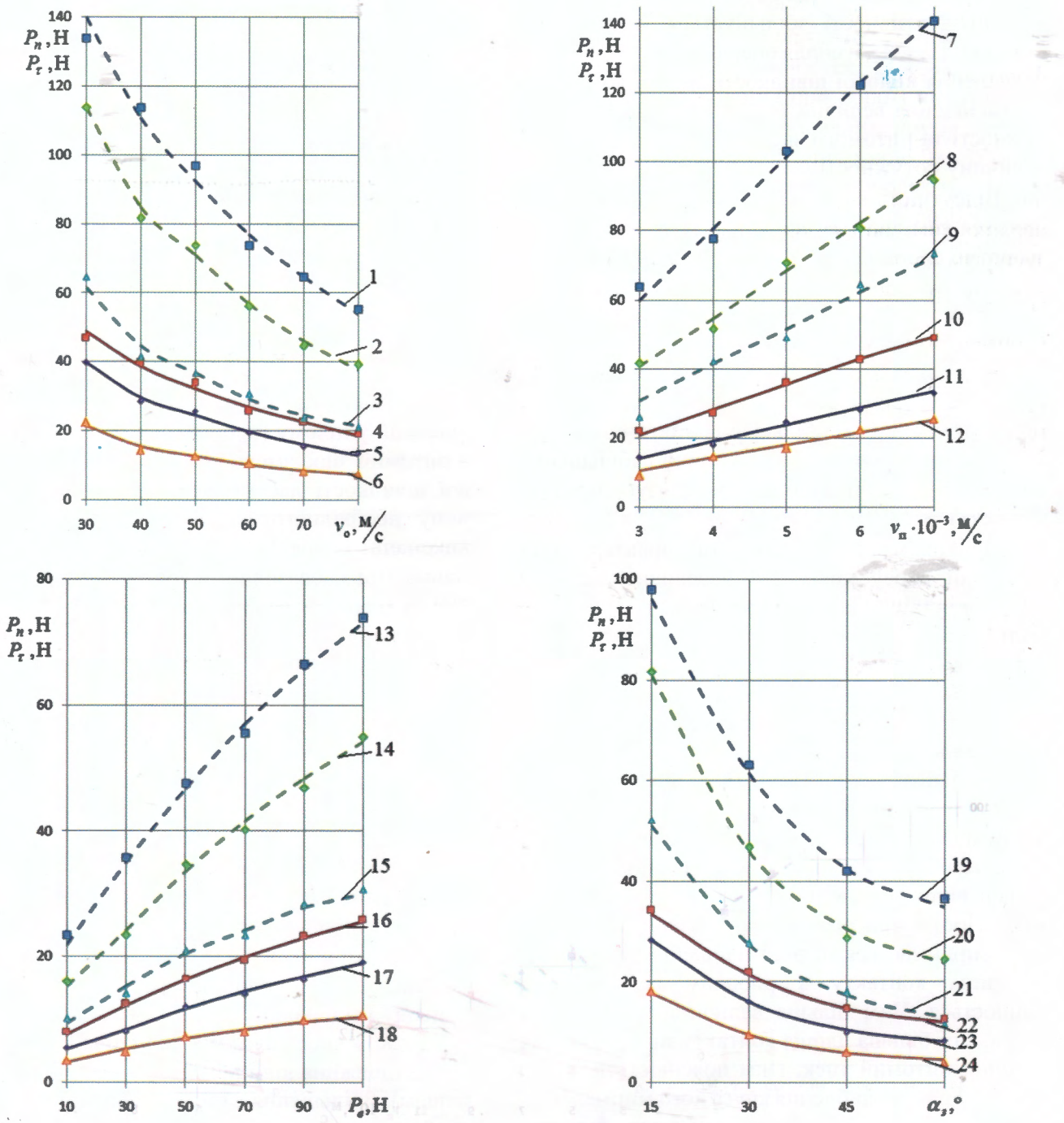


Рис. 3. Залежності нормальних P_n (пунктирна лінія) і тангенціальних P_τ (суцільна лінія) зусиль від режимів роботи ($v_п$, $v_о$), зусилля притиснення $P_в$ і кута нахилу диска $\alpha_з$ при зачищенні (маркери – експериментальні дані)

1, 2, 13, 14, 19, 22 – $v_п = 7 \cdot 10^{-3}$ м/с ; 3, 4, 15, 16, 20, 23 – $v_п = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с ; 5, 6, 17, 18, 21, 24 – $v_п = 3 \cdot 10^{-3}$ м/с ; 7, 10 – $v_о = 40$ м/с ; 8, 11 – $v_о = 60$ м/с ; 9, 12 – $v_о = 80$ м/с

З отриманих графіків можна дійти висновку, що характер зміни параметрів теоретичних обрахунків і експериментальних даних подібний, похибка теоретичних та експериментальних даних незначна та не перевищує 15 %. Це доводить адекватність даних, отриманих теоретичним шляхом.

Аналіз отриманих залежностей свідчить, що зі збільшенням подачі та заглиблення круга збільшується як P_n , так і P_τ , тобто зі збільшенням продуктивності збільшується як потрібна потужність, так і зусилля оператора. У свою чергу збільшення колової швидкості круга призводить до зменшення величин P_n і P_τ , ефективної потужності та питомого зносу. Основний вплив на величину потужності має швидкість подачі.

Відсутність впливу колової швидкості пояснюється тим, що тангенціальне зусилля на кругу зворотно пропорційне його коловій швидкості. Зі збільшенням товщини стружки в процесі різання матеріалу, тобто зі збільшенням швидкості подачі робочого органа, нормальні і тангенціальні зусилля збільшуються. Проте відбувається зниження енергоємності оброблення за рахунок менш інтенсивного збільшення тангенціального зусилля порівняно з величиною збільшення швидкості подачі (що характеризує продуктивність).

При цьому слід відзначити характер зміни величини зносу круга. За невеликих величин подачі круга сили, що діють на нього, відносно малі. Разом із тим для ефектної роботи необхідний визначений контактний тиск. Якщо цей тиск внаслідок малої швидкості подачі буде недостатнім, то більша частина роботи буде витрачатися на непродуктивне тертя, внаслідок чого збільшується питомий тиск. Зі збільшенням величини подачі круга питомий знос зменшується до певного моменту, після якого відбувається передчасне руйнування круга. Певній величині подачі відповідає відповідна величина тиску на круг. Проте, при різному заглибленні круга цей тиск сприймається різною площею круга, тобто величина контакту з робочим середовищем змінюється. Чим більша величина заглиблення круга, тим більша площа контакту та, відповідно, менший питомий тиск. Цим пояснюється, що зі збільшенням заглиблення круга його мінімальний питомий знос має місце при дещо більших величинах подачі.

Найбільший вплив на ефективну потужність приводу, величину зусилля притискання круга та питомий знос має величина заглиблення круга. Збільшення заглиблення від 4 мм до 8 мм при подачах у діапазоні 3…13 мм/с викликає збільшення ефективної потужності та величини P_n у 1,6…2,2 раза. При заглибленні до 12 мм це збільшення ще більше: для ефективної потужності до 3,5 раза, для P_n – до 2,5 раза.

Збільшення величини колової швидкості v_o від 40 м/с до 80 м/с призводить до зменшення ефективної потужності в 1,2 раза, P_n – в 1,8 раза, та зменшує величину питомого зносу.

Зменшення зусиль на крузі з підвищенням колової швидкості, за інших рівних умов, пояснюється тим, що кожне зерно круга за один оберт здійснює меншу роботу, так як воно заглиблюється у робоче середовище на величину у стільки разів меншу, у скільки збільшується колова швидкість. З цієї ж причини збільшується питома зносостійкість круга. Тобто можна дійти висновку, що підвищення колової швидкості круга, яке можливе за рахунок використання абразивних армованих кругів, доцільне як щодо продуктивності, так і загалом економічності операцій у цілому (продуктивність збільшується, а питомий знос зменшується). Збільшення колової швидкості дає можливість зменшити величину необхідного від оператора зусилля при виконанні операцій з ручними та переносними машинами з абразивними армованими кругами.

Експериментальні дослідження, проведені на спеціальному лабораторному стенді кафедри будівельних машин КНУБА, показали, що при фіксованому напрямку подачі на роботу ручних машин найбільший вплив мають наступні технологічні параметри: режими роботи (заглиблення круга, подача та колова швидкість, а також для режиму роботи зачисним абразивним армованим кругом – величина сили притискання та кут його нахилу круга до площадки обробки) та точність встановлення круга. Досліди підтвердили якісний характер впливу цих параметрів, отриманих у ході аналітичних досліджень.

Найбільший вплив на ефективну потужність приводу і відповідно зусилля на рукоятках машини, а також знос круга має величина його заглиблення (довжина лінії контакту з робочим середовищем). Збільшення заглиблення круга від 4 мм до 8 мм при подачі у діапазоні $3...13 \cdot 10^{-3}$ м/с викликає збільшення ефективної потужності різання в 1,5…2,2 раза та відповідно пропорційно збільшуються зусилля на рукоятях.

Збільшення номінальної колової швидкості круга від 40 м/с до 80 м/с як у режимі різання, так і зачищення дає змогу за однакової продуктивності зменшити ефективну потужність приводу і відповідно зусилля на рукоятях машини у середньому в 1,2 раза, при цьому зусилля притискання зменшується, також це сприяє зменшенню зносу круга.

При збільшенні подачі круга пропорційно збільшуються як нормальна складова сили різання P_n , так і тангенціальна P_τ, тобто зі збільшенням продуктивності збільшується і необхідна потужність, і зусилля на руки оператора.

При виконанні зачисних операцій великий вплив має величина притискного зусилля та кута нахилу круга до поверхні, що обробляється. Так зі збільшенням зусилля притискання круга до поверхні обробки від 10 Н до 50 Н зусилля на кругу збільшуються в 1,6 раза, а до 110 Н – в 1,8 раза. При збільшенні кута нахилу круга до оброблювальної поверхні відбувається зниження складових сил різання, що пояснюється зменшенням контактної поверхні зачисного круга з робочим середовищем.

Висновки. Проведені дослідження дозволили встановити чисельні значення зусиль на відрізному та зачисному армованому абразивному крузі, що дає можливість виявити вплив режимів роботи на навантаження робочого органа та в подальшому на реактивні зусилля на руки оператора.

Таким чином, результатом роботи є отримання основних залежностей для визначення величини навантаження при роботі відрізних та зачисних абразивних армованих кругів із урахуванням особливостей та умов їх роботи. Виведені співвідношення дозволяють більш детально досліджувати процеси розроблення робочих середовищ, механізм зносу інструменту та його міцнісних параметрів та теплофізичних процесів, а також обґрунтовано підійти до вибору та проєктування відрізних кругів та їх приводів.

[1] Обладнання для монтажних робіт: Підручник / *Ю.Д. Абрашкевич, Л.Є. Пелевін, В.П. Рашківський*. – К: КНУБА, 2016. 232 с.

[2] *Курносов А.П.* Абразивные инструмента и шлифование. – Челябинск: «Абразивы Урала», 2000. 96 с.

[3] *Märt Reinvee, Sander Aia, Mati Pääsuke*. Ergonomic benefits of an angle grinder with rotatable main handle in a cutting task. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society. 2019. V. 61, № 7. P. 1112–1124.

[4] *Марченко О.А.* Продуктивність ручних машин під час роботи з абразивними армованими кругами. // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2019. – № 4. – С. 33–37.

[5] *Абрашкевич Ю.Д., Мачишин Г.М., Марченко О.А.* Силовий аналіз параметрів ручних машин під час роботи з відрізними абразивними армованими кругами. // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2019. – № 2. – С. 38–47.

[6] *Абрашкевич Ю.Д., Мачишин Г.М., Марченко О.А.* Силовий аналіз ручних кутових шліфувальних машин при роботі з зачисними абразивними кругами. // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2018. – № 92. – С. 38–48.

[7] *Абрашкевич Ю.Д., Мачишин Г.М., Марченко О.А.* Навантаження при різанні абразивним армованим кругом. // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2019. – № 3. – С. 36–40.

[8] *Маслов Е.Н.* Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. 320 с.

Надійшла 15.02.2021 р.

АНАЛИЗ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ФУТЕРОВКИ БУНКЕРА РУДНЫХ ВЕСОВ



Е.И. Гезенцвей
Эксперт по строительному проектированию ООО «Метинвест Инжиниринг», г. Днепр



В.И. Олевский
заведующий кафедрой высшей математики Украинского государственного химико-технологического университета, член Общества промышленной и прикладной математики (SIAM), д.т.н., профессор, г. Днепр



А.В. Олевский
сертифицированный партнер Dassault Systemes SolidWorks (CSWA), Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара, член Общества промышленной и прикладной математики (SIAM), г. Днепр

С целью разработки технических рекомендаций по увеличению срока службы футеровки рудных весов были проведены расчеты износа конструкции при технологических нагрузках и сравнение данных с расчетом параметров конструкции. Особенностью расчета является учет механических характеристик засыпного материала при повышенной температуре футеровки. Основные численные расчеты проводились с помощью программного комплекса САПР SolidWorks Flow Simulation [1].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ФУТЕРОВКИ

Расчетная схема. Расчет проводился для параметров бункера рудных весов, представленных на рис. 1а, футерованных стальными пластинами, изображенными на рис. 1б.

Бункер представляет собой коробчатую конструкцию пирамидально-призматический формы. Используемый материал футеровки – листовая сталь 65Г ГОСТ 1577-93 толщиной 40 мм.

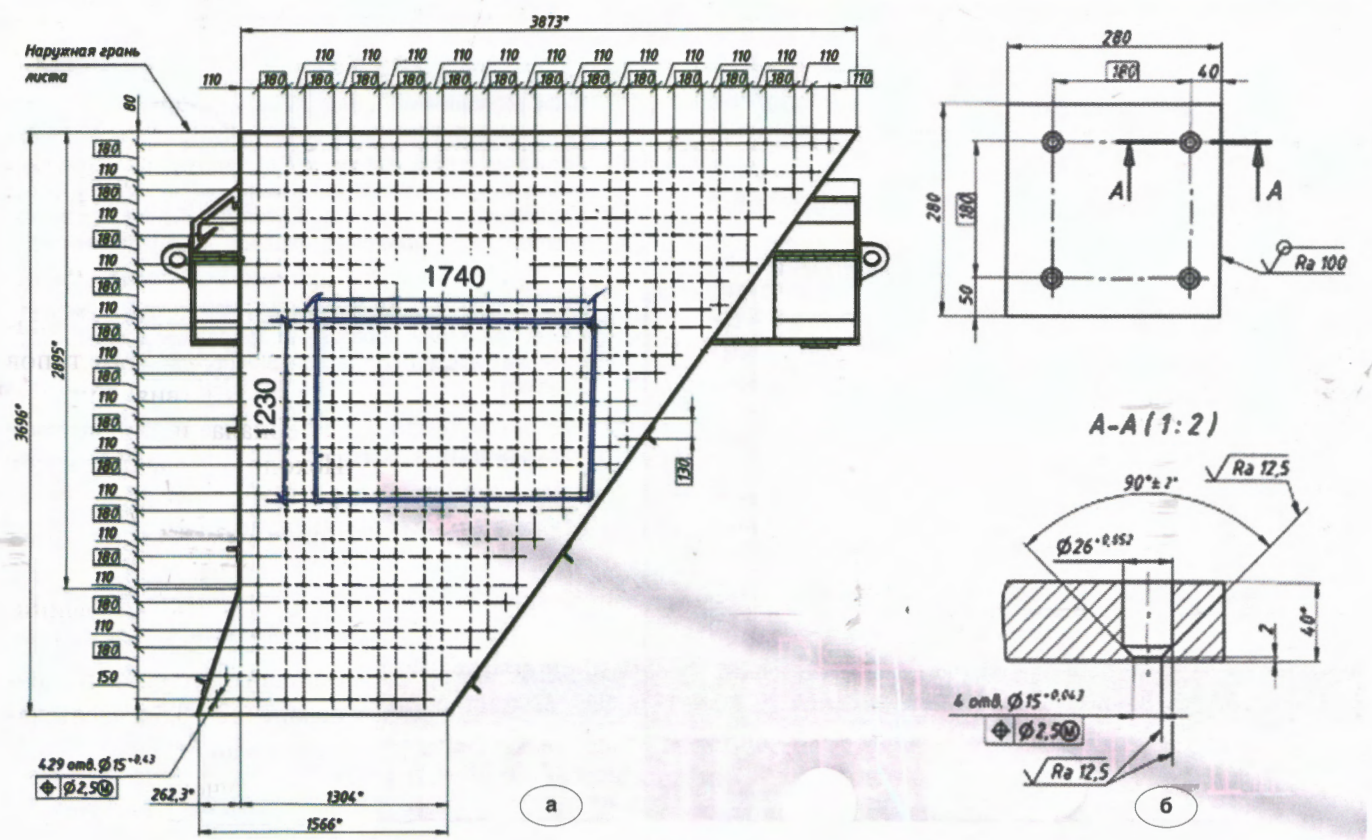


Рис. 1. Конструкция бункера (а) и пластины футеровки (б)

Нагрузки принимались в следующем виде.

Нагрузки от падения рудного материала. Рассматривалось падение материала с высоты 2 м над уровнем верхней кромки бункера, что примерно соответствует падению с высоты 4 м до I-й зоны истирания согласно [2]. В соответствии с полученной заявкой принимались параметры рудного материала согласно таблице 1.

Таблица 1

Параметры засыпаемого в бункер рудного материала

Параметр	Значение
Режим работы оборудования	тяжелый
Количество проходимого шихтового материала через каждую единицу оборудования	около 150 т/ч = 1314000 т/год
Наименование шихтовых материалов	агломерат, окатыши, добавки
Насыпная плотность	1,4 т/м^3 ÷ 2,2 т/м^3
Гранулометрический состав	5 мм ÷ 100 мм

Контроль веса рудного материала производился автоматически САПР SolidWorks с учетом плотности и размеров гранул. Безразмерный коэффициент износа материала учитывался системой также автоматически и составлял $2 \cdot 10^{-9}$.

Температурные нагрузки. Рассматривалась передача тепла от рудного материала к футеровке при температуре материала 300 °С – 500 °С.

Бункер моделировался в форме усеченной неправильной пирамиды с толщиной стенки 40 мм по внутренним размерам конструкции (рис. 2).

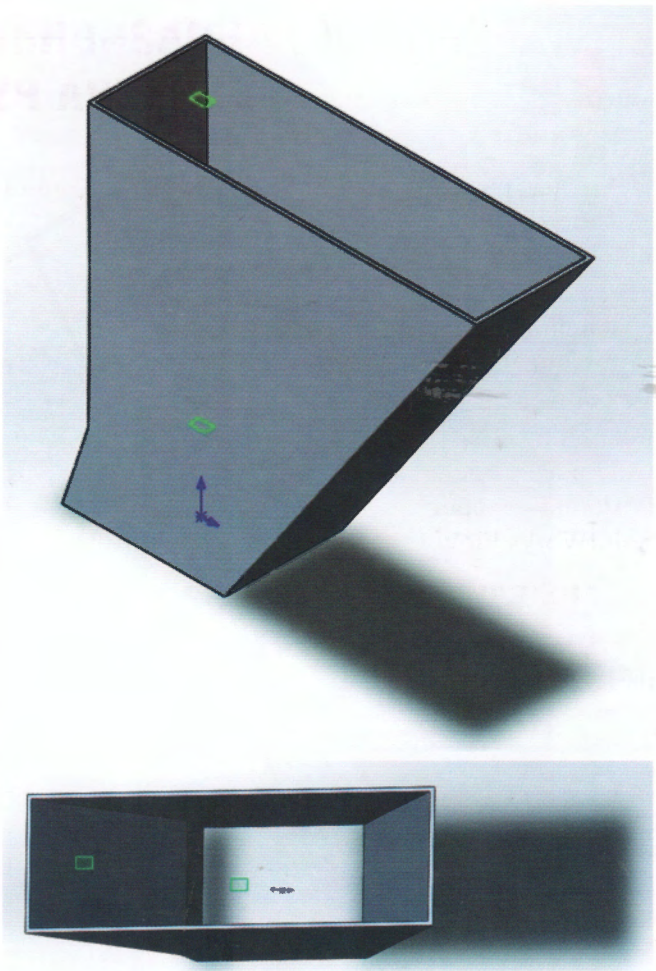


Рис. 2. Модель бункера

Падение гранул рассматривалось без начальной скорости из прямоугольной горизонтально расположенной зоны.

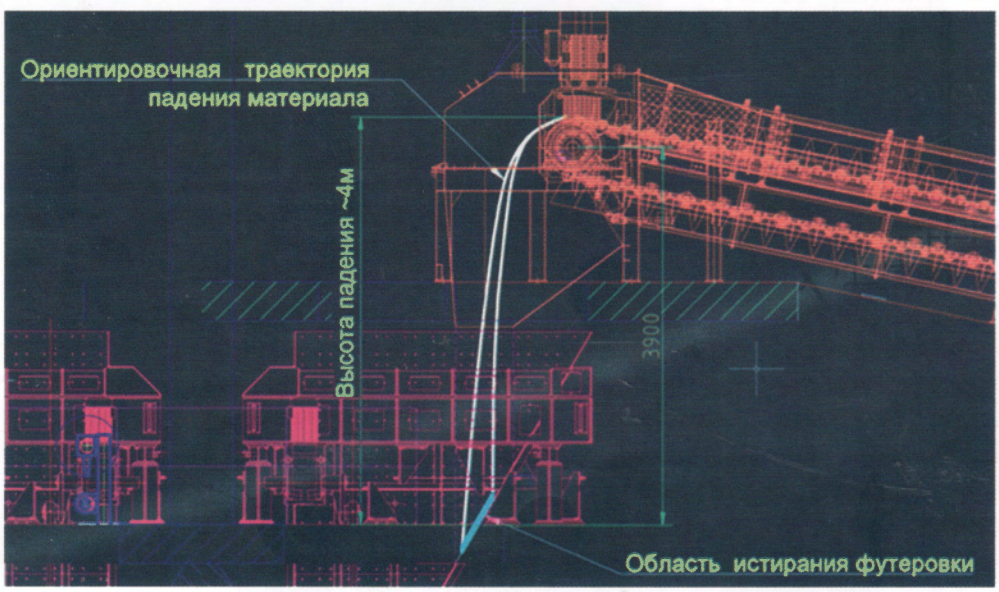


Рис. 3. Схема падения рудного материала в бункер

Результаты моделирования. Расчет проводился для различных типов взаимодействия рудного материала и футеровки. Исходя из наблюдаемой формы потока при соприкосновении со стенкой бункера (рис. 3), принимались коэффициенты восстановления нормального усилия в диапазоне 0,2 ÷ 0,3 и касательного – в диапазоне 0,7÷0,8.

Полученная модель соответствует процессу движения материала в бункере (рис. 4). Падение

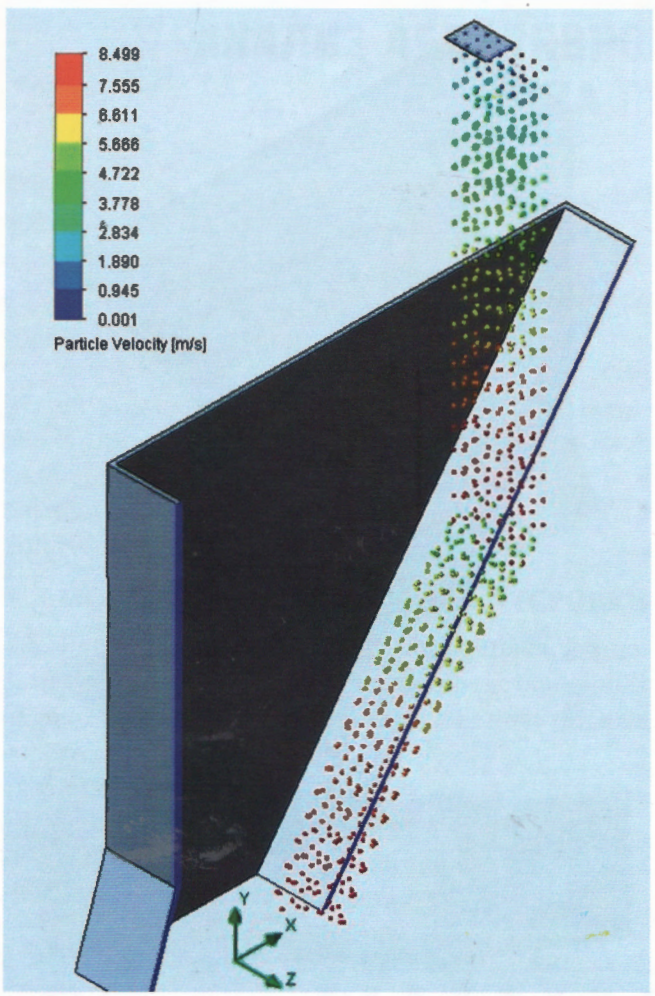


Рис. 4. График скоростей частиц и траектория рудного материала

материала происходит на наклонную стенку бункера, далее с небольшим нормальным отклонением материал продолжает движение вдоль этой стенки до прохождения нижнего отверстия.

Моделирование истирания футеровки производилось с использованием встроенной функции САПР SolidWorks Flow Simulation с учетом угла атаки, крупности материала, его температуры и шероховатости поверхности футеровки. Шероховатость поверхности принималась в соответствии с чертежами $\sqrt{Ra100}$.

Результаты моделирования износа представлены на рис. 5а, на котором хорошо видно образование зоны повышенного износа, соответствующей зоне I [2]. Согласно расчетам, скорость истирания в наиболее нагруженных участках составляет около 260 мм/год, или 21,67 мм/мес. Таким образом, полный износ футеровки в таком режиме для плит толщиной 40 мм может произойти в течение двух месяцев, что соответствует реальным результатам работы оборудования (рис. 6).

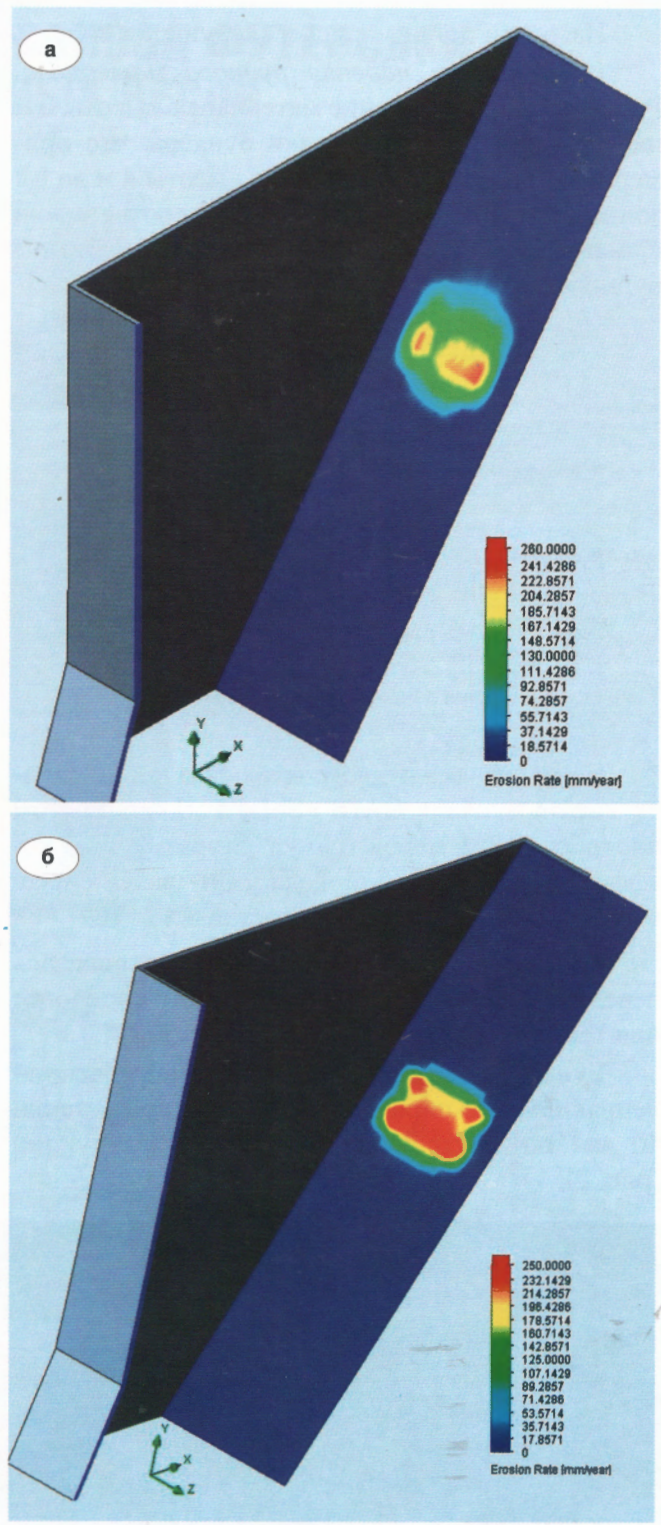


Рис. 5. График износа жестко закрепленной футеровки (а) и при наличии упругого основания (б)

Попытка моделирования износа модифицированной конструкции футеровки, расположенной на упругом основании, путем обнуления

коэффициента восстановления нормального усилия не привела к существенному уменьшению износа (см. рис. 5б). При этом износ уменьшается только на 4 %, что не дает значимого увеличения срока службы футеровки.



Рис. 6. Характер износа футеровки и конструкции бункера

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ФУТЕРОВКИ

Технические требования к конструкции бункера. Требования к проектированию монолитных и сборных железобетонных бункеров, комбинированных бункеров с вертикальными железобетонными стенками и стальными воронками, стальных бункеров жесткой и гибкой (параболической) конструкции, а также указания по износостойкой защите бункеров с широким применением неметаллической защиты (резина, пластмассы и др.), действовавшие в 1983 г., содержатся в [2]. Они разъясняют главы СНиП II-91-77 «Сооружения промышленных предприятий», СНиП II-21-75 «Бетонные и железобетонные конструкции» и СНиП II-23-81 «Стальные конструкции». Руководство распространяется на проектирование бункеров – крупноразмерных саморазгружающихся емкостей, предназначенных для временного хранения сыпучих материалов, кроме тех емкостей, которые находятся в условиях высоких температур. Это наиболее полное существующее описание нормативных требований к конструкциям такого рода.

Определение рациональных параметров износостойкой защиты. Бункеры разделяются по назначению на приемные, промежуточные или аккумулирующие и погрузочные. Бункеры должны проектироваться, как правило, железобетонными. Стальными допускается проектировать воронки, сужающиеся части бункеров, параболические (висячие) бункеры, а также бункеры, которые по технологическим условиям подвергаются механическим, химическим и температурным воздействиям сыпучего материала и не могут быть выполнены из железобетона.

Внутренние поверхности бункеров разделяются на участки, подвергающиеся износу (I и II зоны) и не подвергающиеся износу (III зона).

I-я зона – участок, подвергающийся воздействию удара и истиранию при загрузке бункера, следует защищать, как правило, металлом или резиной;

II-я зона – участок, подвергающийся истиранию сыпучим материалом в процессе выгрузки бункера, следует защищать каменным литьем, шлакоситаллом, полимерными материалами, резиной и другими материалами, а при температуре сыпучего свыше 50 °С – шлакокаменным и каменным литьем термостойких составов;

III-я зона – участок, не требующий защиты.

Износостойкую защиту рекомендуется осуществлять дифференцированно: в I-й зоне – материалами, стойкими к удару; во II-й зоне – стойкими к истиранию и в зависимости от интенсивности воздействий различной толщины.

При высокой температуре сыпучего или агрессивности сыпучей среды, определяемой по СНиП II-28-73, износостойкую защиту следует проектировать используя «Временные указания по проектированию и устройству защиты внутренних поверхностей бункеров металлургических и угольных предприятий».

Исходными данными для проектирования износостойкой защиты являются: форма и размеры бункера; схема его загрузки (положение над бункером загрузочного транспортного устройства, скорость сыпучего в момент схода с транспортного устройства, ширина потока сыпучего на транспортном загрузочном устройстве); фракция, абразивность, влажность, температура сыпучего и его химическая агрессивность (вызываемая минерализованной или технологической водой); количество сыпучего, проходящего через бункер в год; коэффициент внутреннего и внешнего трения сыпучего.

Величина (интенсивность) абразивного износа (потеря толщины, мм/год) в I-й и II-й зонах зависит от многих факторов: сопротивляемости указанному износу материала несущей конструкции или защиты, фракции и абразивности сыпучего, формы и размеров бункера; схемы его загрузки и выгрузки; количества сыпучего, проходящего через бункер за год; химической агрессивности среды (вызываемой минерализованной или технологической водой) и др. Эти данные принимаются в качестве исходных при выборе типа износостойкой защиты.

По степени абразивности сыпучие материалы подразделяются на весьма абразивные, абразивные и малоабразивные, коэффициенты крепости которых по шкале М.М. Протодьяконова соответственно составляют более 14; 13,9–8; менее 8 единиц. Степень абразивности и механические свойства некоторых сыпучих материалов приведены в таблице 2.

Исходными данными для определения положения и размеров I-й зоны износа являются схема загрузки бункера (вид, размеры и положение транспортного средства, при помощи которого загружается бункер), форма емкости и скорость сыпучего при сходе с загрузочного устройства. Выбор материала и конструкции защиты для I-й зоны износа производится с учетом энергии, которой обладает кусок сыпучего в момент, предшествующий соударению его со стенкой бункера. Исходными данными при установлении толщины конструкции защиты для I-й и II-й зон являются режим эксплуатации бункеров (количество сыпучего, проходящего через бункер в млн. т/год), размеры сыпучего и степень его абразивности, энергия, которой обладает кусок сыпучего в момент, предшествующий соударению его со стенкой бункера.

Защита на упругом основании, состоящая из износостойкого экрана и упругого основания, помещенного между экраном и стенкой бункера, наиболее целесообразна для зоны ударного износа под сыпучие материалы фракции свыше 100-0 мм. Защита из стали может применяться в бункерах под сыпучие фракции 300-0 мм и выше, когда другие технические решения защиты не могут быть использованы.

Интенсивность ударных воздействий, передающихся на стенку (защиту) бункера, может быть уменьшена путем устройства в бункере спиральных или каскадных спусков, отбойных экранов, применения рациональной схемы их загрузки и выгрузки, при которой бункер полностью не опорожняется, а удар передается на сыпучее, оставшееся в нем. Спиральные и каскадные спуски (рис. 7) уменьшают свободную высоту падения сыпучего при загрузке бункера. Они применяются, как правило, для сыпучих, измельчение которых нежелательно.

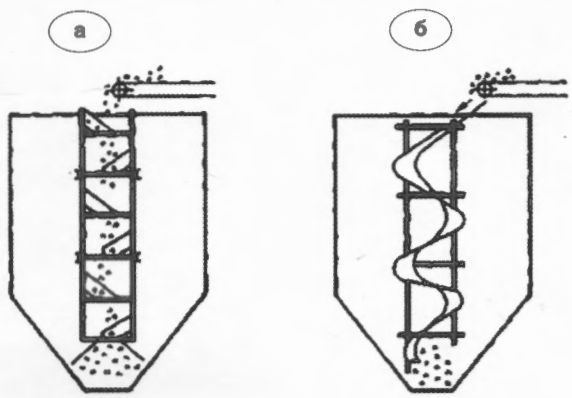


Рис. 7. Конструкция каскадного (а) и спирального (б) спуска

Отбойные экраны ставятся на пути падения сыпучего. Их назначение – гашение скорости падающих кусков и создание нужного направления их движения с тем, чтобы куски падали на сыпучее, находящееся в бункере. Материалами для устройства экранов в бункерах для сыпучих крупностью до 50 мм могут служить транспортерная лента, обрезки стальных канатов, деревянные щиты; для сыпучих свыше 50 мм – отслужившие рельсы, металлические листы и др. Отбойный экран для сыпучих крупностью более 150 мм следует собирать из отдельных элементов, не связанных друг с другом, посаженных на ось вращения.

Таблица 2

Механические свойства сыпучих материалов

Сыпучие материалы	Объемный вес, тс/м^3	Угол внутреннего трения, град	Коэффициент внешнего трения				
			каменное и шлаковое литье, ситалл	резина	дерево	сталь	бетон
Агломерат (отсев)	1,6–2,5	45	0,38–0,45	0,43	0,54	0,45	–
Антрацит	1–1,4	35	0,36–0,55	–	0,5–0,6	0,4–0,8	0,45–0,68
Апатит порошкообразный	2	31–33	–	0,63	0,63	0,6	0,55
Гипс	1,6	30–39	–	0,7–0,82	–	0,61–0,78	0,45–0,55
Глина	1,6	40–45	–	–	–	–	–
Глинозем порошкообразный	1–1,2	28–29	–	0,46–0,48	0,45–0,53	0,42–0,54	0,5
Гравий	2	26–45	–	–	–	0,58–1	–
Гранит	–	–	–	0,86	0,47–0,52	0,4–0,42	–
Доломит	1,6–2	–	–	–	0,52–0,55	0,46–0,51	–
Зола	–	40–50	–	–	1	0,6–0,85	0,84–1
Известняк	1,6–2	29–51	0,33–0,65	0,87–0,77	0,39–0,89	0,3–1	–
Известь гашеная	0,7	–	–	–	–	0,35	0,55
Известь шламовая	0,8–1,1	–	–	–	–	0,6	–
Камень	1,3–2	20	–	–	0,46–0,6	0,58–0,84	0,84
Карбид кальция	–	20	–	–	–	0,3–0,55	0,5
Кварц	1,8	–	–	–	0,6	0,4–0,5	–
Кварцит	1,4–1,6	–	–	–	0,56	0,37–0,55	–
Клинкер	–	29–33	–	–	–	–	–
Кокс	0,5–0,6	28–51	0,38–0,42	0,5–0,7	0,6–1	0,47–0,53	0,84–1
Концентрат шихтового	–	–	0,7–0,95	0,82	0,99	0,89	–
Криолит	1,2–1,35	28–48	–	0,6–0,65	0,59–0,68	0,55–0,95	–
Нефелиновый	1,5	31–40	–	0,6–0,62	0,58–0,6	0,3–0,68	0,5
Опилки древесные	0,25	31–56	–	0,51–0,65	–	0,39–0,83	–
Песок	1,6	30–40	–	0,46–0,56	–	0,32–0,8	0,58–0,84
Песчаник	–	–	–	–	0,49–0,6	0,3–0,59	–
Пыль угольная	0,7	–	–	–	–	0,32–0,77	0,64–0,73
Руда	1,8–3,5	30–41	–	–	–	0,57–0,84	–
Руда железная	2–2,6	35–37	0,54–0,65	0,65–1	0,7–0,8	0,5–1	–
Руда магнетитовая	–	–	–	–	0,47	0,46	0,52
Селитра	1,2	38–40	–	–	–	–	–
Скарп	–	–	–	–	0,54–0,6	0,35–0,49	–
Сланец	1,1	–	–	–	–	0,35–0,58	–
Сода кальцинированная	0,6	35–45	–	0,44–0,68	0,48	0,3–0,7	0,5
Соль поваренная	–	30–50	–	0,68	–	0,49	–
Сульфат аммония	0,9	40	–	–	–	–	–
Уголь каменный	1–1,5	27–45	0,4–0,6	0,55–0,7	0,7–1	0,3–0,8	0,5–0,9
Фтористый алюминий	0,9–0,95	27–36	–	0,53–0,61	0,52–0,55	0,58–0,6	–
Цемент	1,6	27–40	–	0,64	0,3–0,4	0,3–0,65	0,58
Штыб угольный	–	34–44	–	–	0,4–0,74	–	–
Щебень	2	40–45	–	–	0,3–0,6	0,47–0,63	–

Защита стенок бункеров от ударного износа сыпучим материалом (I-я зона износа). Тип конструкции защиты для I-й зоны износа следует подбирать по таблице 3.

Защита на упругом основании состоит из износостойкого экрана и упругого основания. Износостойким экраном могут служить материалы, стойкие к абразивному износу: износостойкий металл, металлоцемент М500, армированное шлакокаменное литье с повышенной ударной вязкостью и др. Износостойкий экран следует набирать из отдельных, не связанных элементов (плит), каждый из которых крепится к упругому основанию или к защищаемой поверхности болтами.

Износостойкая защита должна обладать податливостью как в направлении, перпендикулярном защищаемой конструкции, так и в касательном.

Размеры износостойких плит защиты на упругом основании следует принимать в зависимости от фракции сыпучего и скорости его в момент, предшествующий соударению с защитой (табл. 4).

При применении износостойкого экрана из металла следует, как правило, использовать износостойкие марганцовистые стали 14Г2, 09Г2, 35ГЛ и др.

Таблица 3

Определение типа защиты

Фракция сыпучего, мм	Влажность сыпучего, %	Тип защиты для I-й зоны износа				
		«самозащита»	плиты на упругом основании	резина	неметаллические материалы	сталь
1500-0	< 5	–	–	–	–	+
900-0	> 5	–	–	–	–	+
300-0	< 5	+	+	+	+	+
100-0	< 5	+	+	+	+	–
25-0	> 5	–	+	+	+	–
5-0	< 2	–	–	+	+	–
0,05-0	> 2	–	–	+	+	–

Таблица 4

Определение размеров футеровки

Фракция сыпучего, мм	Размеры износостойких плит защиты, мм, при скорости сыпучего, м/с			
	до 5	св. 5 до 10	св. 10 до 15	св. 15 до 20
300-0	300 × 300 × 20	300 × 300 × 30	300 × 300 × 40	300 × 300 × 40
	300 × 300 × 60	300 × 300 × 60	400 × 400 × 80	400 × 400 × 80
100-0	200 × 200 × 20	200 × 200 × 20	200 × 200 × 30	200 × 200 × 30
	300 × 300 × 40	300 × 300 × 40	300 × 300 × 60	300 × 300 × 60

[1] *Алямовский А.А.* SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. – ДМК Пресс, – 2015. – 562 с.

[2] Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / М.: Стройиздат. – 1983 г. – 200 с.

Надійшла 07.08.2020 р.

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА КРЕЙДО-БАЗАЛЬТОВОГО ЦЕМЕНТУ



І.І. Ніконець
Національна академія сухопутних військ імені П. Сагайдачного, НДЛ аналізу і прогнозування надзвичайних ситуацій, к.т.н.



І.М. Мартинюк
Національна академія сухопутних військ імені П. Сагайдачного, НДЛ аналізу і прогнозування надзвичайних ситуацій, к.біол.н.



Є.М. Шматов
Національна академія сухопутних військ імені П. Сагайдачного, НДЛ аналізу і прогнозування надзвичайних ситуацій



Р.В. Казмірчук
Національна академія сухопутних військ імені П. Сагайдачного, к.військ.н.

При виробництві цементу як глиняний компонент пропонуються базальтові породи, які мають низьку температуру плавлення, значний вміст оксидів заліза і найголовніше – постійний хімічний склад. Україна має значні поклади базальту, розташовані в Закарпатській, Житомирський, Вінницький, Рівненській та інших областях.

Для нас особливий інтерес має «Берестовецький спецкар'єр», що у Рівненській області, Костопільського району, с. Базальтове. По-перше, це склад: Fe_2O_3 – 15,2 %, SiO_2 – 50,3 %, CaO – 9,4 %, Al_2O_3 – 15,9 %, MgO – 5,8 %, Na_2O – 2,1 %, TiO_2 – 1,43 %. По-друге, на відстані 17 км від кар'єру базальту знаходиться кар'єр високоякісної крейди, яка є компонентом цементу.

Підібрана сировина складу

Сировина	Вміст основних оксидів, %			
	SiO_2	Fe_2O3	Al_2O_3	TiO_2
Базальт	50,3	15,2	15,9	1,43
Крейда	3,25	0,23	0,50	–

Базальт – це тверда гірська порода з $R_{тиску}$ до 3000 кгс/см^2, із вмістом скла, що надає йому крихкості. Подрібнення базальту проводилось на валковій дробарці, а потім разом із крейдою у шаровому млині. Матеріали дозувалися у співвідношенні 1:3 (крейда:базальт).

На початку помелу для інтенсифікації процесу додавали до 0,20 % СДБ (сульфатно-дріжджева барда) від ваги молотого матеріалу.

Випал виконували в обертовій печі. Час витримування у зоні спікання склав 20 хвилин. Охолодження повітряне. Клінкер мололи з додаванням 4 % – 5 % гіпсу. Температура випалювання на 100 °С нижча за температуру випалювання традиційних сировинних сумішей (1350 ÷ 1400 °С).

Як відмічалось, базальт має підвищений вміст оксидів заліза, що утворює різного роду проміжні з'єднання, які зв'язують оксиди кальцію. Реакції клінкероутворення завершуються раніше, ніж у сировинних сумішей, які мають незначний вміст оксидів заліза.

Беліт проявляється вже за температури до 900 °С.

Утворений аліт із розміром кристалів 20 мкм – 40 мкм має найбільшу гідравлічну активність. Склад отриманого крейдо-базальтового цементу: C_2S – 59,1 %; C_3S – 9,3 %; C_3A – 5,1 %; C_4AF – 23,43 %.

Нормальна частка крейдо-базальтового цементу складає 23 % – 25 %. Для крейдо-базальтових цементів характерна знижена водопотреба. Строки тужавіння – початок від 60 хв, кінець 3–4 год.

Глибокі дослідження свідчать про те, що на основі крейдо-базальтової суміші можна виробляти цемент марки 500. Взірці з цементного тіста нормальної густини продемонстрували підвищену міцність на згин.

© Ніконець І.І., Мартинюк І.М., Шматов Є.М., Казмірчук Р.В.

Крейдо-базальтовий цемент у взірцях характеризується повільним зростанням міцності на стиск, яка постійно збільшується. Особливо відмічається підвищення міцності після шести місяців твердіння.

Проведені термографічні, рентгенографічні, ІЧ-спектральні, електронно-мікроскопічні аналізи, які виконувалися паралельно з аналізами зі звичайними цементними взірцями, підтвердили повільне нарощування міцності крейдо-базальтових взірців і вирівнювання цих показників із часом.

Електронно-мікроскопічні дослідження показали, що для каменю на основі беліту характерним є процес збиральної рекристалізації, яка призводить до його омонолічування.

В алітовому цементному камені водночас відбуваються: гідратація аліту з утворенням гідросилікатів кальцію; гідроліз останніх зі зменшенням основності і виділення гідрооксиду кальцію, який мігрує по порах каменю.

Це призводить до одночасного існування в алітному цементному камені гідросилікатів кальцію різної основності.

Менш основні гідросилікати кальцію кристалізуються в псевдоморфозах і не змінюють мікроструктуру каменю на основі аліту.

Постійна міграція гідрооксиду кальцію в алітовому цементному камені зберігає його субмікроскопічну пористість протягом твердіння і, як наслідок, – високу водопроникність.

З метою покращення властивостей крейдо-базальтового цементу і виробів на його основі застосовують наступні нанотехнології:

1) Введення нанодомішок: С – вуглецеві фулерени; SiO_2 – діоксиди кремнію з відходів.

Вуглецевий фулерен прискорює процес гідратації крейдо-базальтового цементу.

SiO_2 в результаті реакції з $Ca(OH)_2$ переходить у гідросилікат кальцію і сприяє зменшенню кількості пор від розміру 1 нм і більше.

2) Домелення цементу вище 3000 $см^2/г$. В домеленому цементі частки вступають в реакцію з водою на 80 % – 90 % їх об'єму. Відповідно, на отримання виробу з цементу потрібно менше води.

3) Для виготовлення міцнісної системи цементних структур використовували структуровану воду. При змішуванні структурованої води з нанодомішками змінюється величина воднево-го показника: спостерігається тенденція переходу у кисле середовище.

Виявлене підкислювання системи сприятливо позначається на особливостях реології цементної системи.

4) З метою отримання легких конструктивних бетонів на основі зазначеного цементу використовували базальтову мікрофібру як арматуру. Це знижує вагу майже на третину.

Легкий наномодифікований бетон можна рекомендувати для використання:

а) у висотному та підземному будівництві;

б) у конструкціях зі значними прогонами;

в) а також при будівництві в сейсмонебезпечних районах.

Надійшла 27.10.2020 р.

ВИДАВНИЦТВО «СТАЛЬ» – ЦЕ ДИЗАЙН ТА ЯКІСНА ПОЛІГРАФІЯ

Видавництво «Сталь», що входить до складу ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського», має багаторічний досвід видавничої та поліграфічної роботи. Наша діяльність спрямована на задоволення видавничо-поліграфічних потреб науковців та інженерно-технічних працівників промислової галузі, а також на популяризацію вітчизняної поліграфічної продукції.

Видавництво «Сталь» надає як поліграфічні, так і видавничі послуги

- **ДОДРУКАРСЬКА ПІДГОТОВКА: редагування, дизайн, макетування, верстка.**
- **ДРУК: офсетний, тиражування на ризографі формату А3 будь-якої поліграфічної продукції**
- **ПІСЛЯДРУКАРСЬКА ПІДГОТОВКА: тверді та м'які палітурні роботи, термобіндер, прошивання ниткою та скобою, листопідбирання, ламінування, позолотне та конгревне тиснення, реставрація тощо.**



За бажанням замовника видавництво надає послуги з присвоєння книжковим видання ISBN – міжнародного стандартного номера, необхідного для розповсюдження книжки в торговельній мережі та автоматизації роботи з конкретним виданням.

Продукція видавництва «СТАЛЬ» відповідає найсучаснішим вимогам щодо художнього оформлення, дизайну, поліграфічного виконання.

02125, м. Київ, вул. Віталія Шимановського, 2/1,
e-mail: tov_steel@ukr.net
516-55-92, 229-83-51, 095-277-69-28, 097-293-36-91, 063-984-52-11

ДО ВІДОМА ДОПИСУВАЧІВ ЖУРНАЛУ !

Вимоги щодо публікації статей:

- Текст статті в електронному виді, авторська довідка, підготовлені у Microsoft Word та фото авторів. Наукові статті мають супроводжуватись анотацією (1200–1500 знаків) мовою статті та англійською, ключовими словами, УДК.
- Ілюстрації надаються підготовленими у Adobe Photoshop або Microsoft Word, Excel чи на паперових носіях для сканування. Формат надання – tif, eps, jpg, pcx, doc, docx – 300 dpi.
- Авторська довідка має містити наступні дані: прізвище, ім'я та по батькові повністю, місце роботи, посада, науковий ступінь, вчені звання, а також номер контактного телефону та електронну адресу.

ЖУРНАЛ МОЖНА ПЕРЕДПЛАТИТИ У БУДЬ-ЯКОМУ ВІДДІЛЕННІ ДП «ПРЕСА» (передплатний індекс – 98848) АБО ЗАМОВИТИ У РЕДАКЦІЇ ЖУРНАЛУ

Видавець ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського»

Рекомендовано до друку вченою радою ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського» (протокол № 1 від 11.03.2021 р.)

Адреса редакції та видавця: вул. В. Шимановського, 2/1, Київ, 02125, ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського»

тел. (044) 516-52-85, 543-98-36 e-mail: redakpbis@urdisc.com.ua

Оригінал-макет підготовлений редакцією журналу «Промислове будівництво та інженерні споруди»

Комп'ютерна верстка та дизайн – **Цапро Т.І.**

Дизайн обкладинки – **Артюшенко В.С.**

Підписано до друку 11.03.2021 р. Формат 60 × 84/8. Папір крейдяний. Друк офсетний. Ум.-друк. арк. 8,1. Тираж 300 прим.

Віддруковано ТОВ «Поліпринт», вул. Лугова, 1-А, м. Київ, 04074, тел. 464-17-91

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1250 від 22.02.2003 р.

* **Оформлення, стиль та зміст журналу є об'єктом авторського права і захищається законом**
* **Передрук розміщених у журналі матеріалів дозволяється тільки за письмовою згодою редакції**
* **Відповідальність за підбір та висвітлення фактів у статтях несуть автори**
* **За зміст реклами відповідає подавач**
* **Редакція не завжди поділяє думку авторів**
* **Редакція залишає за собою право редагувати та скорочувати подані матеріали**