ISSN 1996-8159

ПБіС
4'2019

ПРОМИСЛОВЕ БУДІВНИЦТВО ТА ІНЖЕНЕРНІ СПОРУДИ

Українському інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського

75 років

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 2019 — 2020 роки

Абель Д., д.т.н., проф. (США)
Агощ З., д.т.н., проф. (Словаччина)
Белоєв М., к.т.н. (Болгарія)
Ведяков І.І., д.т.н., проф. (Росія)
Грінченко В.Т., академік НАНУ, д.т.н., проф. (Україна)
Зюлко Є., д.т.н., проф. (Польща)
Каравайченко М.Г., д.т.н., проф. (Росія)
Като Ш., д.т.н., проф. (Японія)
Кульбах В., академік НАНЕ, д.т.н., проф. (Естонія)
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

ПБС 4'2019

ПРОМИСЛОВЕ БУДІВНИЦТВО ТА ІНЖЕНЕРНІ СПОРУДИ

Виходить 4 рази на рік

Заснований у листопаді 2007 року

ЗМІСТ

УКРАЇНСЬКОМУ ІНСТИТУТУ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ІМЕНІ В.М. ШИМАНОВСЬКОГО – 75 РОКІВ

О.В. Шимановський
СЛАВЕТНИЙ ШЛЯХ ТВОРЕННЯ — ДО 75-РІЧЧЯ ТОВ «УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ІМЕНІ В.М. ШИМАНОВСЬКОГО» 4

В.Н. Гордеев
ОТ САРКОФАГА ДО НОВОГО БЕЗОПАСНОГО КОНФАЙНМЕНТА 9

МОСТОВІ СПОРУДИ

О.В. Шимановський, В.В. Шалінський
ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОСТА ЧЕРЕЗ АВАНКАМЕРУ АВТОДОРОЖНЬОГО ПЕРЕЇЗДУ ФІЛІЇ «ДНІПРОВСЬКА ГЕС» 23

БЕЗПЕКА БУДІВЕЛЬ

О.В. Шимановський
ОСОБЛИВОСТІ ВИБУХОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ПРАКТИЧНІ ПРИЙОМИ ЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ ВІД ВИБУХУ 28

НАУКА – ВИРОБНИЦТВУ

О.А. Марченко
ПРОДУКТИВНІСТЬ РУЧНИХ МАШИН ПІД ЧАС РОБОТИ З АБРАЗИВНИМИ АРМОВАНИМИ КРУГАМИ 33

А.И. Сиянов
МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАБОТА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СЕТЧАТОЙ ОБОЛОЧКИ С ОПОРНЫМИ РЕБРАМИ ПОВЫШЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ 38

Л.М. Рабер, В.К. Сидоренко, А.Е. Червинский
МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К НОРМИРОВАНИЮ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЗАТЯЖКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БОЛТОВ 42

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

І.І. Ніконець, І.М. Мартинюк, Є.М. Шматов, О.М. Стаднічук
ЕЛЕКТРОННО-МІКРОСКОПІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧОТИРЬОХ ВИДІВ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТІВ, ГІДРАТОВАНИХ ВІД МОМЕНТУ ЗАМІШУВАННЯ ВОДОЮ ДО ОДНОГО РОКУ 45

Згідно з наказом МОН України від 13.03.2017 р. № 374 журнал включено до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук

Київ • 2019

© Промислове будівництво та інженерні споруди, 2019

Шановні колеги!

Від імені колективу Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та від себе особисто щиро вітаю вас із 75-річчям від дня заснування ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського»

Створене після звільнення м. Києва від німецько-фашистських загарбників особливе проектне бюро з метою відновлення зруйнованих мостових споруд, а також відбудови об'єктів промислового і цивільного призначення з часом перетворилось у провідний вітчизняний науково-дослідний та проектний інститут у галузі металобудівництва.

Самовіддана праця колективу інституту за роки славетного творчого шляху була спрямована на розроблення тисячі проектів будівель і споруд як в Україні, так і за її межами із застосуванням металевих конструкцій. У цьому переліку мостові споруди, в тому числі перший у вітчизняній практиці суцільнозварний автомобільний міст ім. Є.О. Патона через р. Дніпро, телевізійні вежі у м. Києві та країнах СНД, великопрогонові корпуси підприємств базових галузей промисловості, спортивні та громадські об'єкти й інженерні споруди.

Науковці інституту роблять вагомий внесок у вирішення питань підвищення експлуатаційної надійності та довговічності відповідальних об'єктів шляхом визначення їхнього технічного стану і залишкового ресурсу для встановлення науково обгрунтованих строків експлуатації будівельних металевих конструкцій.

Провідні спеціалісти інституту починаючи з 1986 року брали активну участь у програмі локалізації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС, а також у подальшому перетворенні разом із міжнародними партнерами об'єкта «Укриття» в екологічно безпечну систему.

Приємно відзначити, що найбільш значні та складні в інженерному плані об'єкти створювались колективом вашого інституту у творчій співпраці з фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

З нагоди 75-річчя бажаю колективу інституту творчої наснаги у продовженні славних традицій багатьох поколінь науковців і проектувальників і відданою працею сприяти розвитку металобудівництва для подальшого зростання економіки України.

З повагою,
директор інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України, академік **Б.Є. Патон**

Шановні колеги!

Від імені президії Академії будівництва України щиро вітаю Вас із 75-річним ювілеєм інституту!

Інститут «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського» є базовою науково-технічною організацією будівельної галузі із визначення технічної політики і виконує науково-технічне, дослідне, нормативно-методичне та інформаційне забезпечення будівництва та експлуатації металевих конструкцій будівель і споруд.

У трудовому літопису інституту значний перелік розроблених і впроваджених сучасних проектів будівництва всього спектра промислових, громадських і цивільних будівель та інженерних споруд як в Україні, так і у багатьох країнах світу.

Більше 20 років інститут активно співпрацює із Академією будівництва України у сфері визначення пріоритетних напрямків розвитку будівельного комплексу, консолідації творчого потенціалу Академії і спрямування його на відтворення та забезпечення високого рівня виробництва у фондоутворювальній галузі народного господарства. До складу галузевих і територіальних відділень Академії входять відомі вчені і фахівці вашого закладу, які на постійній основі залучені до розроблення новітніх інноваційних проектів, сучасної нормативної бази, підготовки спеціалістів для будівельної галузі.

Висловлюю щиру вдячність працівникам інституту і маю надію на нашу подальшу плідну співпрацю.

З нагоди 75-річчя від дня заснування інституту прийміть щирі вітання і побажання славетному колективу доброго здоров'я, злагоди та добробуту.

З повагою,
президент АБУ **І.І. Назаренко**

Генеральному директору
ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського»
Шимановському О.В.

Шановний Олександре Віталійовичу!

Від імені Міністерства розвитку громад та територій України щиро вітаю Вас і колектив інституту з 75-річним ювілеєм!

Колектив Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського має широке визнання у професійних колах будівельної спільноти як провідна науково-технічна організація будівельного комплексу України із визначення технічної політики у галузі металобудівництва, яка здійснюється на засаді проведення наукових досліджень, сучасних проектних рішень металевих конструкцій для об'єктів базових галузей економіки і інженерно-транспортної інфраструктури, нормативного забезпечення та обміну передовим досвідом.

Високий рівень фахової підготовки і набутий досвід спеціалістів інституту реалізовані у великій кількості проектів при спорудженні об'єктів енергетики, металургії, хімії, авіації, транспорту, зв'язку, будіндустрії, а також об'єктів громадського призначення, в тому числі спортивного.

Неоціненним є вклад інституту у створення вітчизняної школи проектування і методів розрахунку металевих конструкцій та створення на їх основі систем автоматизованого проектування, обстежень існуючих сталевих конструкцій і розроблення технічних рішень і проектів із забезпечення їх тривалої безпечної експлуатації.

Фахівці інституту брали активну участь у ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС і перетворенні об'єкта «Укриття» в екологічно безпечну систему.

Вимоги сьогодення до подальшої розбудови економіки України потребують розроблення новітніх проектів, втілення яких сприятиме підвищенню якісного і технічного рівня будівельної галузі.

Попереду — багато практичної роботи і творчих звершень. Переконаний, що колектив інституту успішно впорається із поставленими завданнями.

Бажаю Вам, Олександре Віталійовичу, і кожному працівнику інституту здоров'я, творчих успіхів та нових здобутків на благо України.

З повагою,
заступник Міністра
із питань євроінтеграції **Ю.М. Чаплінський**

Шановні колеги!

Від імені членів Асоціації «Український центр сталевого будівництва» щиро вітаю колектив інституту «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського» із 75-річним ювілеєм!

Професійна спільнота галузі металобудівництва висловлює вам щиру вдячність за багаторічне співробітництво задля підвищення технічного і якісного рівня проектування, виготовлення та монтажу сталевих будівельних конструкцій.

На повагу і визнання заслуговує діяльність фахівців інституту з реалізації галузевих науково-технічних заходів із підвищення рівня конкурентоспроможності вітчизняного металобудівництва, розвитку систем нормування і стандартизації, обміну передовим досвідом, підвищення кваліфікації, формування вітчизняної школи проектування металевих конструкцій.

Знання і досвід спеціалістів вашого колективу є запорукою успіху у співпраці інституту із членами Асоціації, опануванні сучасних проектних рішень, розробленні і впровадженні ефективних конструкцій і технологій монтажних робіт на будівельному ринку.

Прийміть найкращі побажання з нагоди 75-річчя інституту, міцного вам здоров'я, творчої наснаги та нових звершень.

З повагою,
виконавчий директор **В.А. Колісник**

СЛАВЕТНИЙ ШЛЯХ ТВОРЕННЯ — ДО 75-РІЧЧЯ ТОВ «УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ІМЕНІ В.М. ШИМАНОВСЬКОГО»

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

овариство з обмеженою відповідальністю «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського» є галузевою комплексною науково-дослідною і проектною організацією, що спеціалізується на дослідженні та проектуванні будівельних металоконструкцій. Історія інституту бере початок із грудня 1944 року, коли у м. Києві після його звільнення від німецько-фашистських загарбників було відкрито Особливе проектне бюро з відновлення мостів, на базі якого в 1960 році було створено Державний проектний інститут «Укрпроектстальконструкція». У 1983 році його було реорганізовано в науково-дослідний та проектний інститут, що став на терені колишнього СРСР одним із провідних науково-дослідних інститутів у галузі металевих конструкцій. У 1994 році на виконання рішень державної програми щодо змін форм власності суб'єктів господарювання інститут було перетворено у Відкрите акціонерне товариство «УкрНДІпроектстальконструкція», а в 2010 році – у Товариство з обмеженою відповідальністю «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського». У 1980–2000 роках інститутом керував видатний вчений – член-кореспондент Національної академії наук України, дійсний член Академії будівництва України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, професор Віталій Миколайович Шимановський, який зробив важливий внесок у підняття статусу інституту, становлення і розвиток його наукових шкіл, розширення тематики наукових досліджень, зміцнення матеріально-технічної та експериментальної бази. Відзначаючи ці вагомі досягнення, у 2001 році інститут було названо його ім'ям.

У теперішній час ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського» є головним науково-дослідним і проектним інститутом сталевих конструкцій будівельного комплексу України, який визначає технічну політику в галузі металобудівництва й формує нормативну базу для розрахунків і проектування сталевих і алюмінієвих конструкцій. Це знайшло відображення в рішеннях:

- Кабінету Міністрів України, згідно з якими інститут увійшов до переліку підприємств, які мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави;
- Мінрегіонбуду України, згідно з якими інститут за результатами державної атестації галузевих науково-дослідних організацій атестовано та віднесено до групи «А» (організації, що можуть визначати та впливати на державну науково-технічну політику) і надано статусу базової організації з науково-технічної діяльності у галузі будівництва за напрямом науково-технічне, дослідне, нормативно-методичне та інформаційне забезпечення проектування, будівництва та експлуатації металевих конструкцій будівель і споруд;
- Міністерства освіти і науки України, згідно з якими інститут внесено до Державного реєстру наукових установ, яким надається підтримка держави.

Організаційна структура інституту включає вісім комплексів: науково-дослідний, проектний, виготовлення та монтажу металоконструкцій, адміністративно-управлінський, фінансово-економічний, адміністративно-правовий, експлуатації та розвитку і комплекс відокремлених структурних підрозділів. До складу комплексу з виготовлення та монтажу металоконструкцій входить Броварський завод металоконструкцій загальною площею 7000 м^2, обладнаний сучасним технологічним і високопродуктивним металообробним, зварювальним, випробувальним, вантажопідйомальним і автотранспортним обладнанням. Броварський завод металоконструкцій спроможний виготовляти металоконструкції промислових і цивільних будівель та інженерних споруд (як

правило, із застосуванням труб) високої якості обсягом біля 2000 т металоконструкцій на рік.

Інститут має розгалужену територіальну структуру. Центральне виробництво розташовано у м. Києві, а відокремлені структурні підрозділи – у містах Маріуполі, Харкові, Дніпрі, Полтаві, Броварах, Луганську, Макіївці та Одесі. Проте відокремлені структурні підрозділи у містах Луганську та Макіївці починаючи з 2014 року припинили свою виробничу діяльність внаслідок неоголошеної (іншою мовою – гібридної) російсько-української війни та реальних воєнних дій в окремих районах Донецької і Луганської областей.

Основними напрямами діяльності інституту є:

- виконання науково-дослідних і проектних робіт у галузях енергетики, залізничного і автомобільного транспорту, авіації й космонавтики, телекомунікацій, радіо і телебачення, металургії, суднобудуванні, харчовій промисловості, будівельній індустрії, житловому будівництві, об'єктах громадського (у т.ч. спортивного) і цивільного призначення;
- експертиза проектів, обстеження технічного стану існуючих металоконструкцій усього спектра промислових, громадських і цивільних будівель, споруд і вантажопідіймальних механізмів й розроблення методів, технічних рішень і проектів із їх підсилення й реконструкції;
- розроблення, виготовлення та експериментальне дослідження нових прогресивних типів металевих конструкцій;
- розроблення методів і алгоритмів розрахунку металевих конструкцій будівель і споруд та створення на їхній основі систем автоматизованого проектування;
- реалізація програм локалізації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС і перетворення об'єкта «Укриття» в екологічно безпечну систему в рамках міжнародного проекту SIP (Shelter Implementation Plan);
- створення нормативної бази будівництва в Україні та на міждержавному рівні.

Інженерний і науковий потенціал інституту складають фахівці, які працюють у галузі десятки років. При загальній кількості 280 працівників, 230 є дипломованими інженерами, 18 з яких мають наукові ступені докторів і кандидатів наук. В інституті працюють один член-кореспондент Національної академії наук України, сімнадцять дійсних членів і чотири члени-кореспонденти українських і п'ять дійсних членів міжнародних галузевих академій та асоціацій. Багато працівників інституту за трудові досягнення були удостоєні Державних премій України та СРСР у галузі науки і техніки, премій Ради міністрів СРСР, нагороджені орденами, медалями та відзнаками Президента України, Почесними грамотами Верховної Ради та Кабінету Міністрів України, міністерств і відомств, відзначено званнями заслужених будівельників і діячів науки і техніки. Кожного року інститут поповнюється молодими спеціалістами – випускниками вищих навчальних закладів.

Інститут бере активну участь у діяльності фахової будівельної спільноти. В Академії будівництва України три галузеві відділення – «Будівельні конструкції та споруди», «Монтажні та спеціальні види робіт», «Будівництво нафтогазопроводів, баз та сховищ (терміналів)» – були створені й активно працюють за участю науково-технічних працівників інституту. У складі Асоціації «Український центр сталевого будівництва» інститут впроваджує найновіші світові практики та інноваційні рішення у галузі сталевого будівництва.

Фахівці Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського відомі в професійних колах багатьох країн світу. Вони беруть активну участь у роботі міжнародних з'їздів та конференцій, є авторами понад 360 патентів та винаходів, 1670 статей та доповідей, 210 монографій. З часу створення інституту його фахівцями розроблено більше 32 тисяч проектів металевих конструкцій для будівництва нових і реконструкції діючих промислових і цивільних споруд у 42 країнах світу.

Серед найбільш важливих об'єктів, у проектуванні та будівництві яких брав участь інститут, – Ново-Липецький, Орсько-Халіловський, Руставський та Сарканайський металургійні комбінати; завод «Електросталь» ім. І.Ф. Тевосяна; металургійні заводи в м. Бокаро (Індія), м. Сейдишехері (Туреччина), м. Аннабі (Алжир), м. Аджаокуті (Нігерія); ангарні корпуси в аеропортах міст Борисполя, Донецька, Миколаєва, Шереметьєва, Внукова, Куйбишева, Якутська, Магадана, Гавани; телевізійні вежі в містах Санкт-Петербурзі, Києві, Єревані, Ташкенті, Харкові, Тбілісі; мостові переходи через р. Дніпро – ім. Є.О.Патона в м. Києві та по греблі Дніпрогесу в м. Запоріжжі, через р. Смотрич у м. Кам'янець-Подільському; споруди

морських причалів, резервуари і газгольдери, ангари для ремонту авіатехніки, монументи, склади та сховища.

З 1986 року інститут бере активну участь у програмах локалізації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС. За участю його провідних спеціалістів виконано проектування несних конструкцій покриття існуючого об'єкта «Укриття» й стабілізації та підсилення вентиляційної труби 3-го і 4-го енергоблоків цієї станції. Поза тим проведено значну роботу з адаптації проекту Нового безпечного конфайнмента до вимог чинних українських норм і проведено дублюючі розрахунки його несних конструкцій, здійснено авторський нагляд за розробленням його металевих конструкцій на заводі з виготовлення унікальних та великогабаритних металоконструкцій Cimolai в м. Порденоне (Італія) і виконано проектування вентиляційної труби Нового безпечного конфайнмента. Напрацьована в інституті база даних містить об'єкти, які становлять значний промисловий та воєнно-промисловий потенціал.

За генеральними проектами інституту практично створена індустрія виготовлення металевих конструкцій в Україні – побудовано та реконструйовано Житомирські заводи металевих та огороджувальних конструкцій; Кам'янець-Подільський завод легких металевих конструкцій; Дніпропетровський ім. І.В. Бабушкіна, Маріупольський, Запорізький, Миколаївський заводи металевих конструкцій; Броварський завод алюмінієвих конструкцій. У Російській Федерації за проектами інституту побудовано Шадринський, Батайський та Виксуньський заводи металевих конструкцій.

Серед об'єктів останніх років, проектування яких виконано фахівцями інституту, можна відзначити: відділення безперервного лиття сталі на Алчевському, Єнакієвському, Таганрозькому та Дніпропетровському ім. Г.І. Петровського металургійних комбінатах; відділення оцинкування автолиста на Череповецькому металургійному комбінаті; трубопрокатний цех Виксуньського заводу металевих конструкцій; комплекс будівель і споруд термінала перевантаження технічної сірки унікального морського торгового порту в м. Усть-Лузі (Російська Федерація), який має пропускну спроможність до 10 млн. тонн сірки на рік і здатен приймати судна водотоннажністю до 70000 тонн; комплекс сушки та грануляції флотаційно-збагачувальної фабрики гірничо-збагачувального комбінату потужністю 1,4 млн. тонн хлориду калія на рік на базі Гарликського родовища калійних солей у Лебапському велаяті Туркменістану; цех грануляції шроту маслоекстракційного заводу в м. Полтаві; резервуарні парки нафтопроводу Одеса–Броди в містах Південному і Бродах, нафтопереробних заводів у містах Ужгороді й Надвірній, нафтотермінала в м. Чорноморську; вокзальний комплекс станції Київ-Пасажирський; монумент на честь проголошення незалежності України й низку інших.

Розвиток торгівлі в країні призвів до будівництва багатьох нових торгових і виставкових будівель. Багато будинків зводяться в металевих конструкціях за проектами інституту. Характерними прикладами таких виставкових центрів є Міжнародний виставковий центр і Національний комплекс «Експоцентр України» в м. Києві. Що ж стосується великих торгових центрів, то в першу чергу слід відзначити проекти інституту для торгової мережі «Епіцентр К», центри якої будуються в м. Києві – на Окружній дорозі і в Дарницькому районі, в містах Полтаві, Харкові, Львові, Чернівцях, Одесі. Подібними є торгові центри «Нова лінія», побудовані в селищі Чабани під м. Києвом й містах Дніпрі та Харкові, а також мережа суспільно-торгових центрів «Amstor» у містах Донецьку, Запоріжжі, Маріуполі. В даний час набувають поширення великі торгово-розважальні центри багатофункціонального призначення «Караван», «Гулівер», «Рівер Молл» та інші.

Також слід відзначити обстеження та проекти реконструкції доменних печей № 2, 3, 4 і 6 металургійного комбінату «Азовсталь» й № 2 і 5 металургійного комбінату ім. Ілліча, агломераційного цеху металургійного комбінату «Запоріжсталь», реконструкцію й обстеження київських позакласних мостів через р. Дніпро – ім. Є.О. Патона, Дарницького залізнично-автомобільного, висячого Паркового на Труханів острів, Вантового через гавань і багатьох інших.

Особливий наголос слід зробити на важливих спортивних об'єктах, опрацьованих або адаптованих останнім часом фахівцями інституту, у тому числі пов'язаних із чемпіонатом Європи 2012 року з футболу, а саме: стадіонах ОСК «Металіст» у м. Харкові, НСК «Олімпійський» у м. Києві, «Арена Львів» у м. Львові, «Дніпро Арена» у м. Дніпро, ФК «Динамо» ім. В.В. Лобановського у м. Києві, «Донбас Арена» у м. Донецьку, СК «Металург» у м. Бахмуті, СК «Юві-

лейний» у м. Суми, БК «Азовмаш» у м. Маріуполі, СТЦ ім. В.В. Лобановського та СК «Спартак» у м. Києві, фізкультурно-спортивний комплекс «Олімп» у м. Південному Одеської області, спортивно-оздоровчому комплексі «Центр фристайлу» у м. Мінську, Палаці ігрових видів спорту у м. Львові та інших. Про високий рівень проектів яскраво свідчить факт відзначення їхніх авторів високими державними нагородами, в тому числі Державними преміями України і званням заслуженого будівельника України.

Останнім часом інститут успішно розширює сфери свого впливу і освоює нові важливі напрями діяльності, серед яких в першу чергу необхідно виділити виконання функцій генерального підрядника, в тому числі для низки об'єктів державного і національного значення. Таким чином інститут виконує у тісній взаємодії із замовниками замкнений комплекс робіт: наукові дослідження – проектування – виготовлення – монтаж металоконструкцій, тобто працює «під ключ».

Серед відомих об'єктів, виконаних останнім часом саме за цією технологією замкненого комплексу робіт, можна відзначити будівництво складської триповерхової будівлі і транспортної галереї для фармацевтичної фірми «Дарниця» в м. Києві, виробничого корпусу № 5 ВАТ «Ветропак Гостомельський склозавод» у м. Гостомель і торгово-складського корпусу ПТК «Агромат» у м. Києві.

Інститут є ініціатором упровадження у вітчизняне будівництво нових технічних рішень у галузі монтажу, таких як метод підрощування та метод насування, автором інших оригінальних технічних і технологічних розробок. Зазначені рішення і розробки були не тільки впроваджені при проектуванні й будівництві великої кількості об'єктів, серед яких можна відмітити Київську телевізійну вежу, Велику високовольтну залу в м. Запоріжжі, цехи холодної і гарячої прокатки вуглецевих сталей на Ново-Липецькому металургійному комбінаті, завод радіально-свердлувальних верстатів у м. Одесі, монумент Матері-Батьківщини музею Великої Вітчизняної війни й будівлю культурного центру «Український дім» у м. Києві тощо, а й відзначені високими урядовими нагородами України і СРСР.

При визначенні технічної політики в галузі металобудівництва інститутом приділяється значна увага співпраці з органами державної влади. Інститут є одним із ініціаторів прийняття Кабінетом Міністрів України Постанов № 409 від 5 травня 1997 року «Про забезпечення надійності й безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж», № 985 від 8 вересня 1997 року «Про усунення аварійної ситуації на автошляховому переході греблі Дніпрогесу» і № 1313 від 22 серпня 2000 року «Про затвердження Програми запобігання та реагування на надзвичайні ситуації техногенного і природного характеру на 2000–2005 рр.».

За активної участі спеціалістів інституту проводиться робота Міжвідомчої комісії з питань науково-технологічної безпеки при Раді національної безпеки та оборони України, Науково-координаційної та експертної ради з питань ресурсу та безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин при президії Національної академії наук України та Науково-технічної ради Мінрегіонбуду України. Інститут, як базова організація Мінрегіонбуду України, взяв безпосередню участь у виконанні доручення Президента України N 1-1/509 від 17 квітня 2002 р. при розробленні Концепції Державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки (в частині будівельних металевих конструкцій), яка схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів N 351-р від 11 червня 2003 р. Цією Концепцією передбачається розроблення Державної науково-технічної програми «Ресурс», а також галузевих і регіональних програм, на які покладається здійснення заходів щодо реалізації державної політики із забезпечення надійності й безпечної експлуатації будівель і споруд у певній галузі або регіоні. Співпрацюючи з Донецьким науковим центром Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, інститут силами свого Донбаського центру технологічної безпеки забезпечив впровадження Державної науково-технічної програми «Ресурс» у Донбасі й брав участь у розробленні протягом 2010–2012 років єдиної державної системи підготовки, перепідготовки та атестації фахівців-експертів із технологічної безпеки будівель і споруд.

Як було зазначено вище, інститут є головною науково-дослідною та проектною організацією в галузі металобудівництва України. Дослідження, що проводяться в інституті, відрізняються високим науковим рівнем і широтою тематики.

Головними з них є:

- забезпечення надійності та безпечної експлуатації будівель, споруд й інженерних мереж;
- прогнозування та визначення шляхів розвитку металоконструкцій;
- розроблення й дослідження нових типів металевих конструкцій для пріоритетних напрямів науки й техніки;
- розроблення методів і технічних рішень із підсилення й реконструкції будівельних металоконструкцій;
- створення оптимальних уніфікованих зварних конструкцій, сортаментів гнутих та гнутозварюваних профілів;
- розроблення й удосконалення методів розрахунку металевих конструкцій будівель та споруд і створення на їхній основі систем автоматизованого проектування;
- розроблення інформаційних систем і баз даних.

Інститут виконує функції секретаріату Технічного комітету стандартизації ТК 301 «Металобудівництво», який наразі є центром із розроблення і удосконалення існуючої національної гілки стандартизації, а також системної гармонізації міжнародних та європейських стандартів.

Особлива увага приділяється в інституті створенню нової нормативної бази будівництва. Тільки останнім часом розроблено 130 нормативних документів, серед яких такі вагомі, як:

— у сфері нормування:

- ДБН «Загальні принципи забезпечення надійності і безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ»;
- ДБН «Навантаження і впливи. Норми проектування»;
- ДБН «Сталеві конструкції»;
- ДБН «Алюмінієві конструкції»;

— у сфері стандартизації:

- ДСТУ «Конструкції сталеві. Вимоги до виготовлення»;
- ДСТУ «Конструкції сталеві. Вимоги до монтажу»;
- ДСТУ «Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування»;
- ДСТУ «Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються»;

— а також гармонізовані:

- Єврокод 3. «Проектування сталевих конструкцій»;
- базові євростандарти із виготовлення та монтажу сталевих і алюмінієвих конструкцій.

У ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського» створені наукові школи, які визнані не тільки в Україні, а і поза її межами. Це такі школи, як:

- теорії розрахунку й проектування лінійно-протяжних і великопрогонових просторових конструкцій будівель і споруд;
- оптимального проектування металевих конструкцій;
- теорії надійності споруд;
- теорії розрахунку й проектування висотних споруд;
- формоутворення конструкцій;
- убезпечення будівель та інженерних споруд від можливих терористичних нападів;
- автоматизації розрахунку і проектування просторових конструкцій будівель та інженерних споруд.

Розвиток і застосування сучасних обчислювальних комплексів дає змогу фахівцям інституту виконувати розрахунки об'єктів будь-якого ступеня складності та проводити оригінальні дослідження стосовно статики та динаміки споруд, нелінійних висячих і вантових систем, різноманітних динамічних ефектів і впливів, надійності при змінних навантаженнях, пружнопластичної роботи матеріалу, оптимального проектування, уніфікації елементів, розробки сортаментів тощо.

Наявність в інституті значного наукового потенціалу, відповідної організаційної структури та матеріальної бази сприяє вирішенню одного з найактуальніших питань сьогодення – залученню молодих спеціалістів до науково-технічного процесу в будівельній галузі й підготовці кадрів вищої кваліфікації, які будуть безпосередньо впроваджувати в практику результати наукових досліджень.

Багаторічний досвід і професіоналізм працівників, постійне підвищення їхньої кваліфікації – запорука стабільності інституту і його подальшого розвитку в сучасних умовах.

Колектив інституту з нагоди свого 75-річчя висловлює глибоку подяку Міністерству розвитку громад і територій України, Державній корпорації «Укрмонтажспецбуд», Національній академії наук України, Академії будівництва України, науково-дослідним і проектним інститутам за плідну співпрацю і бажає всім щастя та нових творчих звершень.

Надійшла 16.10.2019 р.

ОТ САРКОФАГА ДО НОВОГО БЕЗОПАСНОГО КОНФАЙНМЕНТА

Эта обзорная статья посвящена деятельности Украинского института стальных конструкций имени В.Н. Шимановского, связанной с ликвидацией последствий крупнейшей техногенной аварии в области атомной энергетики, произошедшей 26 апреля 1986 года на Чернобыльской атомной электростанции. Статья охватывает период времени от момента аварии до сентября 2019 года.

В.Н. Гордеев
заместитель генерального директора по научной работе Украинского института стальных конструкций имени В.Н. Шимановского, заслуженный деятель науки и техники Украины, д.т.н., профессор

В апреле 1986 года на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) произошла крупнейшая в мире техногенная авария. Источником этой аварии стал уран-графитовый атомный реактор РБМК-1000 (реактор большой мощности, канальный, 1000 мегаватт), разработанный под руководством академиков А.П. Александрова (научный руководитель, Институт атомной энергии имени И.В. Курчатова), Н.А. Доллежаля (главный конструктор, Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники) и Н.П. Мельникова (главный конструктор по металлическим конструкциям, Центральный научно-исследовательский и проектный институт строительных металлоконструкций).

В результате аварии была полностью разрушена активная зона реактора, сильно повреждены реакторное отделение, деаэраторная этажерка, машинный зал и ряд других помещений (рис. 1).

Рис. 1. Разрушения, вызванные аварией 4-го блока ЧАЭС (вид с юга):
1 – реакторное отделение; **2** – деаэраторная этажерка; **3** – машинный зал

Конструкция саркофага. Сразу же после аварии начали разрабатывать конструкцию сооружения, которое бы оградило разрушенный реактор от внешнего мира – объект «Укрытие» или «Саркофаг». Было проработано 18 вариантов, из которых выбран окончательный, предложенный институтом ВНИПИЭТ (рис. 2). Заметим, что ЧАЭС ориентирована так, что буквенные оси прямоугольной координатной сетки идут точно с востока на запад, а цифровые – точно с юга на север.

Основу центральной части покрытия саркофага составляют балки Б2. Они представляют собой спаренные металлические конструкции из стали 09Г2С пролетом 38,0 м, высотой 3,4 м, каждая массой 130 т. По балкам Б2 уложен т.н. трубный настил, состоящий из 27 труб длиной 34,5 м, диаметром 1220 мм с толщиной стенки 15,2 мм. По всей длине трубы с двух сторон приварены гнутые швеллеры 800×150×10 мм.

Северная и южная части покрытия имеют наклонные и вертикальные плоскости и состоят из отдельных щитов. Несущую основу этих щитов покрытия составляют Г-образные элементы, т.н. «клюшки». Северные клюшки имеют пролет наклонного участка 13 м и высоту вертикального участка 3,5 м. Они обшиты листом толщиной 4 мм. Ширина щитов составляет 3 м. Опираются они на балки Б1 и северную контрфорсную стену. Южные клюшки расположены между рядами Б и В и состоят из продольных и поперечных балок и обшивки толщиной 3 мм. Они имеют вертикальный участок высотой 12,25 м, наклонный участок длиной 12,9 м и опираются на южную

© Гордеев В.Н.

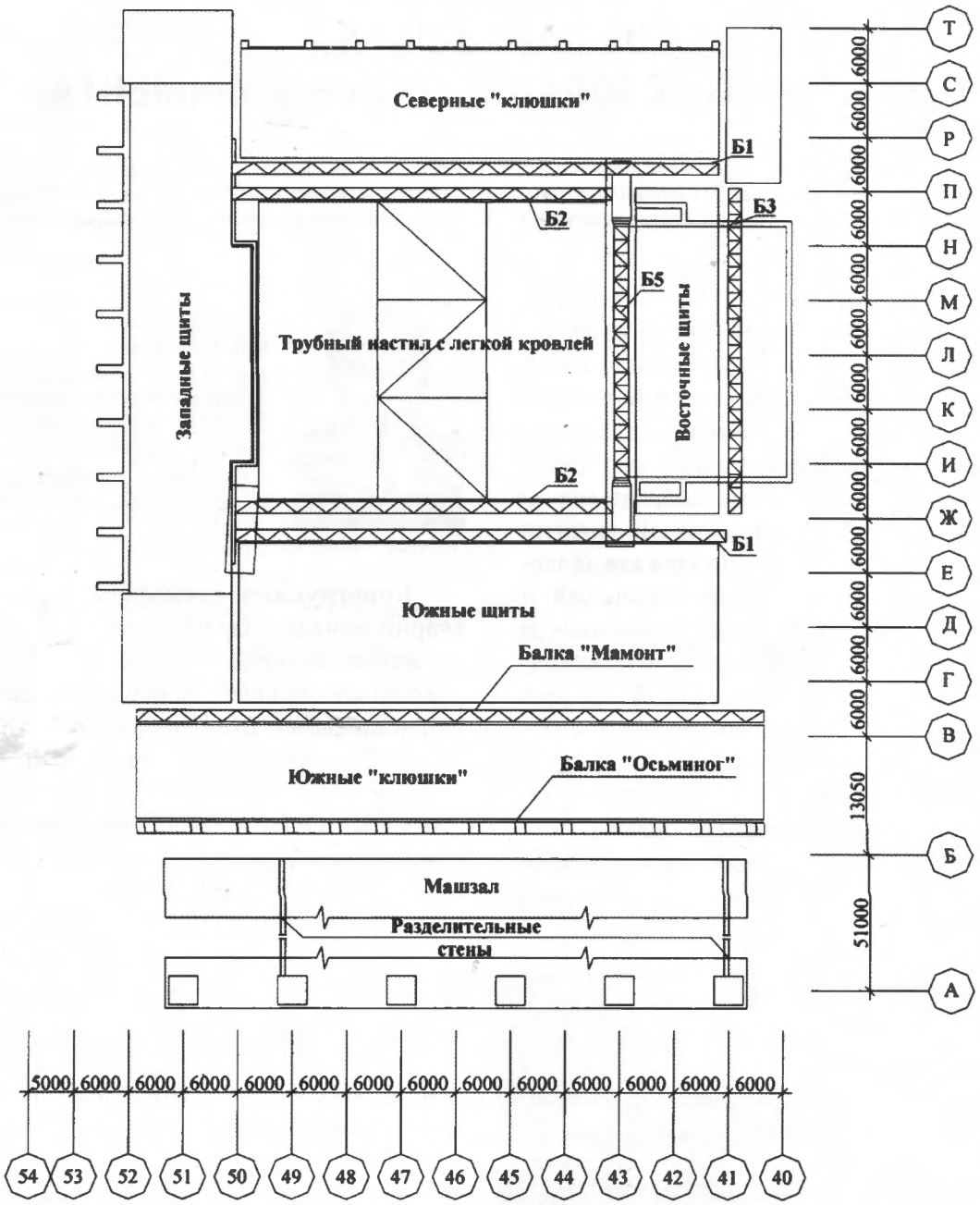

Рис. 2. План расположения конструкций саркофага

ветвь балки «Мамонт» и на балку «Осьминог». Южные плоские щиты с обшивкой из листа толщиной 4 мм расположены между рядами Ж–В в осях 45–50. По оси Ж они опираются на балку Б1, а по оси В – на балку «Мамонт». Аналогичную конструкцию имеют восточные и западные щиты.

Покрытие машзала между осями 41–49 оказалось очень поврежденным. Поэтому было принято решение разместить поверх него новое покрытие по фермам, опирающимся на новые пространственные решетчатые колонны.

К проектированию конструкций саркофага были привлечены многие организации: «ПромНИИпроект», «Оргтехстрой-Н», «Оргстройпроект» (г. Москва), а также специалисты из института ИАЭ им. И.В. Курчатова Академии наук СССР, институтов Госстроя СССР: НИИЖБ, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, Научно-исследовательского института строительных конструкций (НИИСК) и из других организаций.

Для проектирования металлоконструкций саркофага были привлечены ЦНИИПроектсталь-

конструкция (г. Москва), украинские институты «УкрНИИпроектстальконструкция» (ныне Украинский институт стальных конструкций имени В.Н. Шимановского) и «Днепрпроектстальконструкция». Институт «УкрНИИпроектстальконструкция» представляли Игорь Сидненков и Александр Седов, а институт «Днепрпроектстальконструкция» Марк Герзон, работавшие в Чернобыле круглосуточно. Это они воплотили в металле идею ВНИПИЭТ о конструктивной форме саркофага.

Институт «УкрНИИпроектстальконструкция» разработал чертежи северных и южных клюшек вместе с обшивкой и принял участие в проектировании других металлоконструкций. За успешную разработку чертежей Александр Седов был награжден орденом Трудового Красного Знамени. Большой вклад в проектирование внесли монтажники, рационализаторские предложения которых сразу претворялись в жизнь. Проектирование металлических конструкций было выполнено на протяжении одного месяца.

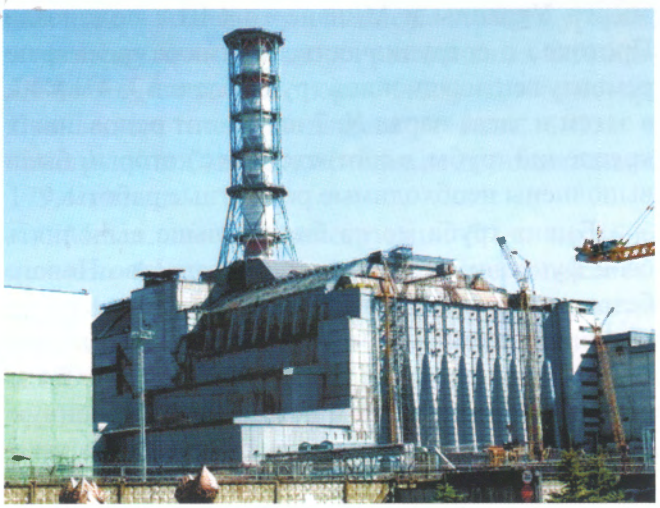

Рис. 3. Общий вид саркофага

Конструкции изготовил Днепропетровский завод металлоконструкций имени И.В. Бабушкина при непосредственном участии директора П.Л. Аксютенко и главного конструктора Л.Х. Резника.

Конструкции саркофага были смонтированы за пять месяцев. Строительство завершилось в ноябре 1986 г. (рис. 3). В ходе строительства было уложено около 400 тыс. м^3 бетона, смонтировано более 7 тыс. т металлоконструкций, снято и перемещено 90 тыс. м^3 грунта.

Дальнейшие работы на территории Чернобыльской АЭС. Возведением саркофага и нового покрытия части машинного зала ликвидация последствий Чернобыльской катастрофы не завершилась (рис. 4). Надо было поддерживать в безаварийном состоянии конструкции самого саркофага, в частности, его западной стены, которая не была полностью забетонирована и могла разрушиться.

Рис. 4. Общий вид ЧАЭС:

1 – саркофаг; **2** – новое покрытие машзала; **3** – западная стена саркофага; **4** – вентиляционная башня-труба; **5** – дымовая труба промышленно-отопительной котельной; **6** – пролет покрытия между осями 49–51

Вентиляционная труба 3-го и 4-го блоков, находящаяся в непосредственной близости от взорвавшегося атомного реактора, была повреждена. Ее несущая способность, особенно основание, вызывали сомнения и, несмотря на необходимость демонтажа, с трубой надо было что-то делать.

В связи с планируемым закрытием ЧАЭС надо было перейти на энергоснабжение от внешних источников. Для снабжения ее теплом было принято решение о постройке промышленно-отопительной котельной (ПОК), дымовая труба которой должна быть выполнена в металлических конструкциях.

Кроме того, поскольку поврежденное взрывом покрытие машинного зала было заменено не полностью, его пролет между осями 50–52 в 2013 г. обрушился, открыв загрязненную зону внутри машинного зала. Покрытие этого пролета надо было срочно восстанавливать.

Институт «УкрНИИпроектстальконструкция» участвовал в обследовании и ремонте вентиляционной трубы 3-го и 4-го блоков, в проектировании и последующем освидетельствовании дымовой трубы ПОК, а также в восстановлении покрытия машинного зала между осями 50–52.

Обследование вентиляционной башни-трубы, общей для 3-го и 4-го блоков, стало второй крупной работой по ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы. Так как эта башня-труба (см. рис. 3) расположена в непосредственной близости от взорвавшегося атомного реактора, она была повреждена разлетающимися обломками. Несмотря на выполненную ранее дезактивацию конструкций, уровень радиации на момент обследования был высоким. На рабочих площадках и элементах конструкций можно было найти куски радиоактивного графита.

Основание башни-трубы находилось на отметке 74.5 м, а верх – на отметке 150.0 м. Для того, чтобы добраться до ее основания, надо было пройти часть пути внутри саркофага, где был очень высокий уровень радиации, затем по стремянкам подниматься до нужной отметки. Уже сам путь к «рабочему месту» представлял значительные трудности.

Работу по обследованию башни летом 1996 г. выполнила бригада специалистов в составе И.В. Сидненкова, И.Л. Овдиенко и Г.Я. Запольского под руководством М.П. Кондры. Обследование проводилось на площадках, плохо очищенных от радиоактивных отходов, и наши сотрудники получили высокие дозы облучения.

В результате обследования было установлено, что взрыв атомного реактора не повлек за собой заметных вмятин в трубе и серьезных повреждений башни. Обнаружены были только погиби некоторых второстепенных элементов и фасонок. Выявлены были также другие дефекты, не имеющие отношения к аварии. Однако серьезные опасения вызвали повреждения основания башни-трубы, находящегося в непосредственной близости от взорвавшегося ядерного реактора, и крепления башни-трубы к основанию. Эти опасения были столь велики, что 15 октября 1997 г. Минэнерго Украины и Минэнерго США подписали Протокол о сотрудничестве в рамках проекта по ремонту вентиляционной трубы блоков 3–4 ЧАЭС, а затем и заказ-наряд № 7 на ремонт основания и креплений трубы, в соответствии с которым были выполнены необходимые ремонтные работы.

Башня-труба могла бы и дальше выполнять свои функции, если бы не строительство Нового безопасного конфайнмента. Она буквально на несколько метров не позволяла надвинуть конфайнмент в проектное положение. Поэтому было решено построить рядом новую вентиляционную башню-трубу, а старую, мешающую надвижке, демонтировать.

Новая труба была построена по проекту Киевского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Энергопроект» (КИЭП). С нею был связан ряд неприятностей. Из-за недостаточного внимания проектировщиков к температурным деформациям, в узловых фасонках башни в зимний период возникли множественные трещины. Институтом электросварки имени Е.О. Патона и Украинским институтом стальных конструкций имени В.Н. Шимановского было принято совместное решение ограничиться их заваркой. Однако нет гарантии, что эти трещины не возникнут вновь.

Проектирование и обследование дымовой трубы ПОК. На территории Чернобыльской АЭС в 90-е годы построена промышленно-отопительная котельная. Она предназначена для производства горячей воды и пара, требующихся для работы объектов по обращению с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО), снабжения теплом оборудования и систем, остающихся в эксплуатации, а также

для отопления технологических и административных зданий после окончательной остановки энергоблоков.

Для вывода газов, образующихся в процессе сгорания топлива, котельная должна быть оборудована трубой высотой 100 м и диаметром 3,6 м (рис. 5). Проектирование трубы было успешно выполнено отделом высотных сооружений института «УкрНИИпроектстальконструкция» под руководством главного инженера проектов Ж.С. Страшко в 1993 году. Для поддержания трубы потребовалось соорудить решетчатую башню. Башня-труба, выполненная по классической схеме института «УкрНИИпроектстальконструкция», была подвешена к башне на верхнем уровне, в промежуточных уровнях размещены тангенциальные скользящие опоры, внизу компенсатор. При массе газоотводящего ствола 109,6 т конструкции башни потребовали дополнительно 179,4 т стали.

Металлические конструкции были изготовлены на Мариупольском заводе металлоконструкций в 1993 г. и доставлены на строительную площадку, где пролежали шесть лет. И только в 1999 г. был выполнен их монтаж. В 2000 г. институт «УкрНИИпроектстальконструкция» выполнил освидетельствование технического состояния металлоконструкций несущего каркаса. Дефекты, обнаруженные при этом, были устранены, и труба введена в эксплуатацию.

Рис. 5. Котельная ПОК и дымовая башня-труба

Восстановление покрытия машинного зала. В феврале 2013 г. произошло частичное разрушение покрытия машинного зала блока № 4 и прилегающих участков стены. Обрушилась стропильная ферма по оси 50, находящаяся между осями А и Б (см. рис. 2), пролетом 51 м, и в покрытии образовался пролом между осями 50–52 размером 51×12 м, площадью 612 м^2. Обрушение произошло зимой и выброса в атмосферу пыли и других радиоактивных остатков, находящихся в машинном зале, практически не произошло. Тем не менее, надо было срочно закрыть образовавшийся пролом. Эту проблему поручили решить институту КИЭП, который в свою очередь привлек для проектирования металлических конструкций Украинский институт стальных конструкций имени В.Н. Шимановского.

Металлические конструкции были запроектированы с таким расчетом, чтобы во время монтажа минимизировать время нахождения людей в машинном зале, где был высокий радиационный фон. Проектирование выполнено отделом гражданских и промышленных сооружений под руководством главного конструктора Б.Л. Фурмана и главного инженера проектов Р.И. Ганжи.

Конструкции представляют собой единый блок с прикрепленными к несущим конструкциям кровельными металлическими листами и стеновым ограждением. Его габариты в плане чуть меньше образовавшегося пролома. Блок состоит из двух ферм пролетом 49,0 м, объединенных между собой связями по верхним и нижним поясам и вертикальными диафрагмами. Расстояние между фермами составляет 7,0 м. К верхним поясам блока прикреплены двухконсольные прогоны, по которым смонтирован профилированный оцинкованный настил. Масса блока (с оснасткой) около 60 т (рис. 6). Опирается этот блок не на колонны, а на подкрановые балки мостового крана машинного зала на проектной отметке 23.300. Однако точное положение подкрановых балок на момент проектирования было неизвестно, поскольку взрыв реактора деформировал металлические конструкции по ряду Б. Неопределенность положения подкрановых балок, которые являлись опорами блока, была компенсирована тем, что блок запроектировали геометрически изменяемым, с одной лишней степенью свободы, благодаря чему он легко устанавливался на опоры, не лежащие в одной горизонтальной плоскости. Блок легко стал на смещенные взрывом подкрановые балки и был к ним приварен.

Рис. 6. Монтаж блока покрытия

План осуществления мероприятий на объекте «Укрытие». С течением времени стало понятно, что работы по ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы с построением саркофага далеко не закончены. В середине 1989 г. Институт атомной энергии имени И.В. Курчатова предложил построить над саркофагом герметичное «Укрытие-2», позволяющее полностью изолировать внешнюю среду от ТСМ внутри объекта. Одновременно «Укрытие-2» могло стать надежной оболочкой, под которой можно было бы провести разборку объекта «Укрытие».

В апреле 1994 г. Европейской комиссией был объявлен тендер на разработку технико-экономического обоснования (ТЭО) стабилизации существующего «Укрытия» и сооружения «Укрытия-2» в рамках программы «Tacis». Тендер выиграл консорциум «Alliance» во главе с французской компанией «Campenon Bernard SGE».

В июле 1995 г. консорциум «Alliance» завершил работы над ТЭО и предоставил отчет, в котором были намечены основные этапы работ по преобразованию объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему. Кроме этого, был разработан очень важный документ «План осуществления мероприятий на объекте «Укрытие» (ПОМ) или на английском языке: «Shelter Implementation Plan» (SIP). В дальнейшем он стал основой для оказания финансовой помощи Украине по преодолению последствий Чернобыльской катастрофы. Для его финансирования было решено создать Международный Чернобыльский фонд «Укрытие» (ЧФУ).

Консорциум «Alliance», как автор ТЭО, предложил выполнить проработки для трех конкурирующих конструктивных схем «Укрытия-2», получивших короткие названия «Рама», «Арка» и «Док-Кессон».

Институту «УкрНИИпроектстальконструкция» поручили подробно проработать вариант «Док-Кессон», идея которого в свое время была предложена КБ «Южное». Отделом гражданских и промышленных сооружений института под руководством кандидата технических наук Р.Б. Харченко был выполнен расчет конструкций, а по полученным усилиям подобраны сечения элементов и разработаны их узлы. Рассмотрены вопросы монтажа конструкций, обеспечения безопасности при выполнении работ, радиационной защиты, произведен расчет трудозатрат и коллективных доз, составлен график продолжительности строительства (24 мес).

Аналогичным образом были установлены основные технико-экономические показатели других вариантов Нового безопасного конфайнмента (НБК). Учитывая то, что основным показателем следует считать величину коллективной дозы облучения, был принят вариант «Арка».

Вскоре после этого для реализации проекта «Арка» две французские компании «VINCI Construction Grand Projects» и «Bouygues Travaux Publics» создали **консорциум NOVARKA** (50/50). В сентябре 2007 г. консорциум подписал с Чернобыльской атомной электростанцией контракт «Проектирование, строительство и ввод в эксплуатацию Нового безопасного конфайнмента».

Руководство консорциума NOVARKA обратилось к Украинскому институту стальных конструкций имени В.Н. Шимановского с предложением выступить субподрядчиком в реализации этого проекта. 28 марта 2008 г. было подписано Рамочное соглашение № 200 034/24553 о предоставлении институтом консультационных и других видов услуг. Нашими коллегами-субподрядчиками были группа заводов металлических конструкций CIMOLAI (Италия), отвечающих за рабочий проект (КМД) и изготовление стальных конструкций НБК, фирма «PaR» (США), ответственная за проектирование и изготовление системы основных кранов, и фирма OKYANUS (Турция),

ответственная за детальное проектирование, поставку и установку обшивки конфайнмента.

Основная задача института состояла в адаптации проекта Нового безопасного конфайнмента к украинским строительным нормам и выполнении научно-технического сопровождения этого проекта.

Первой работой в составе Рамочного соглашения был мониторинг законов Украины, государственных строительных норм и стандартов, а также других обязательных документов, соблюдение которых требовалось при разработке проекта и возведении НБК. Вначале был составлен и передан консорциуму NOVARKA список законов, постановлений Кабинета Министров Украины, государственных строительных норм и стандартов Украины, а также действующих в то время нормативных актов Союза ССР в области строительства по состоянию на 1 апреля 2008 года. Далее мы готовили помесячные отчеты об изменениях в составе этих документов, и продолжалось это до тех пор, пока NOVARKA не передал проект на исполнение заводу металлических конструкций CIMOLAI. Следует отметить, что французская сторона не всегда соблюдала нормы, действующие в Украине, ориентируясь на европейские коды. В процессе научного сопровождения и при выполнении дублирующих расчетов такие несоответствия выявлялись и французская сторона вносила изменения в проект.

Второй работой было изучение вентиляционной башни-трубы 3-го и 4-го блоков ЧАЭС. Башня-труба расположена так, что для ее демонтажа нужен кран с большим вылетом стрелы. Для выбора типа крана и решения вопроса о степени расчленения башни-трубы на фрагменты надо было иметь хотя бы чертежи этого объекта. Поскольку институт в 1996 г. выполнял обследование технического состояния башни-трубы, консорциум NOVARKA обратился к нам за помощью.

В результате проделанной институтом работы нужные материалы были собраны и составлен технический отчет о состоянии этого объекта.

Обдувка конфайнмента в аэродинамической трубе. С целью уточнения ветровых нагрузок на конструкции конфайнмента в готовом виде и в процессе его возведения было предусмотрено выполнение испытаний конфайнмента и его фрагментов на моделях в масштабе 1:400 в аэродинамической трубе. Испытания выполнялись в г. Нант (Франция) в научном центре CSTB (Scientific and Technical Center for Building). Этот научный центр специализируется на атмосферных исследованиях.

Исследование обтекания конфайнмента в готовом виде, в недостроенном виде с открытым торцом и отдельно узкого фрагмента без обшивки выполнялось в большой аэродинамической трубе. При этом в рабочей части трубы были не только масштабная модель конфайнмента, но и здания, находящиеся поблизости, в частности здания 4-го энергоблока и саркофага. Исследования показали более низкие нагрузки по сравнению с нормами.

Дублирующие расчеты несущих конструкций Нового безопасного конфайнмента (рис. 7) выполнялись самым тщательным образом.

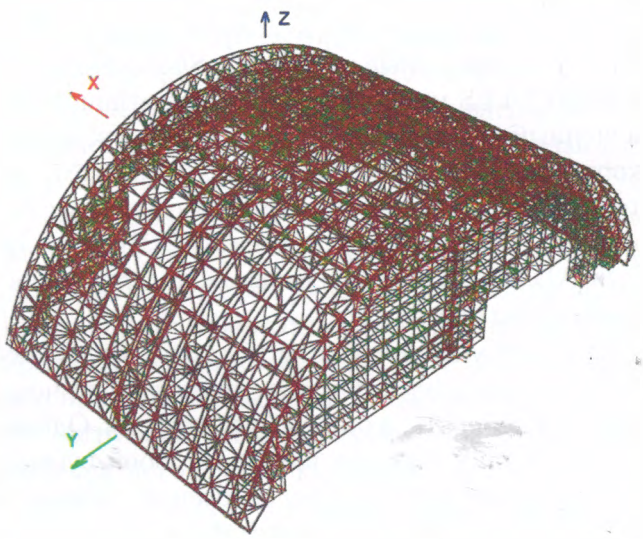

Рис. 7. Расчетная схема Нового безопасного конфайнмента

Французская фирма «Jaillet-Rouby» выполняла расчеты металлоконструкций при помощи программного комплекса HERCULES. Дублирующие расчеты каркаса конфайнмента было решено выполнять пользуясь программным комплексом SCAD Structures, поскольку он является самым мощным среди отечественных программ, имеет российскую лицензию (признаваемую в Украине), позволяющую применять его для расчетов конструкций в атомной энергетике и, кроме того, ведущие разработчики этого комплекса А.В. Перельмутер и М.А. Микитаренко работали в нашем коллективе.

Расчетная схема конфайнмента представляет собой весьма сложную стержневую систему с числом узлов 5947 и стержней 13240. Основными

несущими конструкциями являются арочные секции пролетом 257,4 м с высотой в центре пролета, равной 104,4 м. Арки – сквозные решетчатые конструкции с расстояниями между поясами 13 м – располагаются с шагом 12,5 м. Количество вариантов нагрузок – около 600. Выполнить независимую подготовку исходных данных для такой объемной конструкции, у которой узлы и стержни расположены и ориентированы без четкой закономерности, задача архитрудоемкая.

Для облегчения подготовки данных был разработан конвертор, переводящий исходные данные программного комплекса HERCULES в исходные данные программного комплекса SCAD Structures таким образом, чтобы полностью сохранялась геометрическая конфигурация. Поскольку программные комплексы SCAD Structures и HERCULES имеют существенные отличия, полученный массив исходных данных нуждался в корректировке, а затем и в отладке на компьютере. Для проверки идентичности расчетных моделей в программных комплексах HERCULES и SCAD Structures была выполнена серия сопоставительных расчетов.

Дублирующие расчеты показали, что не все подобранные стержни имеют достаточную несущую способность, и они требуют замены. Однако замена одного стержня влекла за собой существенные изменения в распределении усилий в других элементах системы. Требовали замены и они. Эта цепная реакция изменения усилий потребовала 17 итераций, пока процесс сошелся.

Из этого был сделан вывод, что каркас НБК перегружен лишними связями. Можно было бы его упростить, выбросив некоторое количество вспомогательных стержней, но делать этого не стали, чтобы не увеличивать сроки строительства.

Сход снежной лавины с покрытия конфайнмента французской стороной не рассматривался. На существование такой проблемы еще в 1997 г. обратил внимание А.В. Перельмутер. Расчеты выполнил известный специалист в области теоретической механики, доктор технических наук В.И. Гуляев, имеющий большой опыт решения нестандартных задач. Оказалось, что в процессе соскальзывания с покрытия «снежное одеяло» становится более тонким, распадаясь на отдельные фрагменты, скорость движения которых составляет несколько десятков метров в секунду. Они отрываются от покрытия цилиндрической формы в его нижней части и пролетают в воздухе около 10 м прежде чем упасть на землю. Некоторые из этих фрагментов, состоящие из снега и льда, могут упасть и на покрытие. Кроме этого, во время торнадо возможно падение на покрытие тяжелых предметов, поднятых воздушным вихрем.

По этому поводу в Великобритании в научно-исследовательском центре керамической промышленности CERAM (г. Сток-он-Трент) по заказу турецкой фирмы OKYANUS, ответственной за обшивку, были проведены испытания обшивки покрытия на падение ледяной глыбы, образующейся при сходе снежной лавины или тяжелых предметов во время торнадо. После длительных обсуждений было решено провести испытание обшивки на падение груза овальной формы массой 15 кг со скоростью 10 м/с, направленной перпендикулярно поверхности обшивки.

Испытания прошли успешно. Ледяные грузы (рис. 8) неоднократно роняли на ребро панели (рис. 9) и на ее гофры. Вмятины были существенны, но они не представляли опасности для прочности и целостности покрытия.

Наши специалисты участвовали в подготовке программы испытаний и присутствовали при их проведении.

Рис. 8. Груз на крюке крана

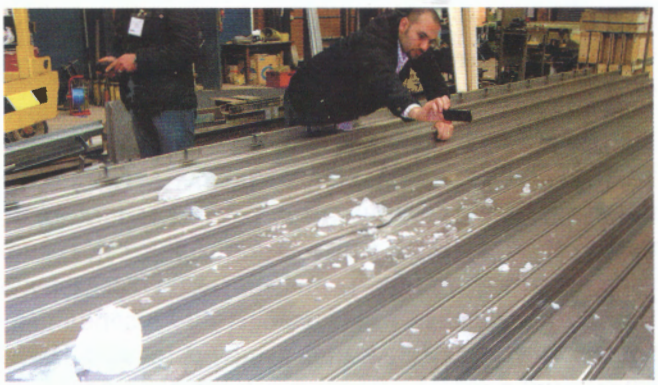

Рис. 9. Вмятина на ребре панели после падения груза

Проектирование узлов. По замыслу авторов конструкции ее стержневые элементы имели трубчатую форму. Это совершенно резонно, поскольку труба хорошо работает как на растяжение, так и на сжатие. Однако трубы нелегко соединять в узлах. Консорциум NOVARKA предложил делать на концах труб прорези и вваривать в эти прорези плоские концевики, а затем присоединять их при помощи болтов и накладок к узловым фасонкам (рис. 10).

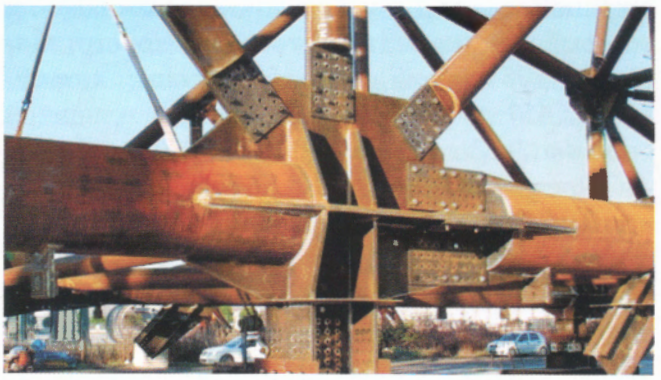

Рис. 10. Характерный узел соединения трубчатых элементов

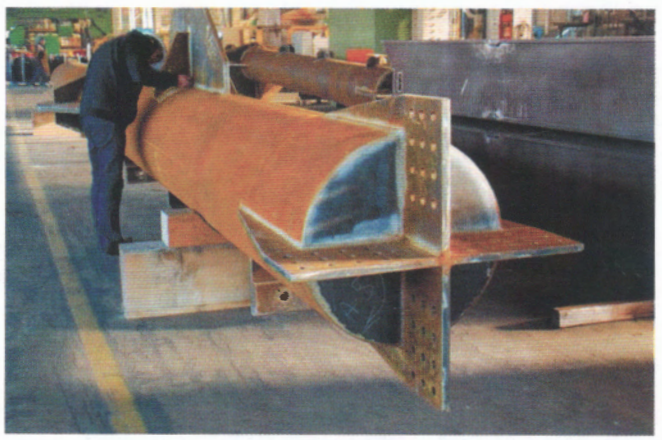

Рис. 11. Концевик трубчатого элемента

Расчет прочности концевика трубы (рис. 11) и болтового соединения его с фасонкой выполнили доктора технических наук В.В. Гайдайчук и В.И. Гуляев по методу конечных элементов с учетом геометрической нелинейности в упругопластической стадии работы стали с использованием программного комплекса NASTRAN.

В результате было получено распределение напряжений и формы потери устойчивости для многих узлов. Примеры визуализации результатов расчетов приведены на рис. 12. Количественные результаты расчетов показали достаточную надежность концевиков труб, примененных в проекте конфайнмента.

Кроме тела трубы проверялись и болтовые соединения трубчатого элемента с узловой фасонкой. Численным путем было установлено, что во фрикционных соединениях в работу включаются лишь болты крайних рядов, а болты промежуточных рядов не работают. Положение спасает тот факт, что эта закономерность исчезает, как только болты крайних рядов начинают проскальзывать. Для постоянных нагрузок полная несущая способность соединения восстанавливается. Однако при переменных, особенно при вибрационных нагрузках болты крайних рядов вследствие многократного проскальзывания могут терять несущую способность и снижать общую прочность соединения. Впоследствии этот феномен нашел теоретическое подтверждение.

Надо отметить, что французские специалисты собирались оставить открытыми торцы трубчатых элементов. Мы же, ссылаясь на свой опыт проектирования трубчатых конструкций, убедили их поставить в торцах труб заглушки. Элементы поступили на стройку с закрытыми торцами.

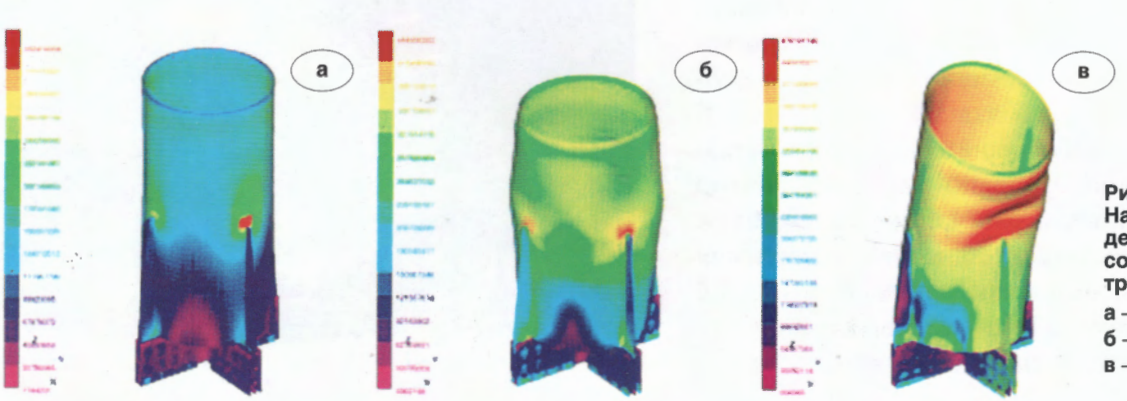

Рис. 12. Напряженно-деформированное состояние концевика трубы:
а – при растяжении;
б – при сжатии;
в – при изгибе

Обшивка конфайнмента играет важную роль в его функционировании. Именно она защищает окружающую среду от вредных веществ, находящихся внутри конфайнмента.

Институт был привлечен к работе над обшивкой еще на начальной стадии ее проектирования. Оборудование и технология для выполнения обшивки из нержавеющей стали были поставлены немецкой фирмой «Kalzip» по рекомендации консорциума NOVARKA. Институт поддержал мнение консорциума NOVARKA.

Далее надо было решить проблему проверки несущей способности обшивки. Что касается прогонов и профилированного настила, то их прочность была проверена расчетом. Прочность крепления обшивки определили при помощи эксперимента. Программа испытаний с определением числа экспериментов по украинским нормам была разработана при участии нашего института.

Испытания выполнялись в научно-исследовательском центре керамической промышленности CERAM (Великобритания). Для создания нагрузки использовались мешки, надуваемые воздухом до нужного давления, изготовленные при помощи «скотча» из рулонной полихлорвиниловой пленки (рис. 13).

Представители института дважды выезжали для участия в испытаниях.

Отдельно были проведены испытания присоединения обшивки к несущим конструкциям на самонарезающих винтах. При этом проверялась несущая способность и резьбы, и винтов. Испытания выполнялись в лабораториях Высшей школы «Technik und Wirtschaft» в г. Карлсруэ (Германия) и финансировались турецкой фирмой OKYANUS, которая обеспечила присутствие на испытаниях нашего представителя в лице автора этой статьи.

Работа турецкой фирмы отличалась оперативностью, но базировалась, в основном, на эмпиризме. Подготовка к монтажу обшивки была хорошо обставлена экспериментальными исследованиями. Однако разработка технической документации вызывала большие трудности. Составлением технических условий на поставляемую продукцию в основном занимался наш институт. Добиться соблюдения требований украинских стандартов к оформлению чертежей в полной мере так и не удалось. Тем не менее, все монтажные работы были успешно выполнены фирмой OKYANUS.

Металлоконструкции НБК изготовлялись группой итальянских заводов металлоконструкций CIMOLAI, расположенных в г. Порденоне и в ближайших к нему городах.

Один из этих заводов, расположенный в г. Сан-Джорджио ди Ногаро, является крупным производителем стальных прямошовных труб большого диаметра и большой толщины стенок. Он оборудован уникальным гибочным прессом с шириной зева 15,1 м и давлением на нож 6000 тс, который может делать заготовки для конструкционных труб длиной до 15 м с наружным диаметром от 457 до 2032 мм (18" – 80") и толщиной стенки от 9,53 до 88,9 мм (3/8" – 3,1/2") (рис. 14).

Превращение заготовки в трубу выполняется наложением единственного продольного шва сварочным автоматом.

Консорциум NOVARKA заключил с группой заводов CIMOLAI субподрядный договор на выполнение рабочего проекта, изготовление и отгрузку металлоконструкций, а с Украинским институтом стальных конструкций имени В.Н. Шимановского соглашение на адаптацию рабочего проекта к украинским строительным нормам.

Рис. 13. Подготовка мешков для создания нагрузки

Рис. 14. Гибочный пресс с шириной зева 15,1 м и давлением на нож 6000 тс

В соответствии с этим договором специалисты института работали в г. Порденоне во временных офисных помещениях фирмы NOVARKA, проверяя чертежи конструкторского бюро CIMOLAI на предмет соответствия украинским нормам. Следует отметить, что заводское бюро для целей конструирования пользовалось программой TEKLA, а конструктивные расчеты выполнялись с использованием программы Excel.

Для индивидуального изготовления труб нужного размера под каждый элемент вырезалась листовая заготовка, ширина которой была равна длине трубчатой части стержня, изгибалась на прессе, приобретая форму незамкнутой боковой поверхности кругового цилиндра нужного диаметра. Продольный шов заваривался сварочным автоматом с использованием выводных планок, а затем концы трубы при помощи специального станка обрабатывались так, чтобы каждый торец имел форму круга, перпендикулярного оси трубы.

Пример изготовленной пространственной узловой фасонки, весящей около двух тонн, приведен на рис. 15.

Рис. 15. Пространственная фасонка

Контрольная сборка несущих конструкций конфайнмента выполнялась еще на заводе. Наши специалисты были приглашены на первый этап контрольной сборки. Собирался не весь конфайнмент и даже не целая арка, а лишь небольшой фрагмент каркаса. Фрагмент представлял собой пространственный блок, составленный из средних третей двух соседних арок с соединяющими их связями (рис. 16).

Рис. 16. Контрольная сборка пространственного блока

Сборка фрагмента прошла без особых осложнений. Однако это был единственный фрагмент, собранный механическим путем. Остальная контрольная сборка выполнялась виртуально. Основой для виртуальной сборки является трехмерная модель сооружения в программе TEKLA и деталировочные чертежи, полученные на ее основе. Идея виртуальной сборки заключается в том, что каждая изготовленная на заводе монтажная единица проходит фотограмметрический контроль с определением всех размеров, указанных на деталировочном чертеже. При этом используются лазерные инструменты: сканирующие, дальномерные и угломерные. Далее полученные размеры сличаются с размерами на деталировочном чертеже, и проверяется соблюдение допусков. Затем, совмещая в компьютерной трехмерной модели реперные точки, идеальные (соответствующие чертежам) монтажные единицы заменяют на реальные, проверяя тем самым собираемость сооружения. В случае нестыковок исправляют металл. Реальный монтаж конфайнмента прошел нормально.

Вентиляционная труба конфайнмента, расположенная на западной стене, является важным устройством НБК. Она предназначена для обеспечения обмена воздуха внутри конфайнмента и создания там пониженного давления, препятствующего выходу в окружающую среду радиоактивной пыли и аэрозолей (рис. 17).

Проектировал вентиляционную трубу Украинский институт стальных конструкций имени В.Н. Шимановского, имеющий большой опыт проектирования подобных устройств. Проект был выполнен отделом высотных сооружений под руководством главного инженера проектов Ж.С. Страшко. Труба подвешена к верху конфайнмента и раскреплена от горизонтальных перемещений еще в трех сечениях. Конструкция скользящих опор принята такой, что они препятствуют не радиальным, а тангенциальным перемещениям, что позволяет уменьшить сечения ребер жесткости. Применен мягкий компенсатор температурных удлинений, расположенный в нижней части трубы.

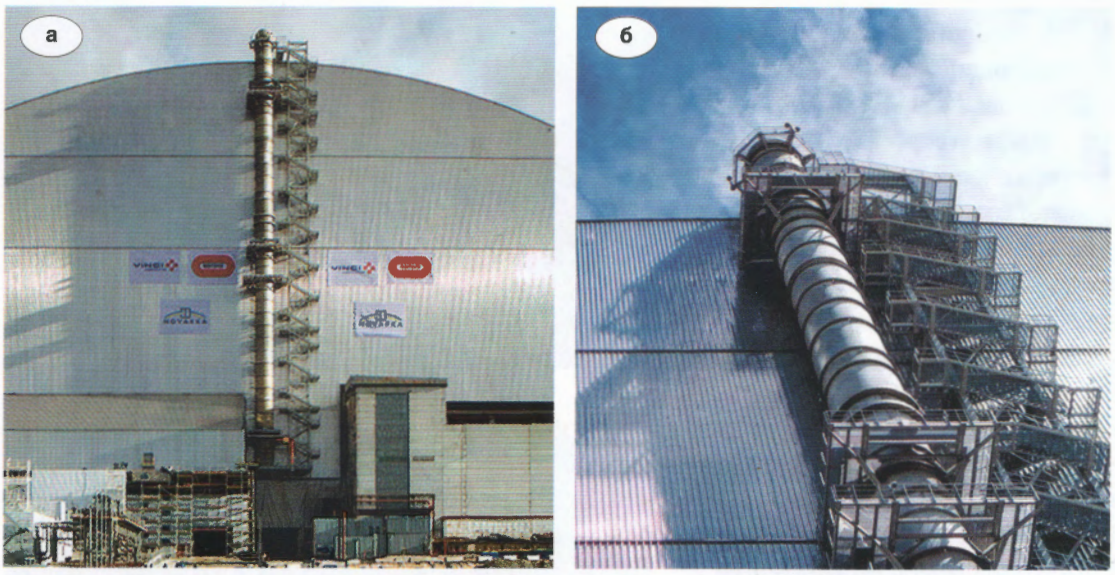

Рис. 17. Вентиляционная труба: общий вид (а) и верхняя часть с близкого расстояния (б)

Рис. 18. Монтаж вентиляционной трубы одним подъемом тремя кранами

Рис. 19. Конфайнмент после надвижки. Вспомогательные здания и сооружения:
1 – пожарные резервуары;
2 – насосная станция пожаротушения;
3 – технологическое здание;
4 – здание электротехнических устройств;
5 – шлюз доступа пожарных подразделений

При проектировании вентиляционной трубы были решены две нестандартные научные задачи. Первая из них относится к обтеканию потоком воздуха цилиндра, находящегося вблизи плоского экрана. Эта задача динамическая, поскольку наблюдается срыв вихрей с поверхности цилиндра. Задача была решена доктором технических наук А.В. Махинько методом математического моделирования. Вторая задача касалась нагревания поверхности трубы солнечными лучами. Поскольку труба находится на западной стене конфайнмента, это нагревание особенно велико. Опасность представляет неравномерность нагрева, поскольку из-за него труба приобретает дугообразную форму, которая конфликтует с закрепляющими трубу связями. Температурные поля стенки трубы в зависимости от положения солнца на небосводе построил А.И. Кордун. Он же выполнил механические расчеты вентиляционной трубы.

Труба, имеющая массу около 100 т, была смонтирована 3 сентября 2016 г. за один подъем (рис. 18) с помощью трех гусеничных кранов. Два из них делили между собой вес трубы, а третий поддерживал ее хвостовик и обеспечивал правильное положение в пространстве. Трубу надо было поставить на две опорные части, расположенные на отметке 100 м в непосредственной близости от вертикальной уже облицованной стены. Монтаж трубы был выполнен безупречно.

Вентиляционная труба теперь оживляет скучный западный фасад здания и известна во всем мире по фотографиям Нового безопасного конфайнмента.

Вспомогательные здания и сооружения предназначены для обслуживания конфайнмента – два пожарных резервуара емкостью по 1500 м^3 каждый, насосная станция пожаротушения (НСТП), обеспечивающая наполнение водой этих резервуаров, технологическое здание (ТЗ), здание электротехнических устройств (ЗЭУ), шлюз доступа пожарных подразделений (ШДПП) и некоторые другие (рис. 19). К большинству из указанных объектов имеют отношение специалисты Украинского института стальных конструкций имени В.Н. Шимановского.

В наибольшей степени это относится к пожарным резервуарам, закупленным консорциумом NOVARKA. Эти резервуары необычны тем, что они не сварные, а собраны из отдельных листов на болтах и не имеют днища. Его роль выполняет сплошная фундаментная плита из железобетона. Герметизация резервуара обеспечивается специальным мастиковым составом. Болтовая сборка принята из соображений скорости монтажа, что позволило минимизировать дозовую нагрузку на персонал.

Резервуары требовали адаптации не только к украинским строительным нормам, но и к специальным требованиям, предъявляемым к объектам, обеспечивающим безопасность конфайнмента. В частности, надо было дополнительно выполнить расчеты резервуаров на сейсмику и на воздействие торнадо, в том числе на удары предметов, перемещаемых воздушным вихрем.

Институт также проектировал навесные вентилируемые фасады. Для этого выполнялся тепловой расчет вспомогательных зданий, подбиралась необходимая толщина утеплителя и воздушные зазоры, обеспечивающие должный уровень вентиляции. Выполнялись также прочностные расчеты креплений элементов вентилируемых фасадов.

Механические расчеты были выполнены А.И. Кордуном, теплотехнические – Я.В. Лымарь.

Хранилище отработанного ядерного топлива ХОЯТ-2, предназначенное для сухого хранения отработанного ядерного топлива Чернобыльской АЭС, также возводилось при участии Украинского института стальных конструкций имени В.Н. Шимановского.

Отработанные тепловыделяющие сборки, извлеченные из реакторов 1, 2 и 3 Чернобыльской АЭС в количестве 21297 штук, в настоящее время хранятся погруженными в воду в бассейнах выдержки хранилища ХОЯТ-1. Для того, чтобы топливо безопасно хранилось еще много лет, на промышленной площадке ЧАЭС строится хранилище уже «сухого типа» ХОЯТ-2. Строительство хранилища финансируется со счета ядерной безопасности ЕБРР.

Основной вклад института в строительство ХОЯТ-2 (рис. 20) заключается в проектировании, изготовлении и поставке на монтаж металлоконструкций и средств механизации подъема и опускания ворот для помещений 107 и 119 здания для установки по подготовке отработанного топлива к хранению (УПОТХ). Большое внимание было уделено авторскому надзору за монтажом и проблеме наладки механического оборудования подъема и опускания ворот.

Рис. 20. Хранилище отработанного ядерного топлива ХОЯТ-2

Кроме этого выполнен ряд расчетных работ, связанных с конструкциями для этого здания, в частности, проверка прочности и устойчивости несущих строительных конструкций помещения 119 от воздействий, возникающих при испытании мостового крана SFP-CR-01, а также выполнен расчет сейсмостойкости вспомогательных конструкций горячей камеры помещений 501 и 501А здания УПОТХ на воздействие максимального проектного землетрясения.

Проект ворот и механического оборудования выполнили Н.Д. Чорномыз и В.В. Холькин, расчетную часть – А.И. Кордун.

Заключение.

В этой обзорной статье собраны основные сведения о работах Украинского института стальных конструкций имени В. Н. Шимановского по ликвидации последствий крупнейшей техногенной аварии на Чернобыльской АЭС, выполненных на договорных началах.

Однако этим не исчерпывается деятельность института по чернобыльской тематике. Специалисты института активно работали в Межведомственной комиссии по вопросам научно-технологической безопасности при Совете национальной безопасности и обороны Украины, в составе Посольства Украины в Российской Федерации, в Научно-координационном и экспертном совете по вопросам ресурса и эксплуатации конструкций, сооружений и машин при президиуме Национальной академии наук Украины, в составе Группы независимых экспертов по оценке концептуальных решений, предлагаемых для стабилизации объекта «Укрытие» и возведения Нового безопасного конфайнмента, а также в других организациях на общественных началах.

Сведения общего характера о Чернобыльской катастрофе и ликвидации ее последствий взяты из литературных источников [1], [2], [3], [4].

[1] От Укрытия до Конфайнмента четвертого блока Чернобыльской АЭС. Строительные аспекты [Текст] / Ю.И. Немчинов, П.И. Кривошеев, М.В. Сидоренко и др. – Киев: «Логос», 2006. – 464 с.

[2] *Перельмутер А.В.* Жили-были [Электронный ресурс] / А.В. Перельмутер. – Киев, 2017. 266 с. Режим доступа: https://scadsoft.com/download/Memoir3.pdf (19.08.2019).

[3] *Беляев И.А.* Бетон марки «Средмаш» [Текст] / И.А. Беляев. Москва: ИздАТ, 1996. 292 с.

[4] *Купный В.И.* Объект «Укрытие»: вчера, сегодня, завтра [Текст] / В.И. Купный // Объект «Укрытие» – 10 лет. Основные результаты научных исследований. – Чернобыль: МНТЦ «Укрытие», НАНУ, 1996. – С. 57–77.

Надійшла 18.102019 р.

ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОСТА ЧЕРЕЗ АВАНКАМЕРУ АВТОДОРОЖНЬОГО ПЕРЕЇЗДУ ФІЛІЇ «ДНІПРОВСЬКА ГЕС»

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

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

Однією з найвизначніших і найзнаніших інженерних споруд, зведених на теренах України, є гребля ДніпроГЕС у м. Запоріжжі, яка була введена в експлуатацію у вже далекому 1932 році. Особливістю цієї греблі є те, що крім гідротехнічного призначення вона забезпечує транспортне сполучення у місті між правим та лівим берегами р. Дніпро завдяки влаштуванню за всією її довжиною автодорожнього переїзду (рис. 1), який складається з низки споруд: естакад над шлюзами завдовжки 352,00 м і спряженням греблі з лівим берегом завдовжки 111,50 м, автопроїзду через греблю завдовжки 666,00 м, моста через аванкамеру завдовжки 319,76 м й земляної вставки завдовжки 136,57 м. Таким чином, загальна довжина переїзду 1585,82 м.

Вказана сучасна конфігурація мостового автопереїзду остаточно склалася у 1977 р. після його реконструкції, однією з головних цілей якої було розширення проїзної частини і влаштування чотирьох смуг руху автотранспорту в обох напрямках замість двох існуючих на той час.

Конструкція моста через аванкамеру. Під час будівництва моста у 1977 р. було використано п'ять опор існуючого «старого» моста, частина з яких розташована в зонах із глибинами води від 25 до 30 м, зі зміщенням осі нового моста у плані задля збільшення його кривини до мінімально допустимої за нормами – 125 м (рис. 2–3). Зазначимо, що саме таке рішення обумовило прийняте в проекті розбивання на прогони та ексцентричне опирання прогонової будови на опорі № 4 (рис. 3, б).

Габарит проїзду на мосту призначено виходячи з умови пропуску чотирьох смуг руху автотранспорту зі швидкістю 60 км/год. Смуги безпеки прийняті завширшки 0,5 м кожна. Повна

Рис. 1. Загальний вигляд автодорожнього переїзду через споруди греблі ДніпроГЕС

© Шимановський О.В., Шалінський В.В.

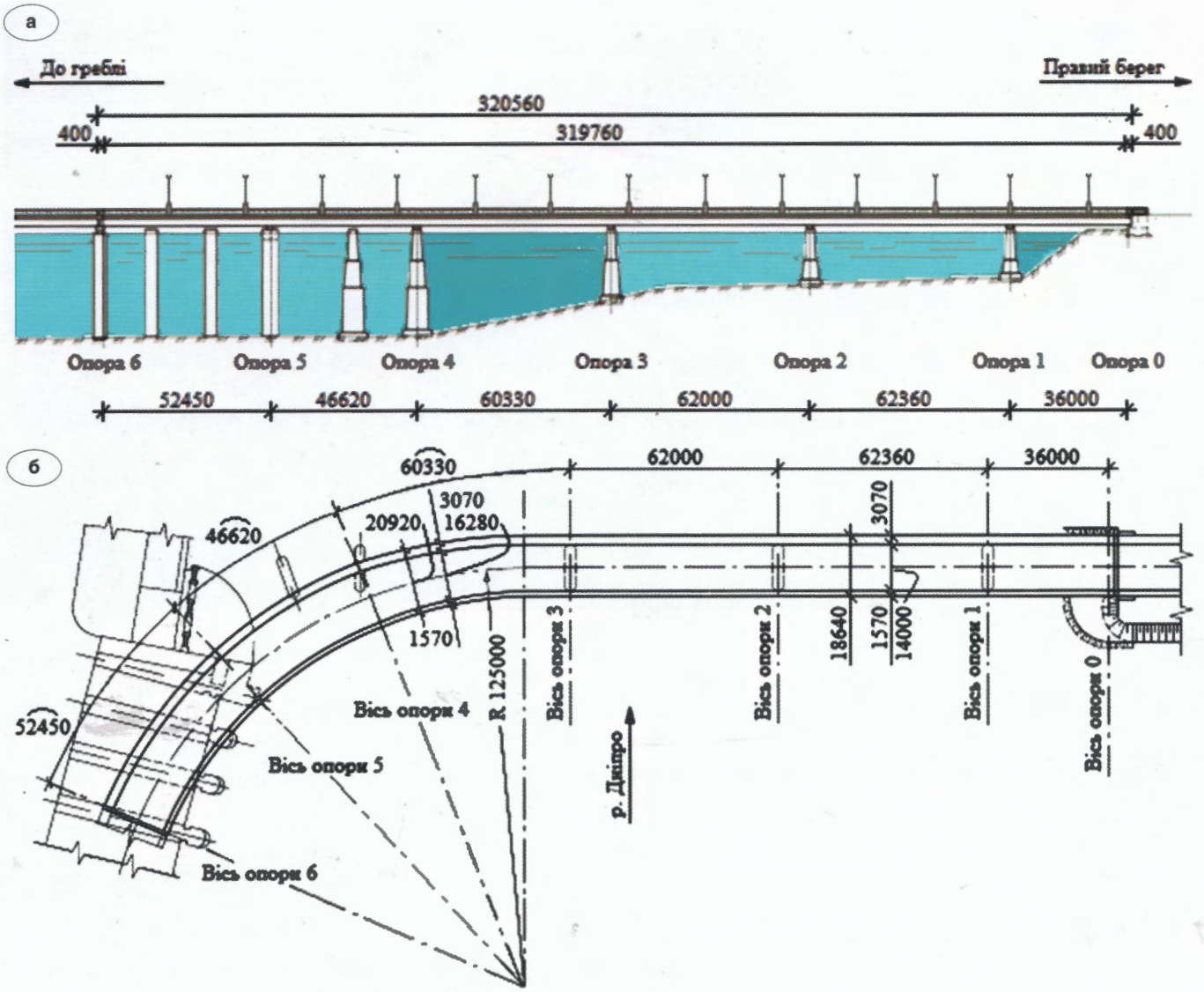

Рис. 2. Загальний вигляд (а) та план (б) моста через аванкамеру

ширина проїзду між огорожами безпеки складає 4×3,5 + 2×0,5 = 15,0 м, а виключно проїзду – 14,0 м (рис. 3, а).

Що ж стосується криволінійної ділянки моста, то на ній передбачено додаткове розширення габариту проїзду, яке має дві складові: по-перше, нормативне по 0,45 м на кожну смугу руху (задля можливості пропуску автопоїздів із причепами завдовжки до 11,0 м) і, по-друге, конструктивне – 0,2 м (задля врахування обмеження габариту проїзду прямолінійними блоками прогонової будови, вписаними до кривої по хордах). Отже повна ширина проїзду між бар'єрами безпеки на криволінійній ділянці моста становить 15,0 + 4×0,45 + 0,2 = 17,0 м, а виключно проїзду – 16,28 м (див. рис. 3, б). Тротуари прийняті несиметричними: з низової сторони для пішохідного руху 2,25 м, а з верхової – службовий прохід завширшки 0,75 м.

Підвищення низу прогонової будови над розрахунковим горизонтом води верхнього б'єфа прийнято 1,0 м, що більше мінімального, який встановлюється нормами для несудохідних та несплавних прогонів – 0,75 м. Цей збільшений підмостовий габарит прийнято з метою покращення умов огляду нижнього поясу прогонової будови та нагляду за спорудою протягом її експлуатації.

Проект моста розроблено згідно з чинними на той час вимогами та конструктивними вказівками технічних умов на проектування автодорожніх та міських мостів [1, 2]. При цьому враховувались наступні тимчасові навантаження – автомобільне Н-30 та спеціальні навантаження НК-80 і НГ-60.

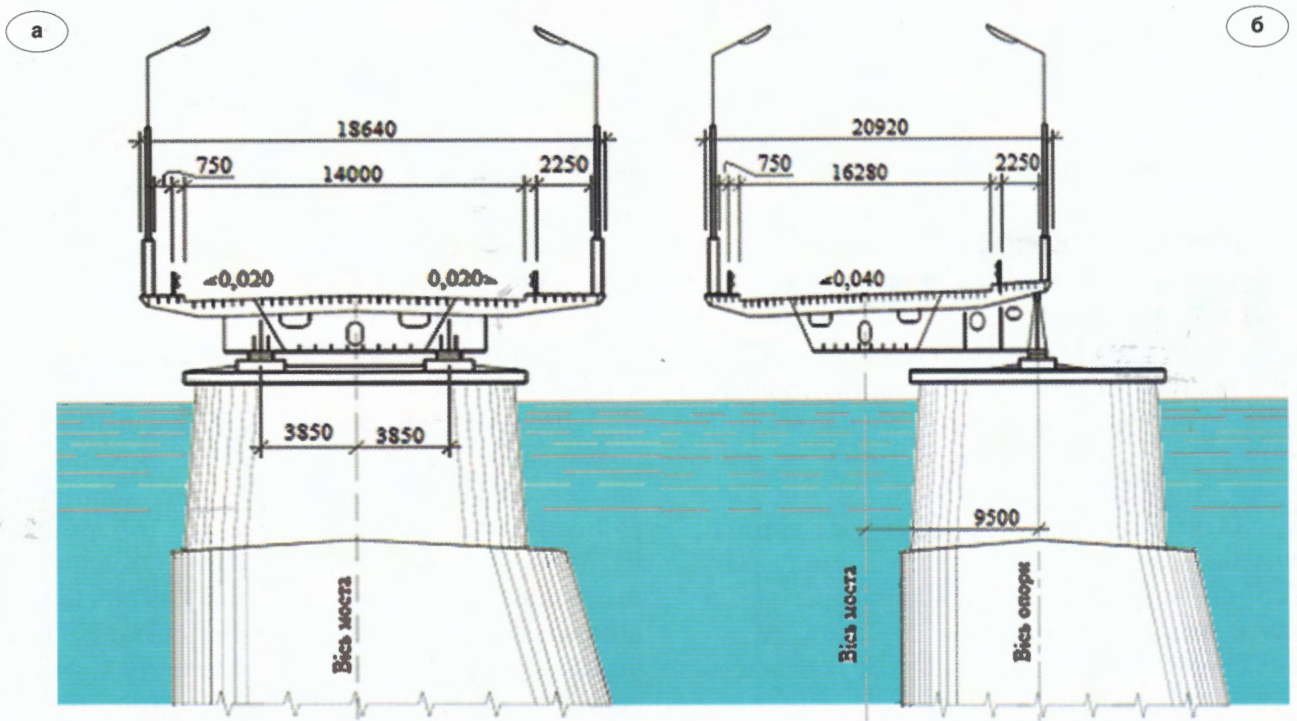

Рис. 3. Поперечний переріз моста через аванкамеру на прямій ділянці (а) та біля опори № 4 (б)

Прогонову будову моста виконано металевою суцільнозварною балковою нерозрізною за схемою 36,0 + 62,36 + 62,0 + 60,33 + 46,62 + 52,45 = = 319,76 (по осі моста). Поперечний переріз прогонової будови складається з однієї несної головної балки трапецеїдального коробчастого перерізу та металевої проїзної частини в вигляді ортотропної плити, яка одночасно слугує верхнім поясом головної балки. На ділянці трьох останніх прогонів прогонова будова криволінійна в плані з радіусом кривини 125 м. Для цієї ділянки прогонової будови застосовано нове конструктивне рішення, що дозволило використати опору № 4, яка на початку проектування залишалася осторонь при зміщенні траси. В результаті прогонова будова опирається на неї з ексцентриситетом 9,5 м. Всі опори моста бетонні та залізобетонні.

Матеріал конструкцій прогонової будови – низьколегована сталь марки 09Г2С [3]. Всі конструкції суцільнозварні зі зварними монтажними з'єднаннями.

Головна балка та ортотропна плита. *Головну балку* прогонової будови запроектовано коробчастою, трапецеїдального перерізу, заввишки по осі 2500 мм із змінною висотою бокових стінок. Ширина балки по низу 6000 мм. Поперечний ухил проїзної частини створений за рахунок різної висоти бокових стінок, кут нахилу яких однаковий та становить близько 60°.

Криволінійна частина моста в плані створена за рахунок вписування монтажних блоків, що мають довжину до 12 м, хордами зі стикуванням під час монтажу під кутом.

Ортотропна плита проїзної частини складається зі сталевого настилу з листа завтовшки 12 мм, поздовжніх ребер із листа 200×12 мм кроком 400 мм у межах проїзної частини та 500 мм у межах тротуарів й поперечних балок кроком 2000 мм. Перетин поздовжніх ребер із поперечними балками виконано без приварювання їх до стінок балки, з пропуском у вирізи стінок. Таке рішення дозволило не тільки знизити концентрацію напружень та покращити умови роботи плити на циклічне тимчасове навантаження, а й забезпечити можливість застосування автоматичного зварювання при виготовленні плити на заводі.

Зміну поперечного ухилу проїзної частини на ділянках віражів створено за рахунок трапецеїдального скосу бокових стінок головних балок та примусового натягування на укрупнювальній збірці виготовлених за звичайною технологією плоских карт ортотропної плити. При цьому поздовжні ребра можуть легко повертатися у вирізах стінок поперечних балок, а карта плити, без особливих додаткових напружень, закручується, створюючи необхідний відгон віражу в межах монтажного блока. Слід зазначити, що при вико-

ристанні загальноприйнятого на той час рішення вузлів перетину поздовжніх ребер та поперечних балок із одностороннім приварюванням ребер до стінок, здійснення відгону віражу створило би конструктивні та технологічні труднощі.

Поперечні балки ортотропної плити на ділянках відгону віражів мають скоси вертикальних стінок біля монтажних стиків із різними кутами відповідно до кута повороту проїзної частини.

Монтажні стики ортотропної плити проїзної частини прийняті відповідно до конструктивного рішення, захищеного авторським свідоцтвом [6], в якому ребра не доводяться до стику та замінюються стовщенням настилу до 20 мм. При цьому під час монтажу зістиковуються автоматичним зварюванням тільки листи настилу. Зазначимо, що з урахуванням кривини прогонової будови в плані та зварювання із блоків, розташованих по хордах, таке рішення виявилось достатньо ефективним.

Мостове полотно. В якості покриття проїзної частини прийнято стоншений (завтовшки 70 мм) шар асфальтобетону з додаванням епоксидної смоли, який одночасно виконує функцію ізоляції плити проїзної частини. Бар'єрна огорожа складається зі сталевих брусів із гнутих профілів, які опираються на металеві стовпи, розташовані з кроком 4 м. Перила прийняті полегшеними зі сталевих смуг та профільованої сталі. Перила закріплені приварюванням під час монтажу до ортотропної плити. Ліхтарні щогли виготовлені з труб та розраховані на підвішування до них контактної мережі тролейбуса.

Водовідведення на мосту передбачено поперечним стоком води до водовідвідних отворів у бордюрах (звернемо увагу, що наразі таке рішення згідно з вимогами чинних норм не допускається).

Проблеми експлуатації моста. Відповідно до результатів часткового обстеження, проведеного у серпні 2019 року ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського», зафіксована низка дефектів поперечної балки моста через аванкамеру біля деформаційного шва № 11, а саме: наскрізна корозія стінки поперечної балки над опорною діафрагмою головної балки (рис. 4, а) і стінки поперечної балки на консолях (рис. 4, б), а також корозія металу, руйнування антикорозійного покриття на всій площині поверхні поперечної балки.

Також було з'ясовано, що головною причиною зазначених дефектів є незадовільний технічний стан розташованого вище деформаційного шва, внаслідок чого конструкції, що розташовані нижче (поперечні балки), протягом тривалого часу піддавались негативному впливу насиченої агресивними протиожеледними солями сумішами води, яка стікала з проїзної частини. Тому задля запобігання в подальшому такому заливанню наразі виконуються роботи з заміни конструкцій морально та фізично застарілого деформаційного шва з ковзним листом на деформаційний шов нового типу D160 виробництва фірми MAURER SÖHNE.

Що ж стосується заходів із перешкоджання розвиненню ймовірних аварійних ситуацій під час експлуатації моста внаслідок корозійних руйнувань стінки поперечної балки, то терміново було розроблено проект її ремонту. Особливістю цього проекту було те, що з огляду на об'єктивну неможливість заміни поперечної балки на нову через відсутність змоги закриття руху по автопереїзду, прийнято рішення щодо її підсилення шляхом приварювання сталевих листів зав-

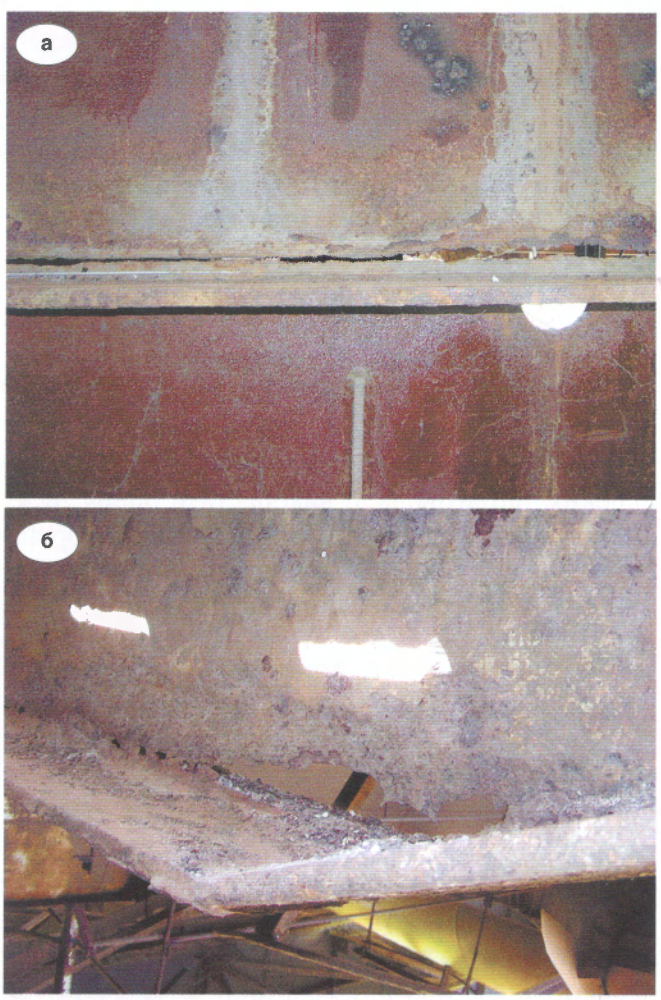

Рис. 4. Наскрізна корозія стінки поперечної балки над опорною діафрагмою головної балки (а) та стінки поперечної балки на консолі (б)

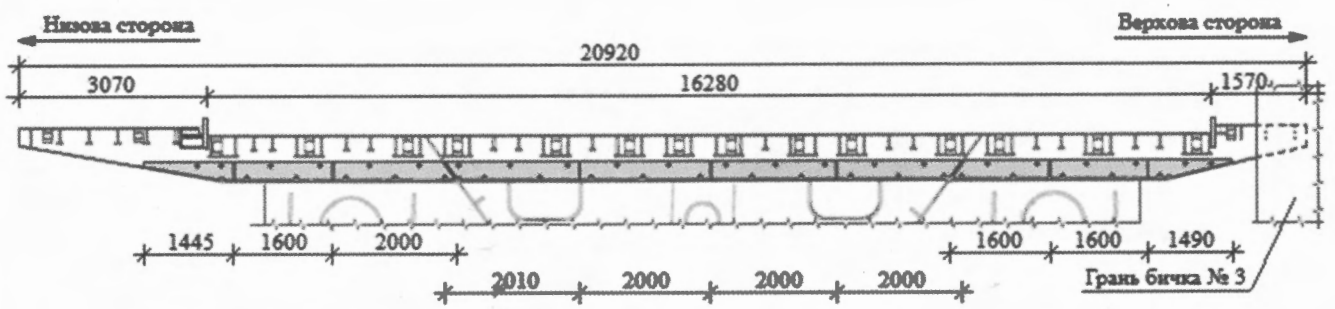

Рис. 5. Схема підсилення поперечної балки моста через аванкамеру біля деформаційного шва № 11

товшки 14 мм та заввишки 300 мм із обох сторін стінки балки за всією її довжиною (рис. 5, виділені темним кольором).

Ремонтні роботи передбачалось виконувати у такій послідовності:

- очищення поверхні поперечної балки від бруду та сміття;
- очищення металоконструкцій, що підсилюються, від оксидів, іржі, окалини та жирових плям відповідно до вимог [4];
- абразиво-струменеве очищення всіх металевих поверхонь конструкцій до ступеня не менше Sa 2,5 у відповідності до вимог [5];
- встановлення листів підсилення стінки поперечної балки у проектне положення, при цьому елементи підсилення із заздалегідь висвердленими отворами повинні встановлюватися із внутрішньої сторони коробки моста;
- закріплення листів підсилення у проектному положенні з допомогою струбцин;
- висвердлення наскрізних отворів у стінці балки та листах підсилення зовнішньої сторони коробки моста по існуючих отворах внутрішніх листів підсилення;
- встановлення болтів діаметром М16 (рис. 5, позначені знаком «+») у висвердлені отвори та стягування за їх допомогою листів підсилення й стінки балки задля досягнення щільного прилягання між собою з метою забезпечення вертикальності стінки поперечної балки та листів підсилення;
- зварювання листів підсилення між собою з обох сторін поперечної балки;
- приварювання листів підсилення до стінки й полки існуючої поперечної балки зварними швами, які повинні виконуватись переривчастими у спосіб 100 мм через 300 мм за декілька заходів, щоб урешті-решт отримати суцільні зварні шви;
- виконання антикорозійного захисту металоконструкцій.

Висновки. Виходячи з вище викладеного, можна дійти наступних висновків:

- виявлені проблеми щодо стану поперечної балки моста через аванкамеру вкотре підтверджують, що застаріла конструкція деформаційних швів із ковзним листом є недосконалою та вимагає заміни на сучасні конструкції, які добре себе зарекомендували у світовій практиці мостобудування;
- зволікання із заміною старих деформаційних швів на нові може призвести до початку руйнування нижче розташованих конструкцій моста і, в першу чергу, – прогонових будов.

[1] СН 200-62. Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб. – Москва: Государственный комитет совета министров СССР по делам строительства, 1962. – 328 с.

[2] СНиП II-Д.7-62. Мосты и трубы. Нормы проектирования. – Москва: Государственный комитет Совета Министров СССР по делам строительства, 1963. – 70 с.

[3] ГОСТ 19282-73. Сталь низколегированная толстолистовая и широкополосная универсальная. Технические условия. – Москва: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР, 1974. – 30 с.

[4] ГОСТ 9.402-80*. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей перед окрашиванием. – Москва: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР, 1981. – 93 с.

[5] ISO 8501-1:2007. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Visual assessment of surface cleanliness. Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings (Подготовка стальной основы перед нанесением красок и подобных покрытий. Визуальная оценка чистоты поверхности. Часть 1: Степени ржавости и степени подготовки непокрытой стальной основы и стальной основы после полного удаления прежних покрытий). – Geneva: ISO/TC 35/SC 12, 2007. – 74 p.

[6] *Киреенко В.И.* Заявитель ГПИ «Укрпроектстальконструкция». Стыковое соединение металлических ортотропных плит настила проезжей части моста. – А. с. 431279 (СССР). Опубл. в Б.И. – 1974. – № 21. – С. 126

Надійшла 18.10.2019 р.

ОСОБЛИВОСТІ ВИБУХОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ПРАКТИЧНІ ПРИЙОМИ ЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ ВІД ВИБУХУ

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

Відомо, що навантаження від вибуху й повітряних ударних хвиль, які на своєму шляху послідовно діють на споруди та об'єкти різного призначення, можуть генеруватися найрізноманітнішими пристроями, які спрацювали, або умовами, що трапилися випадково чи були створені навмисно. При цьому джерелами вибухів, як правило, є:

- ємкості під тиском, заповнені інертними, горючими або легкозаймистими газами;
- миттєве займання та детонація пилу та інших частинок;
- викид (випадковий або навмисний) горючих або вибухових газів у напівзамкнутому або незамкнутому просторі;
- саморобні вибухові пристрої, в яких застосовуються сільськогосподарські добрива й дизельне паливо, порохові заряди чи видозмінена військова зброя;
- широкий спектр комерційних і військових вибухових речовин.

Загалом, вибухи слід розглядати як «розриви бомб» у результаті протікання екзотермічних хімічних реакцій, коли енергія вивільнюється за порівняно малий проміжок часу у відносно невеликий простір таким чином, що при цьому виникає хвиля стиснення кінцевої амплітуди і довжини, яка розповсюджується від джерела вибуху. На відміну від цього, під «ідеальними» вибухами розуміються вибухи, що грунтуються на припущенні про миттєве вивільнення енергії у певній точці. Проте в будь-якому випадку утворені в результаті вибуху вибухові хвилі можуть поширюватися не тільки повітрям, що зазвичай становить найбільший інтерес при проектуванні будівельних конструкцій, а й проходити і по поверхні землі (т.з. земляний удар) або води.

Що ж стосується внутрішньої природи вибуху, то вона полягає у вивільненні накопиченої потенційної енергії, а саме це вивільнення характеризується яскравим спалахом і сильним звуком. Під час вибуху частина енергії перетворюється на теплове випромінювання (спалах), а частина вивирається в повітряний простір як вибухова хвиля, а також іде в грунт як земляний удар, одночасно поширюючись в радіальних напрямках у вигляді ударної хвилі. Зрозуміло, що вибуховою речовиною може бути матеріал, який:

- містить речовину або суміш, які залишаються без змін за звичайних умов, однак зазнають швидких змін хімічного характеру при активації;
- створює реакцію, яка дає вихід газам, обсяг яких при нормальному тиску стабільний, а за високих температур набагато більший, ніж у початковому стані;
- викликає зміни ізотермічного характеру для нагрівання продуктів реакції з подальшим збільшенням їх тиску.

Вибухові навантаження найчастіше прийнято розглядати як похідні екзотермічних реакцій, які утворюються в результаті «детонацій», втім ударні хвилі у повітрі можуть виникати й у результаті розриву посудин під тиском і високої швидкості фронту полум'я при згорянні (що є характерним також для необмеженого поширення хмари вибухових парів). Коли вихідний матеріал може протистояти надзвуковій хвилі (фронту полум'я) значної швидкості, що створює локальний високий тиск у межах вихідного матеріалу, то реакція вважається детонацією, за якої вся накопичена потенційна енергія вивільнюється у результаті хімічної реакції. А швидкості фронту полум'я, при згорянні нижчі за швидкість детонації, дають в результаті реакцію (вибух) незабаром після детонації, що має назву миттєве займання, під час якого вивільнюється лише частина накопиченої потенційної енергії в процесі протікання хімічної реакції. Тому часто-густо клас вибуху при миттєвому займанні або детонації встановлюється в залежності від виходу наявної енергії. Такий вихід енергії зазвичай відбувається у вигляді потужного удару, викликаного динамічним впливом (імпульсом), детонацією первинної вибухової речовини або ж у результаті тертя.

Типові параметри вибухової хвилі. Зазначимо, що у найбільш загальному розумінні вибухова хвиля – це спричинений вибухом рух середовища. Таке визначення можна перефразувати ще й наступним чином: вибухова хвиля є ознакою процесу, під час якого внаслідок високого тиску газів, що утворилися в результаті вибуху, незбурене середовище зазнає різкого стиснення і набуває великої швидкості. А стан руху передається від одного шару середовища до іншого так, що область, охоплена вибуховою хвилею, швидко розширюється, і на її фронті середовище стрибком переходить із початкового незбуреного стану до стану руху з більш високими тиском, щільністю і температурою. Причому, що характерно, ця стрибкоподібна зміна стану речовини на фронті вибухової хвилі поширюється з надзвуковою швидкістю.

Типовими параметрами вибухової хвилі є піковий тиск (амплітуда), тривалість, форма і сумарний тиск у кожен момент часу або імпульс. Крім того, вибухові хвилі, які походять від джерел у незамкненому просторі, характеризуються ще й наступним:

- мають миттєве зростання у декілька разів і експоненціальне загасання, хоча складна геометрія поширення зовнішніх і внутрішніх вибухових впливів може проявлятися й у більш складних формах хвиль;
- можуть бути масштабовані або описуватися у вигляді масштабної величини відстані від джерела вибуху до даної конструкції, при цьому масштабовану величину відхилення Z можна визначити наступним чином: $Z = R/\sqrt[3]{W}$, де R – відстань від джерела вибуху; W – вага вибухового заряду;
- можуть мати як позитивні, так і негативні фази (негативна фаза є результатом «відновлення» атмосфери поблизу джерела вибуху).

Спрощений графік залежності зміни тиску вибухової хвилі в часі у вільному просторі представлений на рис. 1.

Що ж стосується вибухів у замкненому просторі або там, де має місце часткове обмеження (до прикладу, міські квартали по типу «каньйону», коли будинки, які розташовані щільно один до одного, створюють часткове обмеження), то вони характеризуються більш складними параметрами і формами кривих. Відбиваючі поверхні будинків у таких випадках посилюють тиск і, в результаті, імпульс. На рис. 2

Рис. 1. Спрощений графік залежності зміни тиску вибухової хвилі в часі у вільному просторі $p = f(t)$:
t^+_0 – тривалість позитивної фази;
t^-_0 тривалість негативної фази

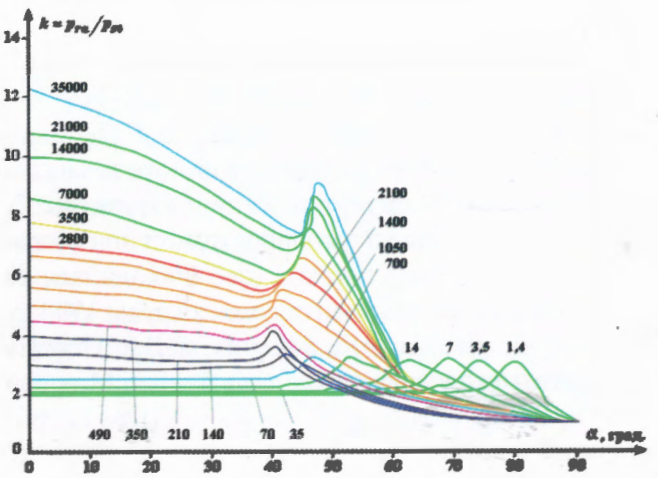

Рис. 2. Графіки залежності коефіцієнта відбитого тиску від кута відбиття у замкненому просторі $k = f(\alpha)$ (цифрами позначений піковий аварійний тиск p_{s0}, кПа)

наведені графіки кривих функціональної залежності коефіцієнта відбитого тиску вибухової хвилі k, що є відношенням відбитого тиску $p_{r\alpha}$ до пікового аварійного тиску p_{s0}, від кута відбиття α при взаємодії хвилі та споруди при різних значеннях пікового аварійного тиску.

Відмінність вибухових навантажень від сейсмічних впливів. Як вже було зазначено, вибухові навантаження діють протягом відносно нетривалого проміжку часу у порівнянні з сейсмічними впливами. З огляду на вказане ефект деформування матеріалу під час вибуху виходить на критичний шлях, що потребує його обов'язкового враховування при прогнозуванні роботи вузлових з'єднань будівельних конструкцій. Також зазначимо, що навантаження вибухового

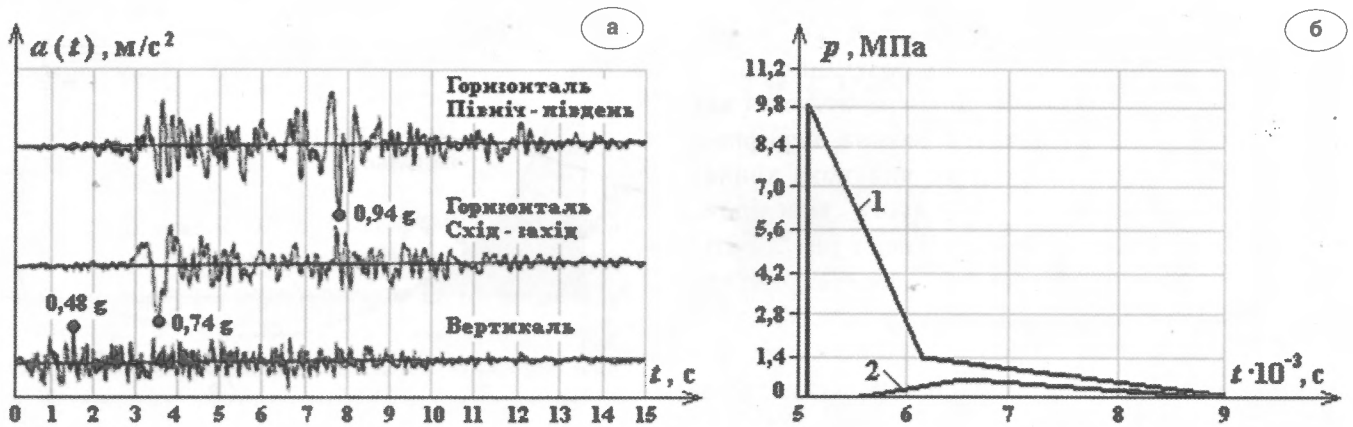

Рис. 3. Прискорення для споруди в м. Нортбрідж згідно з тривалістю події (а) і тиск на колони у результаті вибуху в будівлі Мюррей у м. Оклахома Сіті (б):
1 – передній фасад будівлі; **2** – задній фасад будівлі

типу діють на споруду нерівномірно, що виражається, по-перше, в змінності амплітуд навантажень на передньому фасаді будівлі і, по-друге, у різкому зменшенні їхніх величин на її (будівлі) бокових і задньому фасадах враховуючи віддалення від центру вибуху. Ілюструє сказане рис. 3, на якому представлені загальновідомі дані стосовно прискорень для споруди, яка знаходилася за сім кілометрів від епіцентру землетрусу 1994 р. у м. Нортбрідж, штат Каліфорнія, США, і тисків на колони під час вибуху бомби в будівлі Мюррей у м. Оклахома Сіті, штат Оклахома, США. Із приведеного рисунка також вбачається, що землетрус тривалістю 12 с у м. Нортбрідж тривав приблизно у 1000 разів довше, ніж вибух бомби з 9-мілісекундним імпульсом у будівлі Мюррей.

Тепер звернемо увагу на те, що впливи від вибухових навантажень зазвичай носять локальний характер, що призводить до місцевих серйозних пошкоджень або руйнувань. І, навпаки, сейсмічні впливи проявляються у русі земляного масиву, рівномірно прилеглого до основи або фундаменту будівлі, при цьому як споруда загалом, так й усі її складові частини піддаються «струсу». Причому важливим є те, що під час таких поштовхів наявність розподіленого непружного потенціалу конструктивних елементів та їхніх вузлових з'єднань пом'якшує умови глобального руйнування споруди завдяки поступовому формуванню і накопиченню у з'єднаннях різних дефектів із подальшою їх трансформацією в специфічний аварійний механізм – так званий «шарнірний вузол», який є типовим результатом реагування переважної більшості вузлових з'єднань балок із колонами на рівні міжповерхового перекриття на дію навантажень за умови роботи матеріалу за межею пружності.

Проілюструємо викладене наступним простим прикладом. На рис. 4 зображено вузлове з'єднання сталевої балки зі сталевою колоною та відображена його пластична робота під дією згинального моменту у вигляді графіка отриманої експериментальним шляхом залежності між відношенням згинального моменту M до його граничного значення $M_{гр}$ і кутом вигину α.

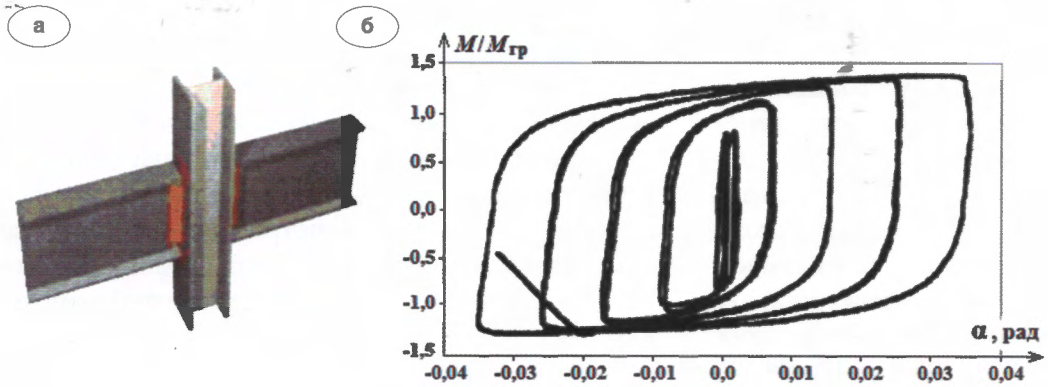

Рис. 4. Вузлове з'єднання балки з колоною (а) та графік залежності «$M/M_{гр}$ – α» (б)

Аналізування графіка цієї залежності дозволяє дійти декількох важливих висновків. Перший із них полягає в тому, що як дослідженому типу вузлового з'єднання зокрема, так і з'єднанням сталевих конструктивних елементів загалом властиві значні запаси роботоспроможності. А другий стосується прогнозування роботи споруд, які зазнають локалізованих пошкоджень від вибуху, із меншими пластичними властивостями вузлових з'єднань – руйнування усього лише обмеженої кількості вузлових з'єднань із великою вірогідністю може призвести до виникнення наростаючого обвалення.

Незважаючи на наявну відмінність вибухових навантажень від сейсмічних впливів, усетаки деякі аспекти сейсмічного розрахунку можуть використовуватися для споруд, які піддаються впливу вибухових навантажень. Так, проведені після землетрусів дослідження з'єднань елементів конструкцій були використані для накопичення інформації про додаткові згинальні моменти й обертальний потенціал при подальшому застосуванні цих даних у розрахунках на вибухові або наростаючі руйнування. Проте, на жаль, у більшості досліджень не проводилось вимірювання інших вкрай важливих для оцінювання роботи непружних з'єднань за умов інтенсивних впливів від вибухових навантажень параметрів, а саме: скручування та бокового вигину елементів та показників деформації матеріалу. До того ж у згаданих дослідженнях не брали до уваги непружну роботу, пов'язану з ослабленням наростаючого руйнування, у випадках осьового розтягування балки при взаємодії зі згинальним моментом і деформування рамних систем із статично визначуваними з'єднаннями. Таким чином, особливі характеристики споруди при детальному розгляді фактора сейсміки, які можуть адекватно враховуватися у випадках землетрусів, такі, наприклад, як бічна жорсткість, за умови зсуву лише однієї стіни можуть бути гармонізовані з випадками вибухів.

Можливість штучного захисту будівлі від вибуху. З метою захисту будівлі або споруди від ударних хвиль із використанням способу облаштування поверхні, що відбиває вибух і обмежує певною мірою прогнозоване навантаження на конкретну споруду, можна споруджувати т.з. «вибухобезпечні стіни». На жаль, ефективність подібних стін істотно залежить від відстані задньої частини цієї захисної стіни до споруди або будівлі. Захисна стіна може також

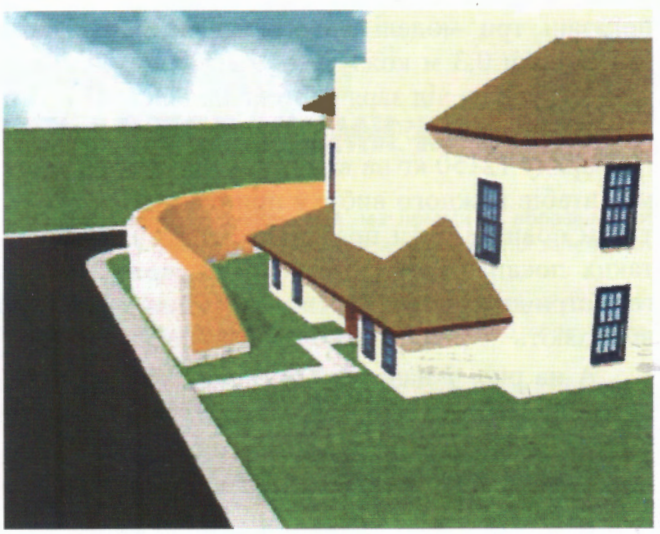

Рис. 5. Принциповий зовнішній вигляд вибухозахисної стіни

застосовуватись для протидії повністю відбитому вибуховому навантаженню. Проте треба мати на увазі, що під впливом перевантажень вона може стати сама по собі джерелом значних небезпечних ушкоджень. Один із найбільш типових прикладів можливої конфігурації захисної стіни наведено на рис. 5.

Як видно з рисунка, вибухозахисна стіна завишки близько 3 м розміщена з метою захисту споруди, яка має приблизно втричі більшу висоту. Стіна ззаду підперта земляною масою задля зменшення ефекту розкидання уламків бетону у разі її обвалення. В цьому випадку вибуховий імпульс посередині стіни зменшується приблизно на 70 % свого початкового значення без вибухозахисної стіни. Втім, можна досягти і більш істотного зменшення величини вибухового імпульсу в залежності від конфігурації і геометрії стіни.

Умови, за яких вибухові навантаження можна розглядати як рівномірно розподілені. Відомо, що якщо кут зіткнення між ударною хвилею від вибухового заряду і конструкцією або краєм конструктивного елемента чи його кінцем перевищує 45 градусів, то на споруду діють істотно знижені тиски й імпульси. Тому, коли відстань до заряду перевищує половину ширини і висоти споруди або її елемента (за умови, що заряд знаходиться в центрі конструкції або елемента), то навантаження на них можуть бути наближено усереднені. А для менших відстаней навантаження зазвичай слід розглядати як нерівномірні. Ілюструє сказане рис. 6, на якому зображені можливі зміни навантаження по поверхні в залежності від її геометрії. На рисунку

показані три моделі колон (заввишки 3,6 м і завширшки 0,3 м кожна) під навантаженням від вибуху: перша від заряду 56 кг на відстані 1,5 м; друга від заряду 450 кг на відстані 3,0 м і остання від заряду 12150 кг на відстані 9,0 м. Визначення масштабів кожного вибуху припускає, що пікові тиски повинні бути практично ідентичними при таких поєднаннях відстані і ваги заряду, проте геометричні дані (кути зіткнення) сильно впливають на розподіл тиску по висоті колон.

А на рис. 7 наведено складний стан середовища, що оточує споруди, у результаті вибуху в умовах міської забудови. З цього рисунка вбачається, що численні будівлі створюють багато поверхонь для відбивання вибухової хвилі, що, в свою чергу, ускладнює визначення її параметрів.

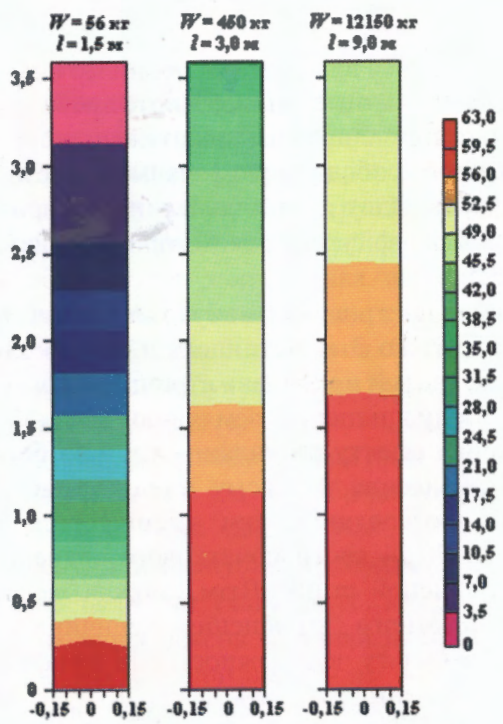

Рис. 6. Порівняння розподілу вибухового тиску (МПа) на колони, навантажені однаковим піковим тиском при різних масштабованих відстанях

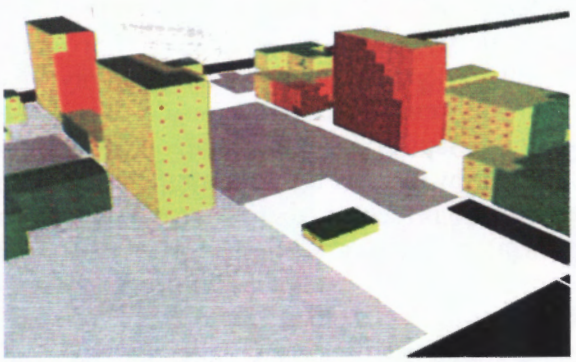

Рис. 7. Моделювання розподілу вибухового тиску в умовах міської забудови

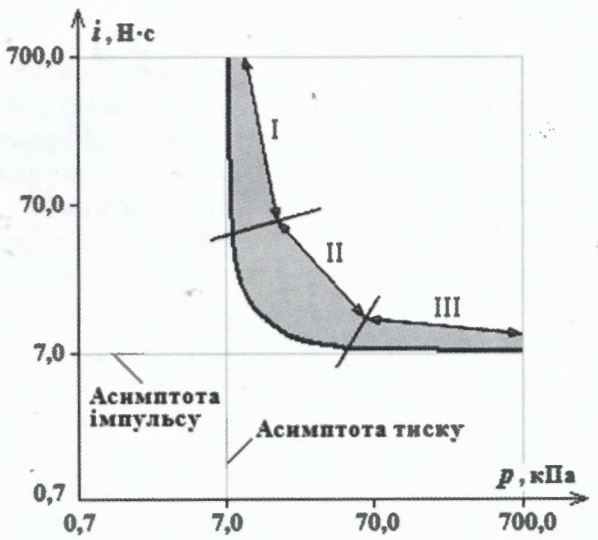

Рис. 8. Характерний приклад діаграми «*P – i*» :
I – область квазистатичного навантаження; II – область динамічного навантаження; III – область імпульсного навантаження

Однак задля досягнення цієї мети можна використовувати спрощені методи, щоб «оцінити» або отримати «відчуття» того, як спрацює запроектована конструкція на протидію вибухам. Існує багато рішень щодо роботи і енергії, які обмежують ступінь нееластичної реакції різних конструктивних елементів. Так звані діаграми «тиск–імпульс», або «*P–i*», у графічному вигляді представляють собою асимптотичні межі у разі, якщо зміна пікового тиску незначно змінює імпульс у часі для максимальної реакції, залежної від тиску. Також ця діаграма може бути застосована і для тих випадків, коли тривалість вибухового навантаження є короткочасною порівняно з часом для максимальної реакції або частотою власних коливань споруди. Характерний приклад діаграми «*P–i*» наведений на рис. 8.

На завершення звернемо увагу ще на один суттєвий аспект ударних впливів, який різко відрізняється від уже розглянутих – навантаження від удару транспортного засобу або повітряного судна. Врахування цих навантажень є достатньо складною проблемою, коли жорсткість і руйнівна сила об'єкта, який завдає удару (автомобіля чи літака), визначають навантаження, які передаються на споруду. При цьому задля реалізації сформульованої задачі доцільно застосовувати для розрахунку метод скінченних елементів, за яким можливо детально проаналізувати ситуацію.

Надійшла 10.01.2019 р.

УДК 621.924

ПРОДУКТИВНІСТЬ РУЧНИХ МАШИН ПІД ЧАС РОБОТИ З АБРАЗИВНИМИ АРМОВАНИМИ КРУГАМИ

Розглянуті питання визначення продуктивності при проведенні робіт ручними шліфувальними машинами з абразивними армованими кругами в системі «оператор – ручна машина – робоче середовище». Приведено результати дослідження залежності продуктивності від геометричних та режимних параметрів при роботі абразивного круга.

The issues of determining the performance of manual grinding machines with abrasive reinforced circles in the system «operator – manual machine – working environment» are considered. The results of the study of the dependence of performance on geometric and mode parameters during the operation of the abrasive wheel are presented.

Ключові слова: кутова шліфувальна машина; абразивний армований круг; продуктивність, втомлюваність.

О.А. Марченко
інженер Київського національного університету будівництва і архітектури

При будівельно-монтажних роботах для виконання масових трудомістких відрізних і зачисних операцій набули застосування ручні кутові шліфувальні машини з використанням абразивних армованих кругів. Ефективне використання техніки дає змогу інтенсифікувати процес будівництва. Розроблення методики ефективного використання машин і оцінки технічного рівня механізованого інструменту з абразивними робочими органами в залежності від умов виконання робіт є одним із шляхів досягнення цієї мети. У зв'язку з цим актуальними є питання, пов'язані з визначенням впливу різних чинників на продуктивність проведення робіт.

Тобто роботу абразивного армованого круга доцільно розглядати як процес абразивного зношування робочого середовища [1, 2].

Процес роботи ручних машин має ряд особливостей, серед яких слід виділити наступні: нестабільність подачі по величині та напрямку; безперервна зміна у межах допустимої потужності приводу, інтенсивності процесу роботи; обмеження зусиль, що виникають у зоні контакту абразивного армованого круга з робочим середовищем, потужністю приводу та індивідуальними фізіологічними даними працівника (оператора).

Говорячи про продуктивність роботи робочими інструментами при їх використанні у ручних машинах, необхідно враховувати виникаючу втомлюваність оператора, яка збільшується з часом. Під втомлюваністю розуміється зниження працездатності оператора під час виконання тієї чи іншої роботи. У випадку, який розглядається, на виникнення та розвиток втомлюваності, вочевидь, впливають: вага, потужність приводу, швидкість машини та її компонування.

Питома технічна продуктивність при різанні одним абразивним кругом:

$$Q_p = Q_p^0 \cdot \bar{\varphi}(M, \tau_p), \qquad (1)$$

де $Q_p^0 = \frac{\Delta V_c}{\tau_p}$ – продуктивність різання абразивним армованим кругом без урахування втомлюваності оператора; $\Delta V_c = F_d b N$ – об'єм зруйнованого матеріалу при розрізанні; $\bar{\varphi}(M, \tau_p)$ – коефіцієнт, який враховує зниження продуктивності в залежності від тривалості роботи τ та маси машини M:

$$\bar{\varphi}(M, \tau_p) = \frac{1}{\tau_p} \int_0^{\tau_p} \varphi(M, x)\, dx,$$

$\tau_p = \frac{NL_0 + R_0 - R_f - L_1}{V_n}$ – час, витрачений на розрізання; V_n – швидкість подачі абразивного інструменту; F_d – площа поперечного перерізу матеріалу, що розрізається; b – товщина абразивного круга; N – кількість розрізів, що виконується одним кругом; L_0 – розмір об'єкта, що розрізається, у напрямку подачі; L_1 – товщина розробки матеріалу; R_0, R_f – початковий радіус абразивного круга та затискного фланця.

Зносостійкість відрізного абразивного армованого круга характеризується коефіцієнтом шліфування

$$S_p = \frac{dV_d}{dV_k},$$

де dV_d, dV_k – елементарний об'єм, який утворюється у процесі різання розробленого матеріалу та зношеної частини круга, відповідно. За умови, що ширина пропилу дорівнює ширині круга, зносо-

© Марченко О.А.

стійкість можна виразити через співвідношення площ поперечного перерізу обробленого матеріалу та зношеної частини круга, відповідно $S_p = \frac{dF_d}{dF_k}$.

За N розрізів круг зношується від початкового радіуса R_0 до величини, що включає радіус затискного фланця та товщину розрізного матеріалу $R_f + L_1$. У такому випадку отримуємо:

$$NF_d = 2\pi \int_{R_f - L_1}^{R_0} S_p R dR$$

або

$$N = \frac{2\pi}{F_d} \int_{R_f - L_1}^{R_0} S_p R dR,$$

де R – відстань від центра круга (радіус).

Підставляючи отримані значення в рівняння (1), отримуємо:

$$Q_p = 2\pi b \int_{R_f - L_1}^{R_0} S_p R dR \frac{\overline{\varphi}(M, \tau_p)}{\tau_p}. \quad (2)$$

Питома технічна продуктивність при зачисних роботах одним абразивним кругом:

$$Q_z = Q_z^0 \cdot \overline{\varphi}(M, \tau_z), \quad (3)$$

де $Q_z^0 = \frac{\Delta V_z}{\tau_z}$ – продуктивність зачистки без урахування втомлюваності оператора; τ_z – тривалість роботи.

Зносостійкість зачисного круга:

$$S_z = \frac{dV_z}{dV_k},$$

де dV_z, dV_k – елементарний об'єм, який утворюється у процесі зачистки розробленого матеріалу та зношеної частини абразивного круга, відповідно.

$$dV_k = 2\pi R dR \frac{b}{\sin\alpha}.$$

Після інтегрування отримуємо:

$$\Delta V_z = 2\pi \frac{b}{\sin\alpha} \int_{R_f}^{R_0} S_z R dR.$$

Після підстановки відповідних значень до рівняння (3) отримуємо:

$$Q_z = 2\pi \frac{b}{\sin\alpha} \int_{R_f}^{R_0} S_z R dR \frac{\overline{\varphi}(M, \tau_z)}{\tau_z}. \quad (4)$$

Згідно з залежностями (2) та (4) невідомими параметрами є зносостійкість абразивних армованих кругів та коефіцієнт, який враховує вплив втомлюваності оператора. При цьому залежності показують, що збільшення продуктивності прямо пов'язане із підвищенням зносостійкості інструменту.

Визначення зносостійкості круга та його співвідношення до режимів роботи складне техніко-економічне завдання, яке вирішується експериментально в залежності від умов експлуатації абразивних армованих кругів. У роботі [4] приведено узагальнену залежність між коефіцієнтом шліфування для відрізних кругів, робочою швидкістю і швидкістю подачі:

$$S_p = k\left(\alpha \frac{V_p}{V_{max}} + \beta\right)\left(\frac{C}{V_n}\right)^{\frac{1}{m}},$$

де V_p, V_{max} – колова швидкість зношеного круга та нового, відповідно; V_n – швидкість подачі робочого інструменту; k – коефіцієнт, який враховує жорсткість конструкції; α, β, C, m – експериментальні коефіцієнти, що визначені у залежності до співвідношення площ поперечного перерізу обробленого матеріалу та зношеної частини круга F_d / F_k.

Приклад зміни коефіцієнта шліфування від швидкісних параметрів (колової V і швидкості подачі V_n) та співвідношення F_d / F_k приведено на рис. 1.

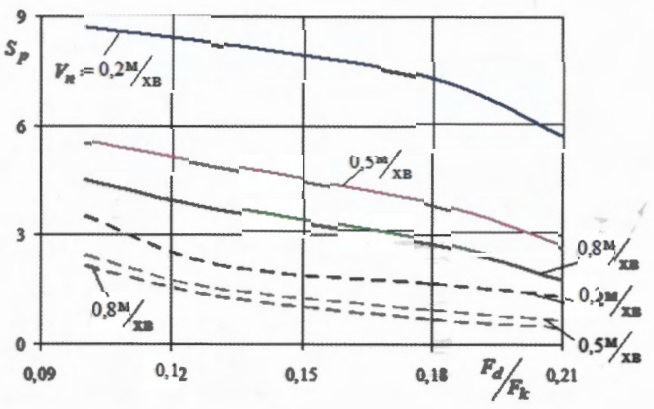

Рис. 1. Зміна коефіцієнта шліфування від швидкісних параметрів та співвідношення F_d / F_k:
суцільна лінія – при $V_p = V_{max}$ = 80 м/с;
пунктирна – при V_p = 50 м/с

З точки зору оцінки ефективності проведення робіт абразивними кругами важливим є визначення впливу силових і енергетичних параметрів процесу руйнування робочого середовища на зміну продуктивності проведення робіт.

Величина зносу при абразивному руйнуванні на одиницю шляху залежить від абразивних властивостей робочого середовища та матеріалу круга і від величини контактного навантаження P_k між інструментом і робочим середовищем [1, 2]:

$$\Delta V_c = wP_k \,, \qquad (5)$$

де w – питома енергоємність, що враховує абразивні властивості матеріалу, м^3/(Н·м).

Відповідно до режиму роботи абразивного круга та залежності (5) припустимим є те, що продуктивність роботи круга залежить, за інших рівних умов, від зусилля притискання круга до матеріалу обробки (нормальна складова сили різання) та швидкості різання.

Враховуючи те, що при роботі ручних шліфувальних машин характерним є повне використання потужності приводу [5, 6], справедливою є залежність між величиною P_k та встановленою потужністю N_{dr} приводу.

За відсутності жорсткого направлення подачі, активну участь у процесі різання беруть бокові поверхні круга, що знаходяться у пропилі, за рахунок його перекосу при неточній направленості подачі та еластичності круга. У результаті чого виникають значні тангенціальні зусилля по бокових поверхнях круга з оброблюваним матеріалом, набагато більші ніж за стаціонарних умов. Це значно знижує ефективність роботи машини. У зв'язку з цим потужність на шпинделі шліфувальної машини можна представити наступним чином:

$$N_{dr} = N_{tn} + N_{tx} \,, \qquad (6)$$

де $N_{tn} = P_{tn} \cdot V_n$ – потужність різання торцевою поверхнею круга; $N_{tx} = P_{tx} \cdot V_x$ – потужність різання боковими поверхнями; P_{tn}, V_n – тангенціальна складова сили різання торцевою поверхнею та колова швидкість точки її прикладання, відповідно; P_{tx}, V_x – тангенціальна складова сили різання боковою поверхнею та колова швидкість точки її прикладання, відповідно.

Оскільки тертя боковою поверхнею у процесі різання відбувається поблизу її периферії, то можна приблизно рахувати, що $V_x = V_n = V$. А враховуючи, що

$$\frac{P_{tn}}{P_n} = \mu_n \quad \text{та} \quad \frac{P_{tx}}{|P_x|} = \mu_x \,,$$

де $|P_x|$ – абсолютне значення бокового зусилля; μ_n, μ_x – коефіцієнт співвідношення тангенціальної та нормальної складових сил різання, що залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу виробу та абразивного круга, що діють на торцевій та боковій поверхнях робочого органа, відповідно, значення коефіцієнтів μ_n та μ_x можуть бути пов'язані через співвідношення $k_\mu = \frac{\mu_x}{\mu_n}$ за однакових значень коефіцієнтів по поверхнях робочого органа $\mu_n = \mu_x = \mu$ співвідношення $k_\mu = 1$.

Тоді, підставивши відповідні залежності до рівняння (6), отримуємо значення контактного навантаження (нормальна складова сили різання):

$$P_n = \frac{N_{dr}}{\mu_n \cdot V} - |P_x| \cdot k_\mu \,.$$

У разі роботи ручної машини з абразивними армованими відрізними кругами шлях різання на одиницю часу визначається коловою швидкістю, а навантаження – нормальною складовою сили різання P_n. Тому продуктивність (об'єм знятого матеріалу) матиме наступний вид:

$$Q = wP_nV = w\left(\frac{N_{dr}}{\mu} - |P_x| \cdot k_\mu V\right). \qquad (7)$$

Лінійна (погонна) продуктивність

$$Q_l = \frac{Q}{F} = \frac{w}{F}\left(\frac{N_{dr}}{\mu} - |P_x| \cdot k_\mu V\right), \qquad (8)$$

де F – площа контакту периферії круга з матеріалом, що обробляється.

Залежність (8) показує, що лінійна продуктивність при використанні повної потужності приводу змінюється зворотно-пропорційно площі контакту круга з оброблюваним матеріалом.

З рівнянь (7) та (8) видно, що бокова складова сили різання знижує значення продуктивності проведення робіт із різання робочого середовища, причому за великих швидкостей обертання величина зниження продуктивності пропорційно збільшується. Для зниження цього ефекту необхідно застосовувати абразивні круги зі зниженим значенням коефіцієнта μ_x. Цього можна досягти, наприклад, використовуючи круги з шорсткою боковою поверхнею [1, 7], які у процесі роботи, за рахунок виступаючих абразивних зерен, здійснюють мікророзрізання робочого середовища, в той час, як більш гладкі поверхні його тільки деформують. Крім цього, для таких кругів складається більш сприятливий тепловий режим в результаті інтенсифікації відводу тепла та зменшення контакту полімерної матриці круга з робочим середовищем.

У зв'язку з тим, що втомлюваність впливає на зусилля, які оператор прикладає до машини, головним чином на нормальну складову сили різання P_n та величину бокового зусилля P_x, слід припустити, що вплив втомлюваності на ці складові сили протилежний: P_n зі збільшенням втомлюваності буде зменшуватися, а P_x – збільшуватися. Це пояснюється тим, що зі збільшенням втомлюваності величина зусилля притискання круга до робочого матеріалу зменшується та одночасно знижується точність утримання машини (круга) відносно пропилу, що призводить до збільшення бокової складової.

Тобто, як і в рівнянні (1), у вираз для визначення продуктивності при роботі з ручними машинами слід ввести коефіцієнти, які враховують зміну зусиль P_n та P_x, $\overline{\varphi}_n(M,\tau_z)$ та $\overline{\varphi}_x(M,\tau_z)$, відповідно

$$Q = w\left(\frac{N_{dr}}{\mu} - \frac{|P_x|\cdot k_\mu V}{\overline{\varphi}_x(M,\tau_z)}\right)\overline{\varphi}_n(M,\tau_z); \qquad (9)$$

$$Q_l = \frac{w}{F}\left(\frac{N_{dr}}{\mu} - \frac{|P_x|\cdot k_\mu V}{\overline{\varphi}_x(M,\tau_z)}\right)\overline{\varphi}_n(M,\tau_z). \qquad (10)$$

На рис. 2–5 побудовані графіки залежності приведеної лінійної продуктивності Q_l/w від різних параметрів при таких незмінних значеннях: $V = 80$ м/с; $\mu = 0{,}4$; $k_\mu = 1$; $P_x = 20$ Н; $\overline{\varphi}_n(M,\tau_z) = 1$ та $\overline{\varphi}_x(M,\tau_z) = 1$.

Аналіз залежностей, зображених на рис. 2, свідчить, що збільшення величини бокового зусилля P_x призводить до пропорційного зниження питомої продуктивності роботи круга (Q_l/w). Перетин з нульовою лінією відображає неможливість проведення корисної роботи машини (робота тільки боковими гранями круга), не в напрямку подачі інструменту. Продуктивність знижується з ростом нормальних зусиль на бокових гранях абразивного армованого круга. Для зменшення впливу бокового зусилля, зниження його величини та вірогідності появи, при роботі зі шліфувальними машинами малої потужності доцільно їх використання з різними пристосуваннями, які дозволяють зберігати напрямок подачі.

Як видно з графіка на рис. 3, доцільна потужність шліфувальної машини, необхідна для роботи абразивними армованими кругами з коловою швидкістю 80 м/с (максимальне її значення для більшості кругів, що широко застосовуються), повинна складати не менше 0,7 кВт. За інших рівних умов продуктивність прямо пропорційна

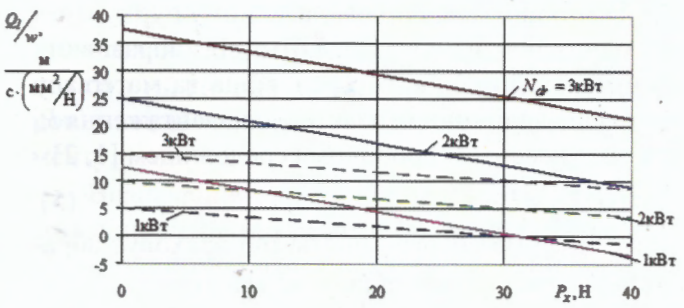

Рис. 2. Вплив бокового навантаження на продуктивність круга: суцільна лінія – F = 200 мм²; пунктирна – F = 500 мм²

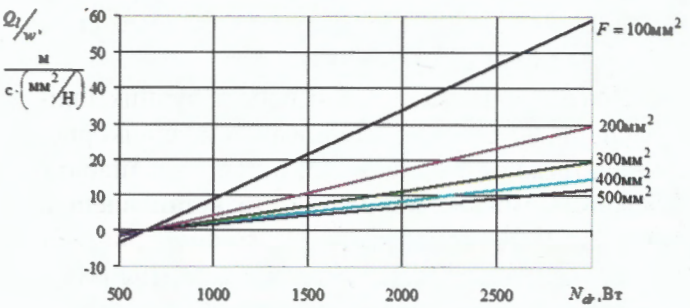

Рис. 3. Вплив потужності на продуктивність круга при різних значеннях площини перерізу матеріалу розрізання

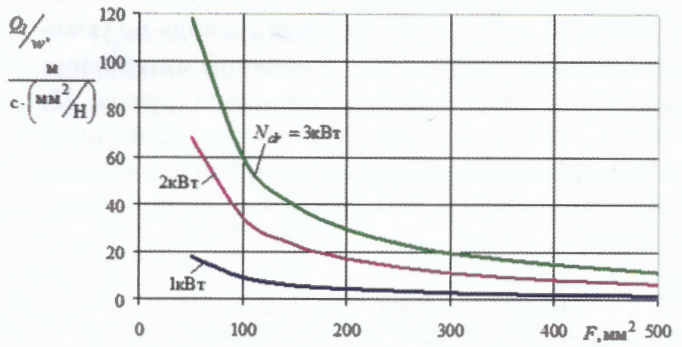

Рис. 4. Вплив величини площини перерізу матеріалу розрізання на продуктивність круга при різних значеннях потужності приводу

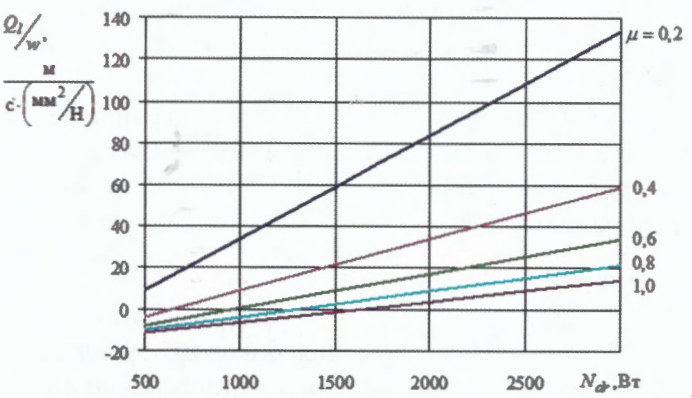

Рис. 5. Вплив потужності на продуктивність круга при різних значеннях коефіцієнта μ

потужності приводу. Практично потужність повинна бути більшою за цю величину, так як при N_{dr} = 0,7 кВт продуктивність незначна, а при боковому зусиллі P_x = 20 Н вона знижується до нуля.

Збільшення площі перерізу матеріалу різання призводить до зниження лінійної продуктивності проведення робіт армованими абразивними кругами (рис. 4). З точки зору збільшення продуктивності велике значення має застосування для різання і шліфування ручних машин із більшим значенням потужності приводу. Збільшення потужності приводу (N_{dr}) з 1 кВт до 2 кВт призводить до збільшення питомої лінійної продуктивності (Q_l /w) у 3,8 раза, а при збільшенні з 2 кВт до 3 кВт – у 1,7 раза. Необхідно зауважити, що так як маса машини і її потужність пов'язані між собою та обмежені за величиною, неабияку роль для ефективного використання машини відіграє її коефіцієнт корисної дії, максимально повне використання потужності машини у робочому процесі.

Залежності (9) та (10) також свідчать про те, що на продуктивність значно впливає величина коефіцієнта співвідношення тангенціальної складової до нормальної (тертя) μ, що характеризує процес навантаження круга, та величина якого залежить, в основному, від фізико-механічних властивостей матеріалу круга і матеріалу обробки.

На рис. 5 розглянуто вплив коефіцієнта μ у межах 0,2…1 на приведену лінійну продуктивність з урахуванням дії бокового зусилля P_x = 20 Н та площі контакту периферії круга з матеріалом, що оброблюється F = 100 мм^2.

Так, наприклад, при роботі шліфувальної машини з витратою потужності приводу N_{dr} = 2 кВт при переході до обробки матеріалу з коефіцієнтом μ = 0,4 до матеріалу, у якого μ = 0,2 питома лінійна продуктивність роботи (Q_l /w) зменшується приблизно в 2,5 раза, при переході з μ = 0,6 до 0,2 – у 4,8 раза, а з μ = 0,8 до 0,2 – у 9,3 раза. Також з графіка видно, що продуктивна робота ручної шліфувальної машини, при прийнятих умовах роботи, за використання потужності N_{dr} = 0,5 кВт можлива тільки для матеріалів, для яких μ < 0,31; при N_{dr} = 0,5 кВт – μ < 0,62; при N_{dr} = 1,5 кВт – μ < 0,93.

Тому, при дослідженні ефективності ручних шліфувальних машин з абразивними армованими кругами, важливим є визначення значення коефіцієнта μ для різних робочих середовищ.

Висновки. Проведений аналіз дозволяє розглянути процес роботи ручних машин як систему «оператор – ручна машина – робоче середовище». Така система має ряд особливостей, серед яких треба виділити: нестабільність подачі по величині та напрямку; безперервну зміну потужності у межах допустимого значення; обмеження зусиль, що виникають при роботі у місці контакту абразивного круга з робочим середовищем, потужністю приводу та індивідуальними фізичними даними оператора. Дослідження оцінювальних показників проведення робіт ручними машинами з абразивними армованими кругами повинно проводитися з одночасним аналізом навантаження, яке сприймається оператором, а саме: на втомлюваність оператора і, як наслідок, на якісні та кількісні показники робочого процесу.

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

[2] Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / *Ю.М. Ковальчук, В.А. Букин, Б.А. Глаговский и др.*; под общ. ред. Ю.М. Ковальчука. – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.

[3] Абразивные армированные инструменты для строительно-монтажных работ: производственно-практическое издание / *Ю.Д. Абрашкевич, Г.А. Сотников*. – М.: Стройиздат, 1983. – 110 с.

[4] *Абрашкевич Ю.Д., Марченко О.А., Човнюк О.В.* / Визначення потреби в абразивних інструментах в будівельно-монтажних організаціях // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2011. – № 77. – С. 60–63.

[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., Човнюк Е.В., Марченко А.А.* / Резание металлопроката на монтажных работах // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2019. – № 1 (915). – С. 28–32.

Надійшла 29.10.2019 р.

УДК 624.074.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАБОТА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СЕТЧАТОЙ ОБОЛОЧКИ С ОПОРНЫМИ РЕБРАМИ ПОВЫШЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

Проведены исследования металлической цилиндрической сетчатой оболочки с опорными ребрами повышенной жесткости. Определено позитивное влияние продольного укрепления на опасные участки и устойчивость системы. Достигнуто ощутимое повышение эксплуатационных качеств и рациональное перераспределение параметров работы конструкции.

Researches of the metallic cylindrical latticed shell with the supporting ribs of larger inflexibility were executed. Positive influence of the longitudinal strengthening on dangerous areas and stability of the system is set. The perceptible improving of performance qualities and rational redistribution of parameters of work of construction is attained.

Ключевые слова: металлическая цилиндрическая сетчатая оболочка, покрытие, моделирование, расчет, силовые факторы, параметры деформирования.

А.И. Сиянов
доцент кафедры строительного дела ТИ (ф) Северо-Восточного федерального университета, г. Нерюнгри, Россия, к.т.н., доцент

Металлические цилиндрические сетчатые оболочки являются многофункциональными пространственными конструкциями и успешно применяются в качестве покрытий зданий и сооружений [1–8]. Их форма обладает повторяемой структурой, прекрасным внешним видом, высокой светопропускной способностью, относительной легкостью и экономичностью. Благодаря удачным дизайнерским решениям и современным компьютерным технологиям указанные оболочки удачно вписываются в архитектурный облик существующей застройки.

Широкое применение цилиндрических покрытий объясняется многообразием расположения стержней, возможностью использования нескольких поверхностей и различных граничных условий на контуре [9]. Причем системы, состоящие из одной круговой формообразующей сетки, с учетом принципа минимизации материала, отличаются большей уязвимостью от действия приложенных эксплуатационных нагрузок. Кроме того, на общее состояние поверхности сильное влияние оказывает соотношение габаритных размеров конструкции [10].

Исследования показали, что между длиной и шириной покрытия существует зависимость, нарушение которой приводит к появлению концентраторов напряжений и опасности потери устойчивости сетки [11–13]. В соответствии с принятыми рекомендациями для проектирования длина L не должна превышать ширину B более чем на 40 %. Другие геометрические параметры, такие как ширина и высота подъема также связаны между собой. Их соотношение имеет определенные пределы $B/f = 3…5$ и зависит от радиуса кривизны R и угла α описанной окружности оболочки.

Сегодня доказано, что самой экономичной по расходу материала является цилиндрическая сетка, состоящая из взаимно перпендикулярных и диагональных стержней [14]. Как ни странно, именно она обладает архитектурной выразительностью и считается весьма удачной в работе. Повторяющиеся ячейки, с учетом симметрии, располагаются по направлению длины и ширины конструкции. Ориентация диагональных стержней с позиции каждой грани имеет нисходящий характер. В такой системе наблюдается лучшее распределение материала по поверхности, что создает предпосылки для появления новых идей и соответствующих технических решений.

Следует, однако, отметить, что любые преобразования оболочки должны соответствовать действующим нормативным требованиям по несущей способности и жесткости. Особенно если речь идет о необходимости обеспечить перекрытие значительных полезных площадей. Возникает задача создания и проверки в действии технического решения с торцевым креплением оболочки.

Попытки сохранить характеристики жесткости стержней (трубчатые сечения диаметром 152×7 мм) сетчатой конструкции с учетом прежних геометрических параметров [15] оказались непродуктивными. Разработка систем с

дополнительными стержнями из плоскости покрытия или на сетчатой поверхности также не дала ощутимых результатов. Поэтому принято решение укрепить нижние грани и найти подходящий вариант сечения опорных ребер. С учетом удобства крепления стержней и усилий, возникающих в продольных элементах, выбран двутавр с параметрами, указанными в таблице 1.

Таблица 1

Параметры двутаврового сечения в опорных ребрах оболочки

h, мм	b_f, мм	t_w, мм	t_f, мм	r, мм	A, см^2
990	320	16	21	30	293,8

Построение конструкции (табл. 2) осуществлено в прикладном программном комплексе [16–18] с использованием поверхности вращения и прямоугольного типа ячеек.

Таблица 2

Размеры и параметры построения оболочки

L, м	B, м	f, м	R, м	α, °
30	24,25	7	14	120

Вклад нового сечения в работу системы проанализирован на основании показателей, полученных по результатам моделирования и расчета. Формообразование выполнено с учетом диагональных стержней в ячейках установленного соотношения геометрических параметров, требований устойчивости и минимизации расходов. Характеристики жесткости заданы в соответствии с опытом проектирования и особенностями работы конструкции. Нагрузки на покрытия определены для городских условий строительства в рамках действующих нормативных документов [19]. В угловых опорных узловых соединениях

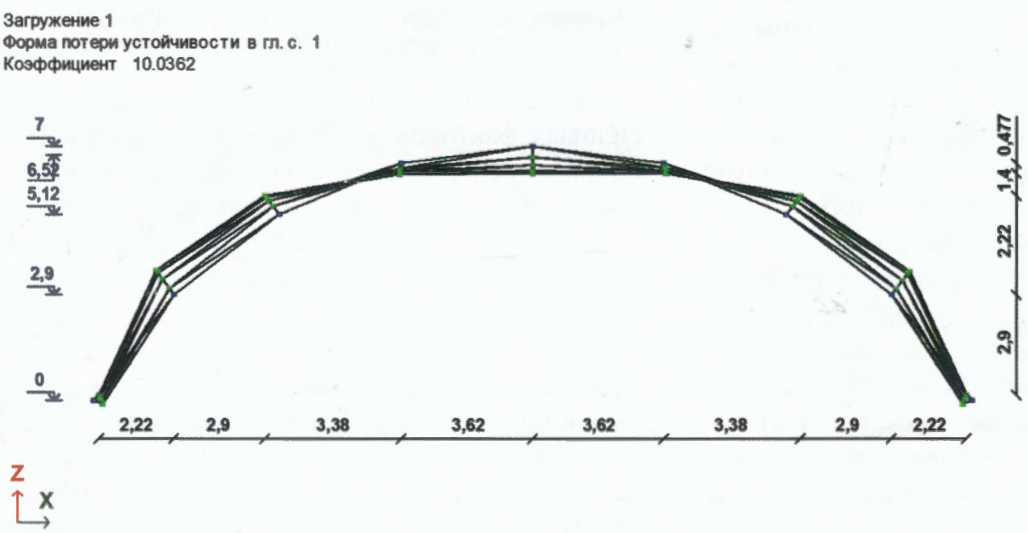

Рис. 1. Форма возможной потери устойчивости исходной металлической цилиндрической сетчатой оболочки (вид с торца)

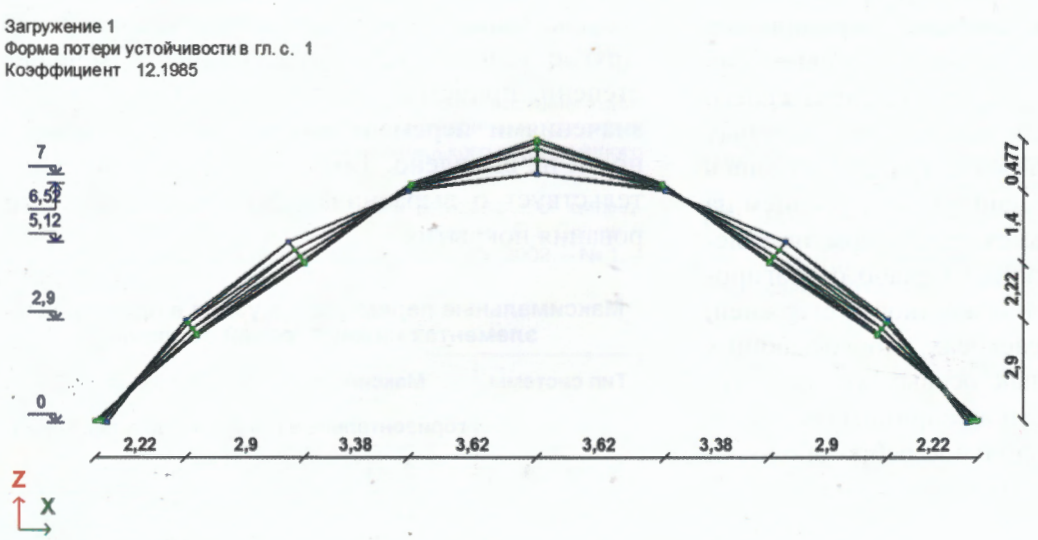

Рис. 2. Форма возможной потери устойчивости укрепленной металлической цилиндрической сетчатой оболочки (вид с торца)

поставлены горизонтальные и вертикальные связи, обеспечивающие геометрическую неизменяемость сетчатой поверхности.

На основании имеющегося спектра возможных предпосылок проверено несколько вариантов конструирования схемы [20] и выполнен расчет сечений стержней по трем блокам проектных положений.

Результаты рабочего состояния покрытия наглядно отразили поведение системы и позволили осуществить адекватную оценку полученных расчетных показателей. Двутавровое сечение, принятое для нижних ребер оболочки, сыграло роль вертикального бортового элемента и оказалось наиболее приемлемым, о чем свидетельствуют мозаики проверок по предельным состояниям. К тому же увеличился коэффициент запаса устойчивости конструкции.

Изменения, полученные от повышения жесткости опорных ребер, показали ожидаемый эффект и сильно отразились на работе покрытия. Они позволили выявить характерные закономерности и явились следствием внутренних силовых факторов и параметров деформирования конструкции. Наглядными оказались полученные изополя усилий и перемещений, которые четко проявились на сетчатой поверхности.

Система позитивно отреагировала на повышение жесткости опорных ребер, отличалась минимальными затратами и качественно перераспределила по сетке показатели работы покрытия. Отдельные участки пространственной конструкции получили существенную разгрузку, что значительно снизило опасность наступления критической ситуации и перестроило форму возможной потери устойчивости (рис. 1, 2).

После укрепления нижних продольных стержней максимальные значения осевых сил серьезно уменьшились, но не изменили своего положения и остались в растянутых опорных ребрах. Верхние пояса нижних граней оказались по-прежнему сжатыми с наибольшим усилием на расстоянии одной ячейки от края покрытия. Элементы вдоль дуги окружности слабо отреагировали на процесс повышения жесткости стержней. Однако в некоторых раскосах, примыкающих к торцам, изменился знак осевых усилий, что привело к необходимости воспринимать растяжение. Центральное продольное ребро оболочки также не смогло сопротивляться дополнительному включению жесткости и вступило в работу под действием сжатия. Аналогичная ситуация зафиксирована с некоторыми диагональными элементами средней зоны, которые качественно перестроились и начали работать в условиях растяжения. Причем знак осевых усилий в центральных нисходящих стержнях верхних граней не изменился.

Выявленные отличия в загруженности элементов контура и средних участков компенсировались более равномерным распределением материала по поверхности. Изменилось общее состояние конструкции, и значительно уменьшились максимальные усилия в стержнях (табл. 3).

Таблица 3

Максимальные усилия в продольных опорных элементах нижних граней оболочки

Тип системы	Максимальные усилия, N_{max}			
	растяжения (+)		сжатия (–)	
Начальная	409,4 кН	100 %	274,46 кН	100 %
Укрепленная	266,36 кН	65,1 %	121,54 кН	44,3 %

Естественно, перераспределение внутренних силовых факторов путем повышения жесткости опорных ребер существенно повлияло на числовые значения параметров деформирования. Заметно снизилась разница между соседними показателями и усилилась сопротивляемость конструкции действующим нагрузкам. Система повысила свои эксплуатационные качества, стала более устойчивой и менее чувствительной к приложенным комбинациям внешних загружений. Максимальные перемещения узлов зафиксированы на центральной дуге симметрии оболочки (табл. 4). Они значительно уменьшились после укрепления конструкции и немного изменили свое положение, оказавшись в верхнем ребре нижних граней. Другие узлы системы отклонились в меньшей степени, причем существенных отличий между значениями перемещений по сетчатой поверхности не выявлено. Такое обстоятельство свидетельствует о выравнивании процесса деформирования покрытия.

Таблица 4

Максимальные перемещения узлов в продольных элементах нижних граней оболочки

Тип системы	Максимальные перемещения, δ_{max}			
	горизонтальные (→)		вертикальные (↑)	
Начальная	180,9 мм	100 %	185,9 мм	100 %
Укрепленная	10,4 мм	5,7 %	25,3 мм	13,6 %

Полученные закономерности распределения осевых усилий и перемещений вследствие повышения жесткости опорных ребер демонстративно отразили положительные изменения в общем состоянии конструкции. Числовые значения расчетных параметров оказались не только приемлемыми (выявленными в рамках требований норм), но и показали имеющиеся резервы несущей способности.

Выводы.

С учетом анализа прежних разработок и опыта проектирования криволинейных покрытий проведены исследования металлической цилиндрической сетчатой оболочки с торцевым креплением по краям. На основании результатов моделирования и расчета принято решение увеличить жесткость нижних граней путем изменения профиля опорных элементов.

Определено позитивное влияние продольного укрепления на загруженность участков и устойчивость поверхности.

Выявлены характерные особенности и закономерности поведения системы в рамках изменения общего состояния и значений полученных расчетных величин. Зафиксировано частичное смещение зон наибольшей концентрации внутренних силовых факторов и параметров деформирования.

В итоге достигнуто ощутимое повышение эксплуатационных качеств и рациональное перераспределение показателей работы конструкции.

[1] *Таиров В.Д.* Сетчатые пространственные конструкции / В.Д. Таиров. – К.: Будівельник, 1966. – 73 с.

[2] *Патцельт О.* Стальные решетчатые пространственные конструкции / О. Патцельт; пер. с нем. – М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1970. – 95 с.

[3] *Рюле Г.* Пространственные покрытия. Конструкции и методы возведения / Г. Рюле; пер. с нем. – Том 2. – М.: Стройиздат, 1974. – 247 с.

[4] *Свердлов В.Д.* Исследование пространственных цилиндрических стержневых систем покрытий: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Свердлов Владимир Деонисович. – К., 1977. – 174 с.

[5] *Трущев А.Г.* Пространственные металлические конструкции: учеб. пос. для вузов. / Трущев А.Г. – М.: Стройиздат, 1983. – 215 с.

[6] *Файбишенко В.К.* Металлические конструкции / В.К. Файбишенко. – М.: Стройиздат, 1984. – 336 с.

[7] *Голосов В.Н.* Инженерные конструкции: [учеб. для вузов] / В.Н. Голосов, В.В. Ермолов, Н.В. Лебедева [и др.] ; под ред. В.В. Ермолова. – М.: Высш. школа, 1991. – 408 с.

[8] *Свердлов В.Д.* Металеві циліндричні стержневі покриття: монографія / В.Д. Свердлов, О.І. Сіянов. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 134 с.

[9] *Сіянов О.І.* Металеві циліндричні стержневі покриття: конструювання та розрахунок: монографія / О.І. Сіянов. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 140 с.

[10] *Сіянов О.І.* Параметри раціонального використання горизонтальних ферм металевих циліндричних сітчастих покриттів / О.І. Сіянов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 1. – С. 16–21.

[11] *Гоцуляк Є.О.* Загальна стійкість одношарових циліндричних стержневих покрить / Є.О. Гоцуляк, О.І. Сіянов // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2002. – № 1. – С. 13–18.

[12] *Гоцуляк Е.А.* Устойчивость и нелинейное деформирование цилиндрических сетчатых оболочек покрытия / Е.А. Гоцуляк, А.И. Сиянов // Прикл. механика. – 2004. – 40, № 4. – С. 78–83.

[13] *Сіянов О.І.* Раціональні параметричні залежності безпечної роботи циліндричних стержневих покриттів / О.І. Сіянов // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2014. – № 3. – С. 11-13.

[14] *Свердлов В.Д.* Цилиндрическое пространственное стержневое покрытие (теоретическое и экспериментальное исследование) / В.Д. Свердлов // Строительные конструкции: Сб. науч. тр. – Киев: Будівельник, 1978. – Вып. 31. – С. 124–130.

[15] *Сиянов А.И.* Моделирование и расчет подкрепленной цилиндрической сетчатой оболочки / А.И. Сиянов // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2017. – № 4. – С. 16–19.

[16] Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций: учеб. пос. / *А.С. Городецкий, В.С. Шмуклер, А.В. Бондарев.* – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 889 с.

[17] Пакеты прикладных программ для автоматизированного проектирования конструкций: учеб. пос. / [*М.С. Барабаш, Ю.Д. Гераймович, А.Н. Кекук и др.*]; под ред. А.С. Городецкого. – К.: Изд-во «Факт», 2006. – 112 с.

[18] ЛИРА 9.4. Примеры расчета и проектирования. Приложение к учебному пособию ЛИРА 9.2 / [*Ю.В. Гензерский, А.Н. Куценко, Д.В. Марченко и др.*]. – К.: Изд-во НИИАСС, 2006. – 124 с.

[19] ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи / Мінбуд України. – К.: Вид-во «Сталь», 2006. – 60 с.

[20] Программный комплекс ЛИРА-САПР 2013: учебное пособие / *Д.А. Городецкий, М.С. Барабаш, Р.Ю. Водопьянов, В.П. Титок, А.Е. Артамонова.* – К.-М.: Электронное издание, 2013. – 376 с.

Надійшла 01.08.2019 р.

УДК 669.02/09:624.078.4

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К НОРМИРОВАНИЮ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЗАТЯЖКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БОЛТОВ

Показано, что дня обеспечения требуемой прочности фрикционных соединений крутящий момент, которым затянуты высокопрочные болты, должен быть не менее нормативной величины. Верхний предел контролировать не имеет смысла, поскольку повышенный уровень усилий возможен только в болтах, временное сопротивление разрыву которых выше регламентированного минимального значения. При этом переход усилий или деформаций через предельную по условиям эксплуатации величину не происходит.

It is proved that for the required friction joints strength connections the twisting moment by which the high-strength friction-grip bolts are tightened should not be less than normative value. There is no point to oversee the upper limit because the forces increased level is possible only for bolts with variable buckling resistance higher than the restricted minimal value. Forces or deformations transition through the limit serviceability value does not occur.

Ключевые слова: фрикционные соединения, высокопрочные болты, затяжка, предельное состояние, отпорность.

Л.М. Рабер
доцент Национальной металлургической академии Украины, к.т.н. (г. Днепр)

В.К. Сидоренко
старший преподователь Национальной металлургической академии Украины

А.Е. Червинский
ассистент Национальной металлургической академии Украины

Поскольку в фрикционных соединениях на высокопрочных болтах действующие усилия в элементах стыка или прикрепления полностью передаются силами трения, которые возникают по соприкасающимся поверхностям соединяемых элементов под влиянием контролируемого натяжения болтов, достоверная оценка качества их натяжения является актуальной задачей.

Согласно действующим нормативам [1] заданное проектом усилие натяжения болтов может быть обеспечено различными способами. Первоначально широкое распространение получила полумеханизированная технология с регулированием усилий по величине крутящего момента. При этом болты вначале затягивают до 80...90 % от расчетного крутящего момента, а затем окончательную подтяжку осуществляют ручными динамометрическими или предельными ключами. Эта технология отличается высокой трудоемкостью и применением тяжелого ручного труда.

К числу наиболее эффективных методов на современном этапе относятся полностью механизированные технологии, осуществляемые гайковертами часто- или редкоударного действия. На практике используют частоударные пневмогайковерты. Их предварительно градуируют, обеспечивая регулированием давления сжатого воздуха поворот гаек на угол 180° (±30°) от начального положения, соответствующего затяжке болтов стандартным монтажным ключом. В процессе сборки соединений болты затягивают в одну стадию градуированным гайковертом до прекращения вращения гайки. Начальная неплотность пакета промежуточных деталей ликвидируется стяжными высокопрочными болтами (10...15 % от общего количества, равномерно распределенными по полю соединения), затягиваемыми в первую очередь. При затяжке болтов по числу ударов [2] используют редкоударные гайковерты соответствующей мощности. Градуировать редкоударные гайковерты не требуется, поскольку они отличаются постоянной энергией единичного удара.

Принципиальное отличие полумеханизированной технологии от полностью механизированной состоит в распределении усилий в болтах. В случае затяжки по моменту средние значения усилий находятся на уровне нормативной величины. Они не зависят от разброса прочности болтов, а зависят только от условий трения в резьбе и по опоре гайки. В случае затяжки болтов поворотом гайки на 180° или нанесением соответствующего этому углу числа ударов стержни

болтов удлиняются на величину Δ, а материал болтов переходит в стадию упруго-пластической работы. При этом минимальные значения усилий сообщаются болтам с минимальной прочностью по ГОСТ 22356-77 и находятся на уровне нормативного значения. Все остальные значения фактических усилий получаются выше нормативного, т.е. происходит саморегулирование усилий.

В основу технологии затяжки болтов по крутящему моменту положена зависимость

$$P_{\text{норм}} = \frac{\text{M}}{Kd}, \qquad (1)$$

где K – коэффициент закручивания высокопрочных болтов, зависящий от условий трения в резьбе и по опоре гайки; d – номинальный диаметр болта; М – крутящий момент, прикладываемый к гайке; $P_{\text{норм}}$ – заданное проектом нормативное усилие в болтах, принимаемое равным $P_{\text{норм}} = 0{,}7R_{bun}A_{bn}$. Здесь R_{bun} – наименьшее временное сопротивление разрыву высокопрочных болтов по стандарту; A_{bn} – площадь поперечного сечения болта, нетто.

Зависимость усилий в болтах $P = f(\sigma_b)$, затянутых поворотом гайки на 180°, описывается линейным уравнением регрессии, которое в натуральном масштабе имеет вид [3]:

$$P_i = \frac{A_{bni}}{A_{bn22}}[290 + 0{,}189(\sigma_{bi} - 1337)] \text{ кН}, \qquad (2)$$

где A_{bn22}, A_{bni} – соответственно площадь поперечного сечения болта, нетто, диаметром 22 мм; σ_{bi} – временное сопротивление разрыву i-го болта.

В случае, когда $\sigma_{ni} \approx R_{bun}$ определенные по формулам (1) и (2) значения $P_{\text{норм}}$ и P_i достаточно близки, т.е. $P_{\text{норм}} \approx P_i$. Поэтому есть основание записать

$$\frac{\text{M}}{Kd} = \frac{A_{bni}}{A_{bn22}}[290 + 0{,}189(\sigma_{bi} - 1337)] \text{ кН}. \qquad (3)$$

Принимая во внимание, что согласно ГОСТ 22356-77* σ_b высокопрочных болтов, например М24 из стали 40Х «Селект», находится в пределах $1100 \le \sigma_{bi} \le 1350$ МПа, а $K = 0{,}18$ [1] и подставив эти значения в выражение (3), получим безопасные границы нахождения значений М, т.е. $1200 \le \text{M} \le 1465$ Нм, а с учетом установленного поля допуска на угол поворота гайки или числа ударов границы этих значений могут быть соответственно расширены и при статистической обеспеченности $P_t = 0{,}9973$ будут находиться в пределах $1200 \le \text{M} \le 1800$ Нм, т.е.:

$$\text{M}_{\text{норм}} \le \text{M} \le 1{,}5\text{M}_{\text{норм}}, \qquad (4)$$

где $\text{M}_{\text{норм}}$ – нормативное значение момента закручивания.

Приведенные границы справедливы для болтов и гаек, на резьбу которых нанесена граничная смазка на основе минеральных масел. Это обеспечивает достаточно высокую стабильность значений коэффициентов K (коэффициент вариации экспериментальных данных $V \le 5\%$) и минимальный уровень касательных напряжений $\tau_{кр}$, сообщаемых стержню болта при его затяжке. В случае других условий смазки, например, на основе парафина [4], границы индивидуальных значений моментов могут изменяться. Однако отношение $\text{M}_{max}/\text{M}_{min} \approx 1{,}5 \approx const$, поскольку покрытие резьбы составом на основе парафина обеспечивает не менее высокую стабильность значений K и еще более низкий уровень $\tau_{кр}$. Благодаря эффекту саморегулирования современные нормы разрешают не контролировать «перетяжку» болтов при их затяжке поворотом гайки на 180°.

Как видно из формулы (1), при затяжке по моменту прочность болтов во внимание не принимается и саморегулирования не происходит. На практике ограничение момента регламентировано допуском +20 %, т.е. $\text{M}_{\text{норм}} \le \text{M} \le 1{,}2\text{M}_{\text{норм}}$. При этом болты, имеющие минимальную прочность и затянутые до усилий, соответствующих верхнему пределу допускаемых отклонений, работают в упруго-пластической стадии, а материал болтов, имеющих максимальную прочность, используется недостаточно.

Наиболее полное использование прочности материала может быть достигнуто при затяжке болтов до усилий P, равных

$$P = 0{,}7\sigma_{b\,\text{факт}} \cdot A_{bn}, \qquad (5)$$

где $\sigma_{b\,\text{факт}}$ – фактическое временное сопротивление разрыву высокопрочных болтов. Тогда границы нахождения М при затяжке болтов по моменту будут удовлетворять условие (4), т.е. соответствовать технологии затяжки по углу поворота гайки. Однако установить фактическое временное сопротивление разрыву каждого болта неразрушающими методами контроля практически невозможно и не имеет смысла, поскольку «перетяжка» болтов возможна только в тех случаях, когда это допускает прочность их материала.

Очевидно, что для обеспечения требуемой надежности независимо от способа затяжки болтов к гайкам следует приложить момент,

величина которого должна быть не менее нормативного значения. В остальных случаях критерием надежной затяжки должно служить условие недостижения болтом предельного состояния, т.е.:

$$M_к - M_н > 0, \quad (6)$$

где $M_н$ – крутящий момент после страгивания с места гайки при подтяжке затянутого болта; $M_к$ – крутящий момент при повороте гайки затянутого болта на 10... 15°.

Это означает, что несущая способность болта не исчерпана, поскольку выполняется условие положительной отпорности [5]. Эксперименты показали, что удлинения болтов, соответствующих их затяжке в этой стадии, составляют 0,2...0,7 от величины свободного осевого перемещения гайки по резьбе. Остальная часть этого перемещения расходуется на деформацию, включая контактную, пакета промежуточных деталей и обжатия резьбы. Выполненный с учетом этого расчет деформаций показал, что даже для наиболее коротких болтов удлинения при затяжке не превышают 0,2 удлинений при разрыве. Причем предшествует разрыву стадия, когда $M_к - M_н \approx 0$, т.е. стадия нулевой отпорности. Эта стадия сопровождается значительной равномерной деформацией стержня, соответствующей не менее чем 2...3 оборотам гайки при затяжке болта. Только затем наступает стадия отрицательной отпорности, когда $M_к - M_н < 0$. То есть крутящий момент (усилие натяжения) по мере приращения угла поворота гайки начинает падать и, в конечном итоге, болт разрушается. Очевидно, что соблюдение условия (6) является надежным критерием ограничения пластических деформаций при затяжке болтов. Таким образом, соблюдение указанного ограничения исключает возможность вязких разрушений болтов, прочность которых не ниже регламентированного нижнего предела. Установлено также [3], что работа в упруго-пластической стадии не создает дополнительных условий, увеличивающих склонность болтов к замедленным хрупким разрушениям, не вызывает релаксации усилий и не снижает показатели ударной вязкости. При этом повышенный уровень усилий способствует выносливости соединений благодаря увеличению обжатия пакета промежуточных деталей вблизи отверстия и разгрузке его от переменных напряжений.

Многолетний положительный опыт исследований и эксплуатации болтов, затянутых до упруго-пластической стадии, дает основание для включения в нормы требований контроля только нижнего предела натяжения высокопрочных болтов, затянутых как по углу поворота гайки, так и по крутящему моменту. Верхний предел, то есть кажущуюся «перетяжку» болтов, контролировать не имеет смысла.

Вывод. Изложенные особенности оценки качества контролируемой затяжки высокопрочных болтов при сборке фрикционных соединений свидетельствует о возможности принятия единого критерия независимо от способа выполнения работ. То есть во всех случаях должно быть соблюдено условие положительной отпорности как основа метода предельных состояний.

[1] Рекомендации и нормативы по технологии постановки болтов в монтажных соединениях металлоконструкций. – М.: ЦНИИПСК, 1988. – 106 с.

[2] Опыт применения редкоударных гайковертов / *Б.М.Вейнблат, И.И. Вишневский, Л.М Рабер, Я.И. Ципенюк* // Транспортное строительство. – 1985. – № 3. – 51 с.

[3] Упруго-пластическая работа высокопрочных болтов и соединений / *Б.М. Вейнблат. И.И. Вишневский, Л.М. Рабер, В.А. Шевченко*. В кн. Междунар. коллоквиум. Болтовые и специальные монтажные соединения в стальных конструкциях. – СССР. – М.: 1989. – Т.1. – С. 69–72.

[4] Рекомендации по применению высокопрочных болтов, покрытых составом на основе парафина, в монтажных соединениях стальных конструкций. – М.: ЦНИИПСК, ВНИПИПСК, 1989. – 9 с.

[5] *Геммерлинг А.В.* Развитие методов расчета конструкций по предельным состояниям. – М.: Стройиздат, 1978. – 38 с.

Надійшла 04.07.2019 р.

ЕЛЕКТРОННО-МІКРОСКОПІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧОТИРЬОХ ВИДІВ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТІВ, ГІДРАТОВАНИХ ВІД МОМЕНТУ ЗАМІШУВАННЯ ВОДОЮ ДО ОДНОГО РОКУ

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.б.н.

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

О.М. Стаднічук
Національна академія сухопутних військ імені П. Сагайдачного, НДЛ аналізу і прогнозування надзвичайних ситуацій, к.х.н.

Взаємодія цементу № 1 з водою починається миттєво. Через 10 хвилин на поверхні клінкеру спостерігається одночасно гідратація алюмоферитів і силікатів кальцію (рис. 1). Силікати кальцію гідратуються за схемою трикальцієвого силікату, тобто спочатку на поверхні мінералу утворюються горбики росту, які з часом збільшуються в розмірах, а при їх дотику з'являється шар новоутворень.

Приблизно через одну годину гідратації вся поверхня аліту в клінкері покривається декількома шарами гідросилікатів кальцію. Одночасно із зародженням горбиків росту гідросилікатів кальцію на кристалах аліту на поверхні клінкеру гніздами утворюються кубічні кристали гідроалюмоферитів кальцію.

Зерна беліту до однієї години гідратації не зазнають жодних змін і мають вигляд свіжого некородованого шару.

У процесі гідратації цементу № 1 до 24 годин спостерігається подальше поступове утворення нових шарів гідросилікатів кальцію і збільшення кількості кубічних кристалів гідроалюмоферитів кальцію, які перебувають у стадії розчинення.

Процес формування мікроструктури цементу № 2 майже не відрізняється від розглянутого процесу гідратації цементу № 1. Згідно з даними дослідження гідратації цементів № 1 і № 2, кожен із силікатних мінералів у клінкері гідратується подібно чистим мінералам C_2S і C_3S. Тому можна очікувати, що зі збільшенням кількості беліту в клінкері цементу №3 більша частина поверхні гідратуватиметься повільно за схемою гідратації C_2S. Через одну годину гідратації на поверхні цементу № 3 з'являються окремі горбики росту (рис. 2), які збільшуються в розмірах і набувають форми дисків.

Диски далі збільшуються в розмірах, зростаючись між собою, і утворюють шари.

В окремих місцях цементу № 3, гідратованого більше ніж чотири години, спостерігаються ділянки, які складаються з окремих блоків-кристалів, штрихованих у різних напрямках.

Зі збільшенням вмісту C_2S до 63 % гідратація значної частини поверхні клінкеру цементу № 4 починається через одну годину. При цьому утворюються конусоподібні горбики росту. Вони відрізняються від горбиків, які утворюються за гідратації C_3S. Через чотири години гідратації поверхня клінкеру, яка належить до беліту, майже вся вкривається горбиками росту, у той час як менша частина поверхні, яка належить до аліту, вже вкрита шарами новоутворень. У добовому віці (рис. 3) вся поверхня клінкеру вкрита окремими шарами, які складаються з дископодібних зерен.

Таким чином можна дійти висновку, що механізм гідратації всіх цементів однаковий. Різною є швидкість гідратації силікатів кальцію.

© Ніконець І.І., Мартинюк І.М., Шматов Є.М., Стаднічук О.М.

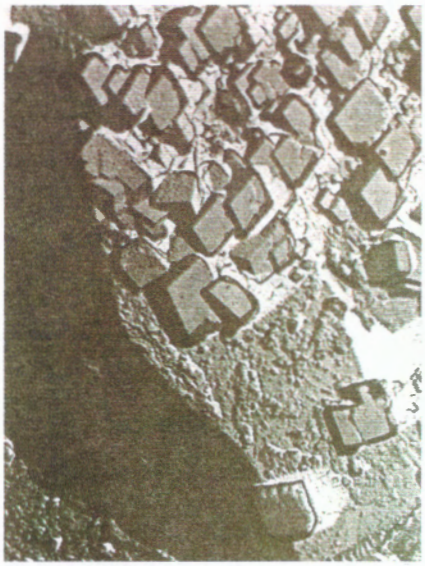

Рис. 1. Мікрофотографія репліки з поверхні цементу № 1, гідратованого у воді протягом однієї хвилини

Рис. 2. Мікрофотографія репліки з поверхні цементу № 3, гідратованого у воді протягом однієї години

Рис. 3. Мікрофотографія репліки з поверхні цементу № 4, гідратованого у воді протягом 24 годин

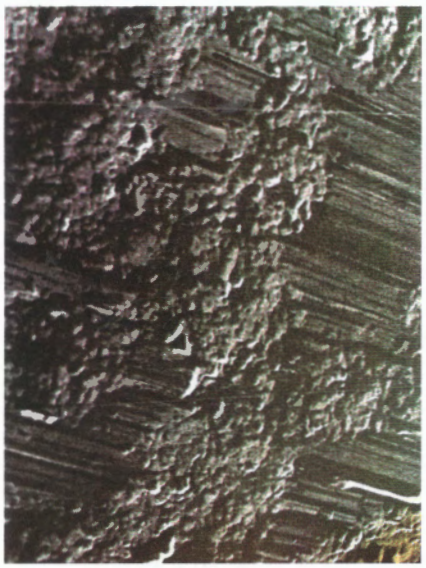

Рис. 4. Мікрофотографія репліки зі сколу цементу № 1, який твердів протягом одного року

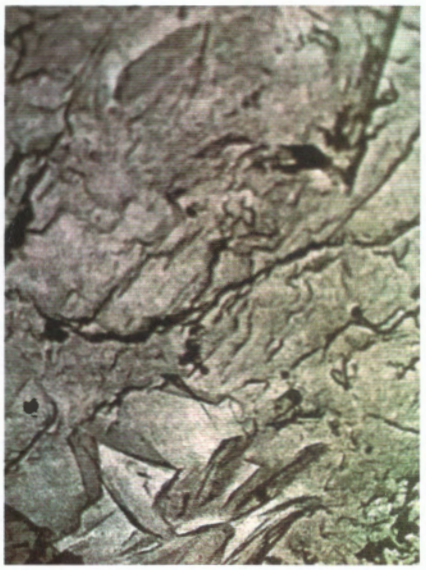

Рис. 5. Мікрофотографія репліки зі сколу цементу № 2, який твердів протягом одного року

Рис. 6. Мікрофотографія репліки зі сколу цементу № 3, який твердів протягом одного року

Мікроструктуру цементу № 1 найзручніше почати розглядати з річного віку твердіння, тому що в цьому віці вона чітко виявлена (рис. 4). Бачимо, що мікроструктура алітового цементу № 1 подібна до мікроструктури каменю C_3S.

Вже через одну добу цемент № 2 виявляє шарувату структуру. До року твердіння мікроструктура каменю практично не змінюється (рис. 5). Окремий інтерес становлять пори в цементному камені, у яких проглядаються шестикутні призматичні кристали гідрооксиду кальцію.

Мікроструктура каменю на основі цементу № 3 має шаруватий характер, однак ділянки з паралельно орієнтованих шарів зустрічаються рідко. Відрізняється цемент № 3 дивовижною однорідністю структури в різному віці твердіння. З віком твердіння спостерігається ущільнення структури (рис. 6).

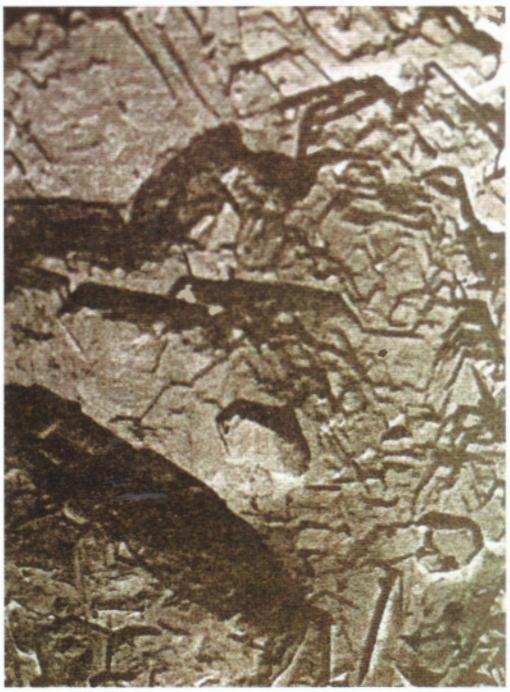

Рис. 7. Мікрофотографія репліки зі сколу цементу № 4, який твердів протягом одного року

Для мікроструктури цементу № 4 в добовому віці характерною є шарувата будова, наявність в окремих місцях горбиків росту і доволі чітка голчаста будова як окремих шарів, так і горбиків росту.

У віці одного року твердіння камінь має монолітну структуру (рис. 7).

Електронно-мікроскопічні дослідження чітко показують різницю в поведінці цементів, які вміщують різну кількість C_3S, C_2S. Різниця у процесах формування цементів різного мінералогічного складу безумовно впливає на міцність відповідних цементів.

Відзначаючи підвищену щільність каменю на цементі № 4 і значну його міцність у пізні строки твердіння, можна пояснити й підвищений спротив просочуванню крізь нього води і річних хімічних реагентів. Крім того, в результаті глибоких досліджень виявлено, що цемент № 4 має високу морозостійкість, здатність до фарбування, низьке тепловиділення тощо.

Впровадження белітового цементу у розчини, бетони та залізобетони підвищить конкурентоспроможність вітчизняних будівельних матеріалів.

Використання белітового цементу та запропонованих нанотехнологій (патент № 118227 від 25.07.2017) для будівництва сучасних фортифікаційних споруд, мостів, доріг, морських прибережних об'єктів сприятиме підвищенню оборонних можливостей нашої країни.

Надійшла 28.03.2019 р.

Інформація

На замовлення Асоціації Український центр сталевого будівництва Українським інститутом сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського розроблено проект державних будівельних норм – ДБН В.2.2-ХХ. Складські будівлі (на заміну СНиП 2.11.01-85. Складские здания)

У новій редакції будівельних норм розглянуті та враховані найбільш актуальні питання галузі, в тому числі:

- ✓ розширена та осучаснена сфера застосування норм;
- ✓ враховано зниження нормативної вогнестійкості конструкцій з урахуванням використання активних систем пожежогасіння;
- ✓ введено в текст норм принципово нового розділу з класифікацією складів за загальноприйнятою методикою логістичних компаній;
- ✓ встановлені вимоги до міцності та стійкості висотних стелажних систем;
- ✓ встановлені вимоги до організації внутрішньо-складських приміщень;
- ✓ встановлено вимоги щодо обліку навантажень від ударів внутрішнього складського транспорту, вимог до живучості конструкції.

Введення в дію нового нормативного документа для будівельної галузі заплановано в 2020 році.

ДО ВІДОМА ДОПИСУВАЧІВ ЖУРНАЛУ !

Вимоги щодо публікації статей:

- Текст статті в електронному виді, авторська довідка (для наукових статей ще анотація мовою статті та англійською, ключові слова, УДК), підготовлені у Microsoft Word та фото авторів.
- 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 № 4 від 28.11.2019 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 28.11.2019 р. Формат 60 × 84/8. Папір крейдяний. Друк офсетний. Ум.-друк. арк. 8,1. Тираж 300 прим.

Віддруковано ТОВ «Поліпрінт», 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**