

А. М. Власенко

С. В. Риндюк

МОДЕЛЮВАННЯ
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
РУЙНУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
КОНСТРУКЦІЙ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

А. М. Власенко, С. В. Риндюк

**МОДЕЛЮВАННЯ
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
РУЙНУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
КОНСТРУКЦІЙ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2014

УДК 621.7.518
ББК 34.2
В58

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 31.10.2013 р.)

Рецензенти:

М. Ф. Друкований, доктор технічних наук, професор (ВНАУ)

А. С. Моргун, доктор технічних наук, професор (ВНТУ)

Власенко, А. М.

В58 Моделювання високотемпературного руйнування залізобетонних виробів : монографія / А. М. Власенко, С. В. Риндюк. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 108 с.

ISBN 978–966–641–587-8

В монографії висвітлені питання вдосконалення термічного способу руйнування залізобетонних виробів за допомогою плазмового устаткування, а також методика моделювання розрахунку теплопередачі в багатошаровому одновимірному та двовимірному неоднорідному середовищах за допомогою інтегрального методу прямих.

Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються вдосконаленням способів терморуйнування матеріалів та дослідженням теплопровідності багатошарових середовищ.

УДК 621.7.518
ББК 34.2

ISBN 978–966–641–587-8

© А. Власенко, С. Риндюк, 2014

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ОСОБЛИВОСТІ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РУЙНУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОНУ	6
1.1 Існуючі способи руйнування природних і штучних мінеральних середовищ	6
1.2 Термогазодинамічний спосіб утворення отворів у залізобетоні.....	12
1.3 Передумови використання плазмового устаткування для руйнування залізобетону.....	16
1.4 Методи визначення параметрів процесу руйнування залізобетону.....	23
2 РУЙНУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОНУ ГАЗОВИМ СТРУМЕНЕМ НЕРУХОМОГО ПЛАЗМОТРОНА.....	29
2.1 Умови руйнування залізобетону нерухомим плазмовим пальником	29
2.2 Вплив геометрії сопла на інтенсивність руйнування залізобетону.....	31
2.3 Саморегулювання геометрії сопла Лавалю	34
3 РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩ	37
3.1 Побудова чисельних алгоритмів розв'язання задач теплопровідності із кусково-постійним коефіцієнтом	37
3.2 Чисельне моделювання процесу плавлення двошарових середовищ під дією теплових потоків високої потужності.....	38
3.3 Постановка задачі про фазове перетворення двошарових середовищ під впливом теплових потоків великої потужності.....	45
3.4 Методика чисельного моделювання задачі	47
3.5 Реалізація обчислювального експерименту на прикладі завдання про руйнування палі під дією плазмового пальника	52

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ШПУРУ В ЗАЛІЗОБЕТОНІ НЕРУХОМИМ ПЛАЗМОТРОНОМ	60
4.1 Обладнання та методика проведення досліджень.....	60
4.2 Експериментальні дослідження з обґрунтування оптимальних режимних і конструктивних параметрів процесу руйнування бетону нерухомим плазмотроном.....	64
4.3 Визначення технологічних можливостей руйнування залізобетону нерухомим плазмовим пальником	75
5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	80
5.1 Рекомендації з конструювання плазмового устаткування, обґрунтування і методика вибору параметрів	80
5.2 Промислове устаткування для руйнування залізобетону із застосуванням плазми.....	88
5.3 Використання плазмового устаткування в технології зрізання залізобетонних паль.....	94
ЛІТЕРАТУРА	102

ВСТУП

Аналіз проведених вітчизняних і зарубіжних досліджень показав, що висококонцентрований плазмовий струмінь є ефективним джерелом нагріву в процесах зварювання та інших споріднених технологій, зокрема, процесів різання і руйнування різних матеріалів і конструкцій, напилення, поверхневої обробки тощо. Однією з найперспективніших галузей використання висококонцентрованого плазмового струменя є різання і руйнування залізобетонних виробів та конструкцій, яке характеризується високими швидкостями нагріву завдяки високій температурі та ентальпії плазми, а також високою питомою потужністю.

Плазмове різання, як і обробка іншими висококонцентрованими джерелами нагріву, забезпечує високий рівень руйнування будівельних конструкцій та виробів з бетону і залізобетону, який є недоступним для відомих способів руйнування.

Можливість підвищення ефективності руйнування при використанні плазмового джерела нагріву залежить від необхідного рівня, що досягається, для різання і руйнування будівельних виробів та конструкцій з бетону і залізобетону.

Технологія плазмового руйнування будівельних виробів і конструкцій характеризується високими техніко-економічними показниками. Враховуючи, що проблема ефективного руйнування є актуальною при будь-яких будівельних як нових роботах, так і роботах, пов'язаних з реконструкцією, можна зробити висновок про практичну значимість цієї роботи.

Задачі, що були поставлені і розв'язані у цій роботі, надали можливість розв'язати важливу науково-практичну задачу, яка полягає у підвищенні ефективності різання і руйнування будівельних виробів та конструкцій з бетону і залізобетону, що й підкреслює її наукову і практичну значимість. Реалізація такої роботи також сприяє підвищенню продуктивності і якості виконання будівельних робіт, економію матеріальних і енергетичних ресурсів.

1 ОСОБЛИВОСТІ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РУЙНУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОНУ

1.1 Існуючі способи руйнування природних і штучних мінеральних середовищ

Використовувані в практиці будівництва і гірничорудної промисловості способи руйнування штучних і природних мінеральних твердих середовищ за видами енергії можна розділити на механічні, електрофізичні, термічні і комбіновані, а за методом впливу на руйнувальне середовище – контактні і неконтактні (рис. 1.1) [27, 37].

Руйнування матеріалів механічним способом ґрунтується на подоланні їх міцності силовим впливом і здійснюється шляхом розрізання, зминання, сколювання, розриву, роздавлювання і стирання. Руйнування механічним способом може здійснюватися як із застосуванням руйнувального інструмента, який безпосередньо бере участь у впливі на середовище, так і без застосування руйнувального інструмента.

До першої підгрупи механічних способів відносяться ті, в котрих як робочий орган використовуються ножі, зубці, шарошки, свердла, сталеві та кремнієві диски, алмазні коронки і фрези і ґрунтується вони на примусово зовнішньому впливі робочого органа безпосередньо на об'єкт, що обробляється, що створює в останньому руйнувальну напругу механічним шляхом під дією статичних чи динамічних навантажень.

Відносна універсальність механічних способів першої підгрупи визначає їх широке використання, однак для руйнування міцних ґрунтів збільшення потужності приводу машин не дає нового якісного ефекту, не супроводжується ростом маси та габаритів машини. Крім того, збільшення зусиль на робочому органі приводить до швидкого зношування ріжучого інструмента, а застосування дорогих та дефіцитних матеріалів, що підвищують його стійкість до зношування і міцність, не дає достатньої ефективності [16].

У теперішній час розробляються механічні пристрої, в котрих як руйнуючий елемент використовуються алмазні фрези [51]. Ці пристрої застосовуються для прорізування монтажних отворів, температурних швів, каналів, пазів, а також для вирівнювання залізобетонних покриттів. Широке застосування алмазного інструмента в практиці

будівництва обмежується великою чутливістю алмазних дисків до вібрацій, а також до неоднорідності матеріалу, який руйнується.

До другої підгрупи механічних способів руйнування можна віднести вибуховий, гідроімпульсний, електрогідравлічний і газоімпульсний.

Вибуховий спосіб широко застосовується для руйнування масивів гірських порід з використанням вибухових речовин.



Рисунок 1.1 – Класифікація способів руйнування твердих мінеральних середовищ

Руйнування відбувається в результаті виникнення ударних хвиль у зоні розміщення вибухових речовин при їх детонації. У будівництві цим способом підривають на викид талі і мерзлі ґрунти, дроблять негабарити, проходять свердловини, спрямованим вибухом руйнують будівельні конструкції [21]. Проте у практиці ремонтно-будівельних робіт руйнування вибухом не набуло широкого розповсюдження через наявність ударної хвилі і суттєвого струсу фундаментів близько розташованого діючого технологічного обладнання.

При гідроімпульсному способі використовується енергія потужного водяного потоку, що викидається з соплової насадки під тиском

близько 300 МПа і швидкістю 250...600 м/с. Внаслідок громізdkості і недосконалості обладнання, що трансформує енергію води, застосування гідроімпульсного способу руйнування можливе лише у стаціонарних умовах індустріального будівництва [16].

Електрогідравлічний спосіб руйнування матеріалів, який відноситься до другої підгрупи механічних способів, базується на використанні енергії гідравлічного удару, що виникає під час потужного електричного розряду в рідині. У момент пробою високою напругою міжелектродного проміжку в рідині утворюється газовий канал, тиск у якому може досягти 1500 МПа [37, 78].

Під час впливу потужних гідравлічних ударних хвиль відбувається механічне руйнування матеріалу. Перевага електрогідравлічного способу в його універсальності, а також у відсутності розлітання уламків при руйнуванні будівельних конструкцій, оскільки при утворенні розриву в тілі матеріалу гідравлічний тиск падає.

Незважаючи на значний прогрес в галузі техніки і технології руйнування залізобетонних виробів механічними способами, продуктивність руйнування залишається загалом досить низькою, а собівартість – високою. Головними причинами цього є швидке зношування руйнувального інструмента, складність передачі на забій достатньої кількості енергії і низький ККД руйнування. Враховуючи це, поряд з удосконаленням техніки і технології, основаної на механічних способах руйнування, ведеться пошук і дослідження нових способів руйнування, основаних на сучасних досягненнях науки і техніки.

Електрофізичні способи руйнування мінеральних середовищ основані на накладанні зовнішнього впливу на поверхню оброблювального середовища, яке збуджується під впливом енергетичних електрополів або електричного струму [16, 20]. Слід виділити дві підгрупи електрофізичних способів руйнування: електроконтактні і неконтактні. При електроконтактних способах струм проходить безпосередньо через масу матеріалу, що обробляється. До цієї підгрупи відносяться способи, основані на дії електричного пробою в електропровідному масиві, на використанні струмів високої частоти і струмів високої напруги.

Спосіб електропробою здійснюється при електричному пробое між електродами в електропровідному матеріалі масиву, що руйнується. У

проміжку пробою відбувається розігрівання матеріалу, що приводить до його руйнування [5].

Подальшим кроком у розвитку електрофізичних способів руйнування твердих мінеральних середовищ є застосування імпульсних електричних розрядів, збуджених безпосередньо в товщині тіла, що руйнується. Застосування такого способу (який отримав назву електроімпульсний) показало високу виборчу здатність дроблення і подрібнення руд, незначне зношування інструмента. Питомі витрати на проходження свердловини 200 мм в породах найвищої міцності (18...20) категорії за шкалою професора М. М. Протодьконова склали $50 \cdot 10^6$ Дж/м³, швидкість проходження при цьому 3...9 м/год [48].

Спосіб електродугової різки оснований на використанні тепла, що отримується в результаті горіння електричної дуги. Створені пристрої для електротермічного пропалювання отворів і різки залізобетонних виробів [19]. Принцип їх роботи полягає в тому, що в мостах пропалювання матеріалів здійснюється електричною дугою при температурі 4000 °К, а утворений розплавлений шлак виводиться електродинамічними силами, що виникають при горінні дуги або стікають по похилій поверхні.

Неконтактні електрофізичні способи руйнування основані на впливі на тверде мінеральне середовище з певної відстані різними випромінювачами, наприклад, спосіб електромагнітного випромінювання, спосіб впливу полем конденсатора, спосіб діелектричного або високочастотного нагріву [16].

При способі електромагнітного випромінювання (СЕВ) середовище діелектрик опромінюється електромагнітним полем з частотою більш 10^4 Гц. У цьому випадку електромагнітні хвилі затухають у верхніх шарах породи, що приводить до їх розігріву. Характер руйнування визначається як природою електромагнітного поля, так і теплофізичними властивостями матеріалу, що руйнується.

Ультразвукове руйнування основане на використанні впливу на якісну і кількісну сторони процесу руйнування. При поширенні ультразвукових коливань в рідині в ній виникають тиск і розрядження, що супроводжуються виникненням зусиль, що розтягують і розривають її цілісність. У місцях розривів утворюються численні малі порожнини (кавітаційні пухирці), які при зміні розтягнень тиском закриваються,

створюючи гідравлічний удар і розвиваючи тиск до кількох тисяч атмосфер. Матеріал, що зазнає кавітації, руйнується [48].

Деякі з електрофізичних способів руйнування міцних мінеральних середовищ вже зараз знаходять застосування на практиці. Однак на виробництві будівельно-ремонтних робіт більшість з цих способів принципово неприпустимі, а на шляху використання інших способів, наприклад, електротермічного, електроімпульсного, ще багато нерішених проблем, які не дозволяють до цих пір вийти за рамки лабораторних досліджень.

Термічні способи руйнування мінеральних середовищ основані на отриманні теплової енергії від зовнішнього джерела. Їх можна розділити на три підгрупи. В першій підгрупі теплота передається в результаті конвективного і променевого теплообміну між джерелом і об'єктом. Це спосіб «напалу», спосіб опромінення лампами і т. д. До другої групи відносяться способи, пов'язані з направленими тепловими потоками, що входять у контакт з локальною зоною руйнувальної поверхні об'єкта. До цієї підгрупи відносяться вогнеструменевий спосіб, кисневий спосіб, електронно-променеві та лазерний способи [5]. До третьої підгрупи відносяться термогазодинамічні способи, що забезпечують одночасно термічний та динамічний вплив на матеріал руйнувального середовища, будучи найбільш універсальними.

Спосіб конвективного або променевого теплообміну полягає в утворенні значних термічних напруг в тілі об'єкта при впливі на нього теплоносія, розташованого або на поверхні, або в шпурах.

Вогнеструменевий спосіб оснований на згоранні в атмосфері рідкого або газоподібного палива, що надходить через форсунку. Проте цей спосіб не отримав поширення через низьку температуру теплового потоку і малу швидкість. Процес плавлення відбувався повільно, а утворений в'язкий розплав, що погано видалявся, ускладнював процес утворення шпуру [48].

При способі кисневого списа використовується тепло, яке утворюється при згоранні заліза в кисні. Основною конструктивною частиною «списа» служить сталева трубка, з'єднана з системою подачі газоподібного кисню. Будучи попередньо нагрітим до температури 1350...1400 °С, робочий кінець списа (сталеві трубки) після пуску кисню починає інтенсивно окислюватися (горіти), розвиваючи темпе-

ратуру до 2000 °С. У процесі горіння спис безперервно скорочується, причому в залежності від товщини пропаленого матеріалу довжина горючої частини труби списа може бути в 5...25 разів більша довжини отвору, що пропалюється [29]. Утворені в процесі пропалювання отвору шлаки тиском кисню і газів, продуктів реакції окислювання матеріалів (заліза) виносяться в зазор між трубкою списа і стінкою отвору, що пропалюється.

До недоліків цього способу можна віднести надмірну витрату металу, рясне димовиділення і перевитрату, кисню необхідну для виносу шлаку з зони плавлення.

При електронно-променевому способі на поверхню твердих мінеральних середовищ впливають променем електронної гармати [70]. Сутність процесу в тому, що кінетична енергія сформованого у вакуумі тим або іншим способом електронного пучка перетворюється в теплову в зоні обробки. Оскільки діапазон потужності і концентрації енергії в промені великі, то практично можливе одержання усіх видів термічного впливу на матеріали: нагрівання до заданих температур, плавлення і випаровування з дуже високими швидкостями.

Лазерний спосіб заснований на впливі сфальцьованим потоком оптичного випромінювання високої щільності на матеріал, що руйнується [69].

Лазерний і електронно-променевий способи поки не знаходять застосування для руйнування міцних природних і штучних мінеральних середовищ в умовах будівництва через складність і громіздкість пристроїв.

Термогазодинамічний спосіб заснований на використанні енергії надзвукового, високотемпературного газового потоку.

Термогазодинамічний вплив на тверде мінеральне середовище характеризується складним комплексом процесів (термічних, ударно-динамічних, газодинамічних, фізико-хімічних, механічних, акустичних і інших) [5].

За видом устаткування і використовуваного явища, термогазодинамічний спосіб руйнування розділяється на дві підгрупи – терморективний і плазмовий.

При руйнуванні міцних мінеральних середовищ терморективним способом використовуються пристрої, що формують надзвуковий ви-

сокотемпературний газовий потік, одержуваний у закритій камері при згорянні палива в повітрі або кисні (терморективні пальники).

При руйнуванні матеріалу плазмовим способом використовуються пристрої (плазмотрони), у яких високотемпературний надзвуковий газовий потік утвориться за рахунок прогрівання й іонізації газу.

Отримання значного руйнівного ефекту можливе при сполученні двох або більше способів, що дозволяє використовувати переваги кожного з них. Особливо становлять інтерес комбінації способів, що роблять вплив на властивості матеріалу з метою зменшення його опірності руйнуванню. Таким на сьогодні є використання попереднього нагрівання з метою зниження опірності мінеральних середовищ механічному руйнуванню.

Комбінація теплової і механічної енергії дозволяє одержати принципово новий метод руйнування – термомеханічний, що вигідно відрізняється від інших тим, що дозволяє одночасно реалізувати всі шляхи збільшень продуктивності робочих органів, що руйнують, а саме: за рахунок теплової енергії істотно збільшити питому енергію, передану на вибір поза зв'язком з показниками міцності інструмента, і знизити енергоємність механічного руйнування [64].

Аналіз існуючих способів для руйнування штучних і природних мінеральних середовищ показує, що багато хто при їхньому прямому переносі на бетон, особливо на залізобетон, не забезпечують необхідної продуктивності, а деякі і зовсім не можуть бути використані.

З усього розмаїття способів для руйнування залізобетону звертають на себе увагу безконтактні. Вони вигідно відрізняються від усіх відомих тим, що робочий орган не знаходиться в безпосередньому контакті із середовищем, що руйнується, у зв'язку з чим його стійкість не залежить від міцності, абразивності і ступеня армування бетону. Одним із представників неконтактних способів є термогазодинамічний.

1.2 Термогазодинамічний спосіб утворення отворів у залізобетоні

Спроби застосування теплової енергії для руйнування гірських порід відомі з глибокої давнини. Так, ще в I столітті для відбійки порід застосовувався спосіб «відпалу». З появою вибухових речовин і удосконаленням механічних способів руйнування його використання стало обмеженим. Однак на початку нинішнього століття, особливо з

появою нових конструктивних матеріалів, ефект теплового руйнування масивів порід став ретельно вивчатися [5].

В 1945–1948 р. М. І. Циферовим уперше були успішно проведені дослідження з одержання отворів у граніті, в результаті яких був запропонований спосіб буровлення пружним газовим струменем високого тиску. Газовий струмінь створювався продуктами згоряння порохового заряду, що викидається з камери через насадку у вигляді сопла Лаваля [5].

Термічний спосіб руйнування почав інтенсивно розвиватися при використанні в якості джерела теплової енергії пальників зовнішнього згоряння, що працюють на рідкому паливі і кисні.

У 1947 році на руднику «Бєббіт» товариства «Резерв Майнінг Компані» почали застосовуватися реактивні пальники, що працюють на рідкому паливі і газоподібному кисні. Паливо спалювалося в камері згоряння при високому тиску, а продукти згоряння у виді високотемпературних і високошвидкісних газових струменів направлялися на поверхню, що руйнується.

У Казахському політехнічному інституті під керівництвом проф. О. В. Бричкіна до кінця 1954 року були створені реактивні пальники, що показали гарні результати при стендових дослідженнях [9]. У 1951 році у Московському гірському інституті під керівництвом проф. Р. П. Каплунова початі роботи з дослідження процесів термічного буровлення [35]. Сьогодні вони продовжуються під керівництвом проф. А. П. Дмитрієва

З 1954 року проводяться дослідження киснево-газових пальників реактивного типу в МВТУ ім. Баумана й у Харківському авіаційному інституті. Роботи в Харківському авіаційному інституті ведуться під керівництвом проф. І. П. Голдаєва, а в інституті Гіпрорудмаш під керівництвом проф. А. В. Ягупова. [87].

З 1960 року роботи з термічного буровлення шпурів були початі в Дніпропетровському гірському інституті під керівництвом проф. Є. Ф. Епштейна, а з 1961 року в інституті геотехнічної механіки АН УРСР під керівництвом д. т. н. А. І. Москальова. [86].

У 1957–1958 рр. в інституті металургії ім. А. А. Байбакова була створена апаратура для плазмо-дугового різання.

На початку свого розвитку термогазодинамічний спосіб руйнування твердих мінеральних середовищ використовувався тільки для буравлення шпар при розробці гірських порід. Потім, завдяки роботам радянської наукової школи, він став успішно застосовуватися для обробки будівельного каменю, буравлень отворів у мерзлому ґрунті, різання бетону і залізобетону [5]. При термогазодинамічному способі руйнування здійснюється високотемпературними газовими струменями, що роблять безпосередній тепловий і механічний вплив на середовище, що руйнує. Розміри, форма і напрямок газових струменів залежать від конструкції пальника і її соплового апарата, тиску і температури газів усередині камери. Високотемпературний газовий струмінь, що має швидкість близько 2 тис. м/с, є могутнім руйнівальним інструментом, здатним руйнувати дуже тверді природні і штучні мінеральні середовища, у тому числі і високоармований бетон, з високою швидкістю й ефективністю.

Газовий струмінь не тільки руйнує бетон, але і виносить продукти руйнування із зони своєї дії. Він руйнує залізобетон швидше, ніж відомими методами [5], при відсутності мікротріщин, що виникають від механічних впливів, не передаються динамічні навантаження на близько розташоване устаткування, трубопроводи, комунікації, що важливо при реконструкції діючих підприємств [64].

Термогазодинамічний пальник з витікаючим з його сопла високотемпературним газовим потоком являє собою робочий орган устаткування для руйнування твердих мінеральних середовищ, від роботи якого залежить ефективність руйнування.

Простота пристрою, висока концентрація теплової енергії і значна стійкість робочого органа, що руйнує матеріали без безпосереднього контакту з ними, відкривають можливості широкого впровадження термогазодинамічних пальників у будівельному виробництві.

Будучи струменево-тепловими машинами, термогазодинамічне обладнання може працювати на хімічному паливі (реактивні пальники) і на електроенергії (плазмотрони). В останніх утвореннях теплоносія здійснюється при пропущенні газу через дуговий електричний розряд (плазмотрони).

Хімічні джерела тепла, що працюють на рідкому паливі й окиснювачі, набули широкого застосування у верстатах термічного й термо-механічного буровлення гірських порід.

Принципова схема пристрою терморективного пальника заснова-на на схемі теплового двигуна, у якому енергія палива перетворюється в кінетичну енергію газового струменя, що витікає із сопла. Терморек-тивний пальник складається з камери згоряння, форсуночної голо-вки, надзвукового або звукового сопла, охолоджувального тракту і зов-нішнього кожуха, що поєднує всі конструктивні елементи. У камері згоряння відбувається пере-хід хімічної енергії в теплову, у соплі – теплової енергії в кінетичну. Форсуночна голо-вка забезпечує упорскування паливних компонентів у ка-меру, охолоджувальні тракти – охолодження елементів термогазогенератора від теп-лового впливу (рис. 1.2).

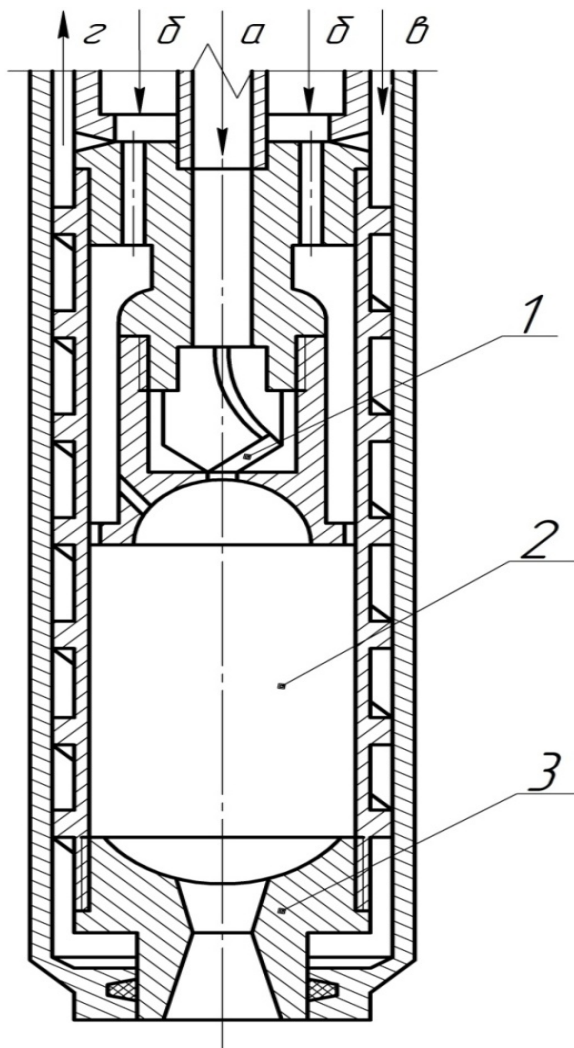


Рисунок 1.2 – Терморективный пальник:

- а) подача пального; б) подача окиснювача;
- в) подача охолоджувальної води;
- г) евакуація охолоджувальної води;
- 1 – форсунка; 2 – камера згорання;
- 3 – сопловий вузол

згоряння відбувається пере-хід хімічної енергії в теплову, у соплі – теплової енергії в кінетичну. Форсуночна голо-вка забезпечує упорскування паливних компонентів у ка-меру, охолоджувальні тракти – охолодження елементів термогазогенератора від теп-лового впливу (рис. 1.2).

Електродугові плазмот-рони в порівнянні з реактив-ними пальниками мають низ-ку переваг, що полягають у більш високій температурі плазмового струменя, широ-кому діапазоні зміни тепло-вих характеристик струменя, меншому виділенні шкідли-вих газів і у відсутності не-обхідності доставки й збері-гання палива та окиснювача, тому що вони працюють на електричній енергії, джерела якої завжди є на реконструйо-ваному підприємстві [64].

1.3 Передумови використання плазмового устаткування для руйнування залізобетону

Ідея отримання плазми за допомогою дугового розряду і використання її як джерела високих температур була вперше висунута на початку минулого століття. У 1908 році була подана заявка на винахід, оснований на вказаній ідеї. Проте в цьому патенті містився тільки теоретичний метод отримання плазми. Тільки починаючи з 1920 року, дослідження у області фізики плазми дозволили створити засоби її генерації – плазмотрони [21].

Плазмотрони є дуговою камерою, в якій газ з великою швидкістю проходить через зону дугового розряду з високою густиною потоку. У плазмотроні здійснюється обжимання дугового стовпа, витягування його в тонкий струмінь. При цьому різко змінюються властивості дуги: температура досягає $106...109$ °К, питома потужність доходить до 500 і більше кВт на один квадратний сантиметр [77]. Іонізація плазми в газовому стовпі настільки велика, що електропровідність її виявляється майже такою ж, як і у металів.

Залежно від ступеня іонізації, який характеризується відношенням числа позитивних іонів до загальної кількості частинок, розрізняють високо- і низькотемпературну плазму. Низькотемпературну умовно називають плазму з температурою, що не перевищує 50000 °К, і ступенем іонізації плазми порядку 1 % [64].

Висока концентрація енергії, можливість регулювання енергетичних, теплових і газодинамічних параметрів плазмових струменів в широких діапазонах зумовили їх упровадження в різних областях техніки. На сьогодні плазма знайшла широке застосування при різанні і зварюванні металів, нанесенні захисних покриттів, при термомеханічній обробці і ін. [64, 14].

Істотно розрізняють два принципово різних типи плазмотронів – з дугами прямої і побічної дії. У першому випадку дуга замикається на оброблюваному виробі анодом або всередині камери плазмотрона, де відбувається горіння і стабілізація дуги.

До теперішнього часу розроблено велику кількість електродуг плазмотронів, різноманітність конструкцій яких обумовлена різними вимогами технологічних процесів і необхідністю створення плазмових потоків з певними параметрами.

Проте, не дивлячись на різноманіття конструктивних рішень плазмотронів, в основі їх лежить обмежена кількість принципових схем. За конструкцією електродів і їх взаємним розташуванням плазмотрони побічної дії можна розділити на чотири основні групи [27].

Перша група плазмотронів заснована на використанні коаксіальних електродів (рис. 1.3а), в яких дуговий розряд утворюється між електродом і зовнішнім порожнистим циліндровим, розташованим співвісно.

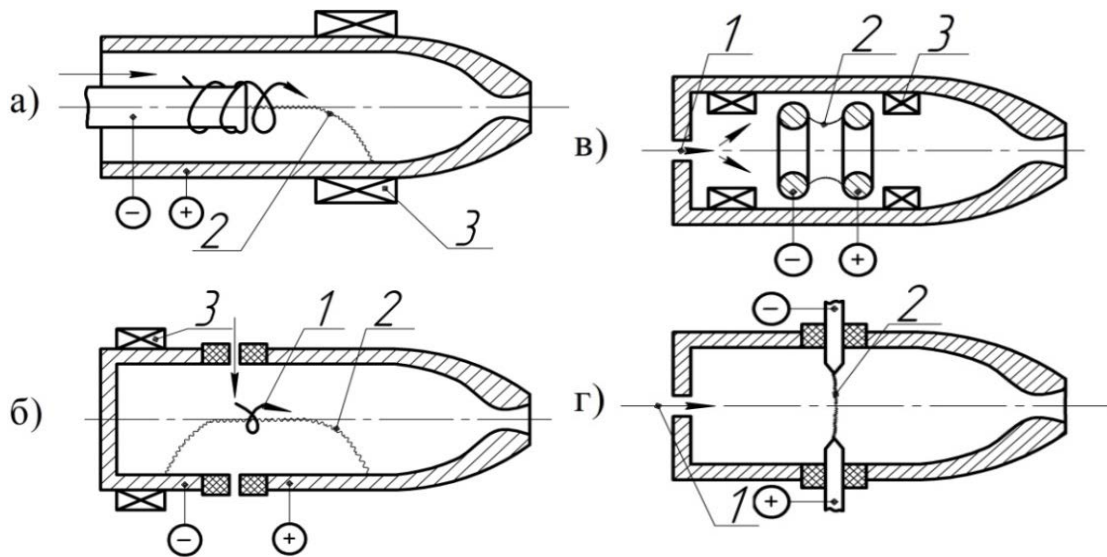


Рисунок 1.3 – Схеми плазмотронів дотичної дії:
1 – напрям руху газу; 2 – дуга; 3 – магнітні системи

Прив'язка дуги в стержньовому електроді здійснюється на торцевій поверхні, тобто горіння дуги відбувається з нерухомою катодною плямою. Другий кінець дуги переміщається з великою швидкістю по внутрішній поверхні циліндрового електрода під впливом аеродинамічних або електромагнітних сил, збільшуючи ресурс роботи електрода [27].

Друга група аксіальних плазмотронів заснована на використанні порожнистих циліндрових електродів (рис. 1.3б), розташованих співвісно. Обертання опорних плям так само здійснюється газодинамічними або електромагнітними силами. Проте ця схема володіє істотним недоліком. Зважаючи на складність руху газу в напівзамкненому об'ємі неможливо передбачити положення опорної плями дуги, що приводить до швидкого зносу електрода [27].

До третьої групи можна віднести плазмотрони з тороїдальними електродами (рис. 1.3в). Дуговий електричний розряд виникає між двома тороїдальними електродами розташованими всередині порожнистого корпусу і під дією аеродинамічних і електромагнітних сил обертається по поверхнях цих електродів, збільшуючи ресурс їх роботи.

Четверта стержньова група плазмотронів заснована на видуванні дуги, утвореної між охолоджуваними електродами, що розходяться, робочі кінці яких знаходяться всередині порожнистого корпусу (рис. 1.3г).

За способом стабілізації розряду конструкції плазмотронів так само представляються чотирма основними схемами [27].

Це плазмотрони із стабілізацією стінкою або струменями газу (рис. 1.4а), в яких здійснюється аксіальне(осьове) введення плазмоутворювальної речовини в розрядний канал. Така схема плазмотрона дозволяє забезпечити добру стабілізацію дуги, знизити турбулентні пульсації в плазмі, легко отримати ламінарні потоки, підвищити однорідність нагріву газу в розряді. Недоліком цієї схеми є слабка дія газу на приелектродні ділянки електричної дуги.

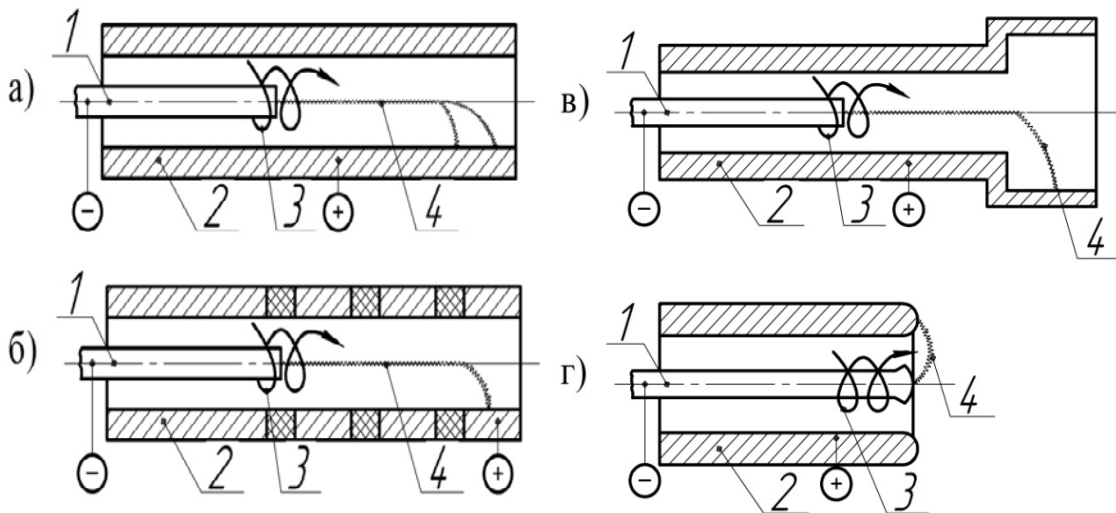


Рисунок 1.4 – Схеми стабілізації при електродних ділянках дуги:
1 – електрод; 2 – потік газу; 3 – дуга; 4 – магніт

До другої схеми відносяться плазмотрони із стабілізацією дуги газовим тангенціальним (вихровим) потоком (рис. 1.4б) введення плазмоутворювальної речовини [27].

Плазмотрони з вихровою стабілізацією, на відміну від плазмотронів із стабілізаційною стінкою, мають дещо більший термічний ККД і кращу просторову стабілізацію дугового розряду. Окрім того, створюються гарні умови для переміщення приелектродних ділянок дуги по поверхні електродів, що підвищує їх ресурс роботи.

Наступною схемою плазмотрона є плазмотрон з стабілізацією дуги пористим вдувом (рис. 1.4в), який багато в чому аналогічний плазмотрону із стабілізацією струменя газу. Пористий (транспіраційний) ввід плазмоутворювального середовища в розрядний канал почав розвиватися тільки останнім часом і поки що не знайшов широкого застосування, зважаючи на складність конструкції.

І остання схема – плазмотрони з магнітною стабілізацією дуги (рис. 1.4г). При такій стабілізації відбувається накладення на область обертання опорної плями дуги у внутрішній порожнині електрода осьового магнітного поля, створюваного соленоїдом, ввімкненим в ланцюг дуги чи у ланцюг незалежного джерела живлення. В основному, магнітне поле служить для додаткової підкрутки при вихровій стабілізації [27].

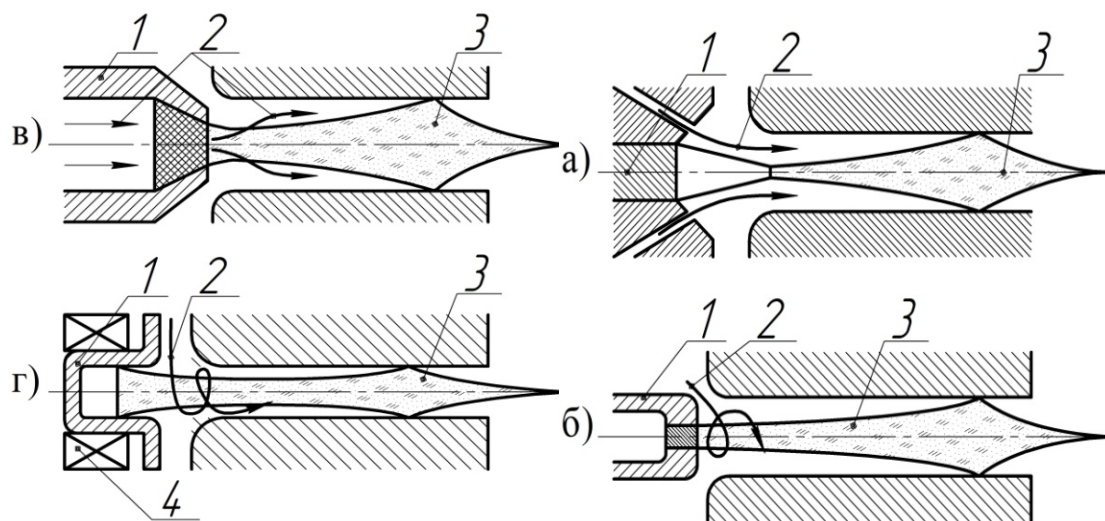


Рисунок 1.5 – Способи фіксації дуги плазмотрона:

1 – катод; 2 – анод; 3 – напрям руху газів; 4 – дуга.

За способом фіксації дуги плазмотрони можуть бути з довжиною дуги, що самоустановлюється, з секційною міжелектродною вставкою, з газодинамічною і торцевою фіксацією (рис. 1.5).

Крім того, конструкції плазмотронів можуть поділятися і за іншими не менш важливими ознаками, наприклад, за способом вводу плазмоутворювальної речовини, за складом плазмоутворювальної речовини, за родом використовуваної електроенергії та ін. Для проведення аналізу і синтезу плазмового обладнання, організації систематизованого вивчення і зберігання інформації використовується структурно-морфологічна матриця (див. табл. 1.1).

Матриця плазмового устаткування складається з 6-ти смислових дільників, записаних порядково, а записи в п'яти вертикальних колонках характеризують незалежні властивості, якими може володіти плазмове устаткування по виділених смислових дільниках.

Морфологічна матриця записується у вигляді

$$\begin{aligned} &P_1 (m_1, m_2, \dots m_{k1}) \\ &P_2 (m_1, m_2, \dots m_{k2}) \\ &\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ &P_n (m_1, m_2, \dots m_{kn}), \end{aligned}$$

де смислові дільники в рядках позначені P_i , а властивості плазмового устаткування в колонках m_i . Номер рядка (i) може приймати значення від 1 до $n = 6$, а номер колонки – відповідно, від 1 до $K = 5$. Оскільки кількість заповнених графів в різних рядках матриці різна, то остання колонка по кожному із смислових дільників позначена $K_1, K_2 \dots K_n$. Зміст структурно-морфологічної матриці можна позначити системою визначників $(P_1 m_i) (P_1 m_i) \dots (P_6 m_i)$, записаних по порядку розташування відповідних їм смислових дільників. Номер смислового дільника можна не вказувати, оскільки він відповідає місцю знаходження визначника в рядку коду, а записувати числа, відповідні номеру вертикальних колонок. Матриця включає відомі раніше класифікації, розширює їх, і в той же час не обмежує можливості введення нових смислових дільників і властивостей об'єктів.

Комбінування відомих ознак можна обґрунтувати нові конструктивні моделі з подальшим техніко-економічним аналізом.

Вибір тієї або іншої схеми плазмотрона визначається необхідною температурою нагріву і швидкістю витікання плазмового струменя, джерелом живлення, що є в розпорядженні, потужністю дуги і ступенем ефективності перетворення тепла дуги в енергію витікаючого газу, потрібним ресурсом роботи і т. д. На вибір схеми плазмового уста-

ткування впливає так само вид плазмо-утворювального газу, умови роботи, технологічність виготовлення і габаритні вимоги, обумовлені призначенням плазмового устаткування і т. д.

У зв'язку з тим, що для кожного технологічного процесу застосовується одна цілком визначена конструкція плазмотрона, що дає високий техніко-економічний ефект, визначені такі основні вимоги, що пред'являються до плазмотронів для руйнування залізобетону в умовах будівництва:

- простота конструкції, що допускає швидкий огляд, складання і розбирання плазмотронів, а також заміну деталей, що вийшли з ладу, в умовах будівельного майданчика;
- стійка робота протягом необхідного часу;
- можливість використання дешевих плазмо-утворювальних газів;
- можливість автоматизованого управління режимом роботи;
- стабільність параметрів плазмового потоку;
- невелике вага і габарити плазмотрона;
- безпека експлуатації і обслуговування.

Пошук найбільш прийнятних конструктивних схем і технологічних параметрів плазмового устаткування різання залізобетону здійснюється на підставі табл. 1.1 і у відповідності до вище наведених вимог. Для різання залізобетону в умовах будівництва найбільш доцільно застосовувати плазмотрони з коаксіальною схемою розташування електродів, які мають просту будову і технологічні при виготовленні. Широке поширення отримали плазмотрони з довжиною дуги, що самоустановлюється, чи фіксацією виступом, що відрізняються простотою конструкції і невеликими габаритними розмірами. В якості плазмоутворювальної речовини, зважаючи на широку доступність, доцільно використовувати повітря. Як найкраще зарекомендували себе плазмотрони з вихровою стабілізацією дуги [64]. Створення і розробка конструкції плазмового устаткування, особливо робочого органа, для ефективного руйнування залізобетону повинні базуватися на знанні фізичної суті процесу руйнування. Тому тільки комплексні дослідження режимів роботи плазмового пальника, її теплових і газодинамічних характеристик газових потоків і технологічних особливостей руйнування залізобетонних конструкцій можуть дати відносно чітку картину процесу руйнування залізобетону і дозволять обґрунтовано підійти до вибору та конструювання робочого органа.

Таблиця 1.1 – Структурно-морфологічна матриця плазмового обладнання

№ рядка	Смисловий діляк	Властивості смислових деталей				
		1	2	3	4	5
1	Конструкція електродів	коаксіальна	аксіальна	торіадальна	стержнева	–
2	Стабілізація дуги	потоками газу	газовим вихором	магнітним полем	пористим вдувом	комбінована
3	Фіксація дуги	самоустановлювальна	з міжелектродною вставкою	газодинамічна	торцева	–
4	Введення плазмотворювальної речовини	аксіальний (осьовий)	тангенційний (вихровий)	розподільний	транспіраційний (пористий)	–
5	Плазмотворювальна речовина	повітря	водяна пара	інертний газ	водень	суміш газів
6	Родова електроенергія	постійний струм прямої полярності	постійний струм зворотної полярності	змінний струм однофазний	змінний струм трьохфазний	високочастотний струм

1.4 Методи визначення параметрів процесу руйнування залізобетону

Ефективність процесу термогазодинамічного руйнування залежить як від властивостей самого матеріалу, так і від параметрів теплової дії, а в свою чергу теплові параметри струменя залежать від конструктивних схем плазмотрона і режимів його роботи, крім того, в залежності від вигляду і форми руйнованих залізобетонних елементів, цілей і умов роботи. На ефективність процесу руйнування немало важливий вплив роблять і технологічні прийоми (методи) дії робочого органа. В своїй більшості дослідження процесу руйнування базується на одному певному методі дії, тому для вивчення направленої руйнування залізобетонних конструкцій, проведення техніко-економічного порівняння способів і методів руйнування, а також зіставлення методик опису процесу взаємодії струменя з руйнованим матеріалом всі види направленої дії термічних пальників на залізобетон представлені у вигляді шести технічних прийомів (методів) (рис. 1.6).

При руйнуванні бетону або залізобетону на деяку глибину здобувають утворення у вигляді штаб і канавок. Такий метод обробки називається поверхневою різкою (рис. 1.6а).

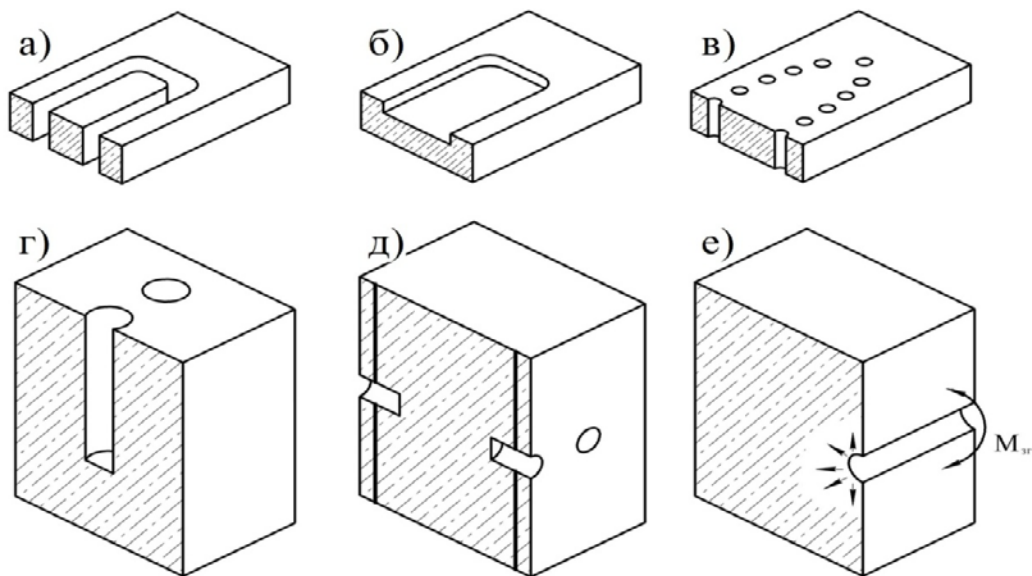


Рисунок 1.6 – Технологічні прийоми руйнування залізобетонних конструкцій

В деяких випадках може використовуватися роздільна різка (рис. 1.6б), при якій відбувається розділ залізобетонної конструкції по

заданій лінії або об'єму. Розподільну різку використовують для отримання різної конфігурації і форми в тонкостінних залізобетонних конструкціях або для розділення конструкції, перерізаючи її суцільним розрізом [28].

Розділення тонкостінних залізобетонних конструкцій може бути здійснене або при повному видаленні матеріалу по лінії різку (роздільна різка), або при частковому видаленні матеріалу, наприклад, при утворенні системи отворів малого діаметра в конструкції, що розрізається, по лінії розділення з подальшим розломом або видаленням перемичок механічним шляхом (див. рис. 1.6в). Цей метод називають оббурюванням або скрайбуванням [69]. Руйнування залізобетону при реконструкції іноді проводять шляхом утворення шпурів з подальшим вибухом. В процесі термічного буріння шпурів високотемпературний газовий струмінь, розплавляючи бетон, заглиблюється в нього, утворюючи циліндричний отвір. Розплавлений бетон видувається назовні відбитим потоком газів через зазор між тілом пальника і стінками пропалюваного шпуру (див. рис. 1.6г).

Особливої уваги заслуговує метод руйнування залізобетону, заснований на його ослабленні, тобто усуненні дії арматури з подальшим зломом механічним шляхом (міцність на згин неармованого бетону в 8...12 разів менша міцності армованого. Цей метод полягає в руйнуванні захисного шару бетону з метою підрізування арматури (див. рис. 1.6д). Він прийнятний для руйнування залізобетонних колон, паль, стінних і рамних конструкцій з розташуванням арматури по периметру перетину розлому конструкції на відстані до 100 мм від зовнішньої поверхні [5].

Для зниження енергоємності і підвищення ефективності також може застосовуватися метод термосколювання (див. рис. 1.6е), заснований на використанні одночасної дії на залізобетонну конструкцію механічної і термічної напруг. Цей метод може використовуватися для руйнування тих же конструкцій, що і при попередньому.

Методи оббурювання, підрізування і термосколювання, засновані на ослабленні залізобетонних конструкцій системою отворів підрізуванням арматури або одночасно і термічною напругою, в обов'язковому порядку передбачають додаткові механічні впливи. Ці методи дії робочого органа на залізобетонну конструкцію не приводять до її руйнування, а тільки підготовлюють її для подальшого руйнування, тому їх можна виділити в окрему підгрупу під назвою «методи ослаблення».

При техніко-економічному аналізі методів направленої руйнування залізобетонних конструкцій розглядалися окремо ефективність різання і відділення. При визначенні продуктивності і енергоємності різання за основу бралася кількість (об'єм), що видаляється з шпуру, або різа зруйнованого залізобетону, а відділення – кількість (об'єм) відокремлюваної частини залізобетонної конструкції.

З аналізу видно, що машини механічного принципу дії (ударні і діамантово-обертальні) мають високу продуктивність і низьку енергоємність різання, проте їхні показники з відділення набагато нижчі ніж у машин, що працюють методами оббурювання, підрізування і термосколювання. Крім того, вони у порівнянні з термічними пальниками володіють підвищеними масами і габаритами, що веде до великих трудовитрат на установку і переміщення, а також вимагають додаткових механізмів.

Електродуговий спосіб руйнування залізобетонних конструкцій у поєднанні з прогресивними методами дії має добрі техніко-економічні показники різання залізобетону і відділення залізобетонних конструкцій. Проте його застосування утруднене тим, що вугільні електроди в процесі роботи перегорають, вкорочуються, а це викликає необхідність створення механізму їх поглиблення або доводиться робити це вручну, що дуже ускладнює конструкцію машини і весь процес руйнування залізобетону.

Спосіб руйнування залізобетонних конструкцій кисневим «списом», не дивлячись на відносно хороші техніко-економічні показники, не може бути успішно застосований при реконструкції з тих же причин, що і електродуговий. Крім того, у зв'язку з рясним димовиділенням при різанні залізобетону кисневим списом використання його неможливе при веденні ремонтних робіт у закритих приміщеннях.

Високотемпературний газовий струмінь порівняно швидко ріже залізобетон незалежно від густини армування, а той факт що в 1 кг робочого органа термоінструмента може бути зконцентровано 25...100 кВт потужності і те, що робочий, орган пов'язаний з блоком подачі енергії гнучким зв'язком (пакет кабелів, шлангів), технологічність його використання в порівнянні з іншими відомими способами не викликає сумнівів.

Аналіз способів і методів руйнування залізобетонних конструкцій показав, що найбільш економічним способом є термореактивний, особливо при використанні плазмових пальників, що працюють на універсальній енергії – електричній. З методів найбільш прийнятних для

руйнування залізобетонних конструкцій плазмовим пальником є методи оббурювання, підрізування і термосколювання, при яких використовується плазмовий пальник, нерухомо встановлений на поверхні конструкції проти розташованої в бетоні арматури.

Дані, отримані в результаті техніко-економічного аналізу, дуже показові як відносно доказу високої економічності і технологічності термічного способу руйнування при правильному визначенні методів ведення робіт, так і відносно правильності вибору типу термічного робочого органу.

Висока ефективність руйнування залізобетонних конструкцій плазмовим пальником у поєднанні з економічними методами впливу викликає необхідність встановлення взаємозв'язку конструкції плазмотрону і режиму його роботи з процесом утворення шпуру в залізобетонні для створення високопродуктивного і надійного бетоноруйнівного робочого органу.

На сьогодні цей взаємозв'язок вивчений недостатньо через надзвичайну складність процесів і явищ, які відбуваються в зоні взаємодії залізобетону з високотемпературним надзвуковим газовим струменем.

Не дивлячись на те, що дослідження термічного руйнування твердих мінеральних середовищ є темою великого числа робіт [9, 86, 87], до теперішнього часу фізична сутність процесу як крихкого руйнування гірських порід, так і руйнування плавленням під впливом інтенсивного теплового потоку не з'ясована. Тому недостатня вивченість процесу термічного руйнування перешкоджає створенню фізичних основ для проектування плазмотронів, що забезпечують надійну і ефективну їх роботу.

З метою визначення якісних і кількісних показників процесу термогазодинамічного руйнування твердих мінеральних середовищ коло дослідників запропоновані математичні моделі процесу руйнування. Зважаючи на велику кількість відомих уявлень про фізичну суть процесу, відзначимо лиш найбільш загальні їх положення.

Низкою дослідників [11, 48, 64] детально розглянутий процес руйнування плавленням струмопровідних матеріалів плазмовою дугою прямої дії, визначені основні параметри і методика їх визначення, так само детально розглянутий процес руйнування реактивними пальниками і плазмотронами побічної дії гірських порід методом лущення. Проте ці методики, зважаючи на різноманітність фізичних явищ, не можуть бути використанні для описання процесу руйнування бетону.

Великий інтерес представляє робота К. В. Васильєва [14], у якій для визначення швидкості руйнування при розділовому різанні матеріалів запропонована спрощена методика, заснована на обліку втрат тепла в результаті теплопередачі в матеріал, що руйнується, та навколишнє повітря. Приймається до уваги тільки те тепло, яке витрачається на нагрів матеріалу, що видаляється з утвореного прорізу. В цьому випадку швидкість визначається з виразу

$$V = \frac{q_0 - q_n}{b\delta\rho L}, \quad (1.1)$$

де q_0 – питомий тепловий потік на зрізі сопла пальника; q_n – втрати питомого теплового потоку; b – ширина різки; δ – товщина матеріалу, що розрізається; ρ – щільність матеріалу; L – схована теплота плавлення.

Для визначення швидкості руху фронту руйнування бетону під впливом високотемпературної газової струмینی реактивних пальників у роботах [48, 85] передбачається, що тепла енергія витрачається на нагрівання бетону на глибину δ до температури плавлення $T_{пл}$ на плавлення й подальше його нагрівання до температури виносу продуктів розплаву (шлаків) $T_{ви}$. Тією невеликою кількістю тепла, яка витрачається на нагрівання сусідніх ділянок бетону, можна знехтувати, тому що коефіцієнт теплопровідності бетону дуже малий. Рівняння для визначення швидкості руху фронту руйнування матиме такий вигляд:

$$V = \frac{\alpha(T_n - T_o)}{C\rho(T_{ви} - T_o) + L\rho}, \quad (1.2)$$

де α – коефіцієнт теплопередачі; C – питома теплоємність бетону; ρ – щільність бетону; T_o – початкова температура бетону; T_n – температура плавлення бетону; $T_{ви}$ – температура виносу продуктів руйнування; L – питома теплота плавлення бетону.

Однак слід зазначити, що запропонований метод при проектуванні робочих органів, що руйнують залізобетон плавленням, може бути використаний тільки тоді, коли відома температура виносу продуктів розплаву (шлаків), а це обмежує його застосування.

Високотемпературний надшвидкісний газовий струмінь, будучи робітничим руйнуючим органом, повинна бути основним об'єктом вивчення й розглядатися з погляду виявлення властивостей, що сприяють поліпшенню умов руйнування залізобетону.

Вивчення формування й будови високошвидкісних газових струменів стало темою багатьох робіт [8, 85], однак більшість із них були

спрямовані на створення ракетних двигунів, а конструкторів ракетних двигунів не цікавили процеси, що протікають у тілі струменя після того, як він залишає сопло.

У роботах [5, 85] докладно розглянутий високошвидкісний газовий струмінь як робочий орган термогазодинамічної машини, його характер взаємодії з перешкодою, і описаний вплив на бетон струменя з дозвуковими й надзвуковими течіями. Доведено, що неоднорідність струменя позначається на характері руйнування матеріалу. При взаємодії струменя з перешкодою картина течії ускладнюється й стає залежною від нерозрахованості й особливостей тієї зони струменя, у якому перебуває перешкода. Тому що форма поверхні, що руйнується, постійно змінюється в часі, процес плинущого газу в зоні взаємодії також постійно змінюється.

Є. А. Боженовим у роботі [5] розглянуто руйнування мінерального середовища, починаючи з моменту виникнення контакту між її поверхнею й тілом надзвукового високотемпературного струменя. Велика увага приділена дослідженню руху відпрацьованого газу з розплавленими продуктами руйнування. Проте автор проходить повз явище влучення розплавлених продуктів середовища, що руйнується, на охолоджувану торцеву частину пальника і взаємодії елементів газу з відбитим потоком газу та зі зваженими продуктами руйнування, що становить певний інтерес.

У результаті виконаного огляду існуючих способів розробки міцних ґрунтів і гірських порід установлено, що перспективним напрямком, що найбільш повно відповідають вимогам будівельного виробництва в умовах реконструкції, для руйнування залізобетонних конструкцій є термогазодинамічний спосіб на основі плазмових генераторів тепла.

За результатами аналізу існуючих плазмових технологій, систематизувавши конструктивні схеми плазмотронів і їх основні параметри, можна зробити висновок, що для руйнування залізобетону, завдяки своїй простоті й універсальності, найбільше успішно можуть бути використані плазмотрони непрямої дії, прямої полярності з коаксіально розташованими електродами й з вихровою повітряною стабілізацією дуги.

Аналізом існуючих методик визначення швидкості й дальності процесу руйнування залізобетону встановлено, що для створення ефективних і надійних пристроїв, що руйнують залізобетон, і відпрацьовування придатних в умовах реконструкції технічних прийомів виконання конкретних робіт необхідно провести додаткові дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович – М. : Наука, 1969. – 824 с.
2. Технология бетона, строительных изделий и конструкций / [Ю. М. Баженов, Л. А. Алимов, В. В. Воронин, У. Х. Магдеев]. – АСВ, 2004, 256 с. – ISBN: 5-93093-173-9.
3. Бакирова О. И. О некотором методе решения задачи Стефана / О. И. Бакирова // Диф. Уравнения. – 1983. – № 3. – С. 491–500.
4. Бакирова О. И. Метод решения термодиффузионной задачи / О. И. Бакирова. – М. : 1982. – 19 с.
5. Боженев Е. П. Термогазодинамическая обработка строительных материалов / Е. П. Боженев. – М. : – Стройиздат, 1985. – 208 с.
6. Борисенко А. Н. Течение газов в катодной камере аксиального плазмотрона с торцевым катодом / А. Н. Борисенко // Сварочное производство. – № 12. – 1980.
7. Бричкин А. В. Огневой способ направленного разрушения бетона и железобетона / А. В. Бричкин, В. В. Перевертун. – Алма-Ата, 1965. – 60 с.
8. Бричкин А. В. Резка бетона и железобетона газовой струей высокой температуры и скорости / А. В. Бричкин, В. В. Перевертун // Бетон и железобетон. – № 11. – 1960.
9. Бричкин А. В. Термическое бурение горных пород / А. В. Бричкин, А. Н. Генбач, П. Н. Чулаков. – М. : Огнестрой, 1958. – 88 с.
10. Будак Б. М. О методе прямых для некоторых краевых задач / Б. М. Будак. – Докл. АН СССР. – 1956. – Т. 109, № 1. – С. 9–12.
11. Быховский Д. Г. Плазменная резка / Д. Г. Быховский. – Л. : Машиностроение, 1974. – 260 с.
12. Вайнберг А. М. Математическое моделирование процессов переноса. Решение нелинейных краевых задач / А. М. Вайнберг. – Москва-Иерусалим, 2009.
13. Василенко В. А. Теория сплайн-функций / В. А. Василенко. – Новосибирск : НГУ, 1978. – 65 с.
14. Васильев К. В. Плазменно-дуговая резка / К. В. Васильев. – М. : Машиностроение, 1974. – 111 с.
15. Коррозия строительных материалов / [В. Н. Вернигорова, Е. В. Королев, А. И. Еремкин, Ю. А. Соколова]. – М. : Палеотип, 2007. – 176 с.
16. Разрушение прочных грунтов / [Ю. А. Ветров, В. Л. Баладинский, В. Ф. Баранников, В. П. Кукса]. – К. : Будівельник, 1972. – 351 с.

17. Власенко А. Н. Плазменный рабочий орган для разрушения железобетона / А. Н. Власенко. – К. : КИСИ, 1989.
18. Власенко А. Н. Разрушение бетона с целью оголения арматуры голов свай / А. Н. Власенко : Тезы докладов Республиканского семинара молодых ученых по проблемам механизации и автоматизации земляных работ в строительстве. – К. : КИСИ, 1986.
19. Воздвиженский Б. И. Современные способы бурения скважин / Б. И. Воздвиженский, А. К. Сидоренко, А. Л. Скорняков. – М. : Недра, 1978. – 342 с.
20. Разрядноимпульсная технология обработки минеральных сред / [Г. Н. Гаврилов, Г. Г. Горовенко, П. П. Малюшевский, А. Г. Рябинин]. – К. : Наукова думка, 1979. – 110 с.
21. Гейман Л. М. «Взрыв»: История, практика, перспектива / Л. М. Гейман. – М. : Наука, 1978. – 183 с.
22. Годунов С. К. Разностные методы численного решения задач газовой динамики / С. К. Годунов, К. Л. Семендяев. – Вычислительная математика и математическая физика – 1962. – Т. 2, № 7, – С. 1602–1607.
23. Данилов Н. Н. Технология строительных процессов / Н. Н. Данилов, О. М. Терентьев. – М. : Высшая школа, 1997. – 464 с.
24. Данилюк И. И. Двухслойная нестационарная задача Стефана при наличии теплового удара / И. И. Данилюк, В. И. Олейник. – Докл. АН УССР, Сер. А. – 1986. – № 5. – С. 3–7.
25. Дмитриев А. П. Термическое и комбинированное разрушение горных пород / А. П. Дмитриев, С. А. Гончаров. – М. : Недра, 1978. – 304 с.
26. Дмитриев А. П. Обоснование шкалы буримости горных пород термическим способом / А. П. Дмитриев, Л. С. Кузьяев. – Научные труды МИРГЭМ. – 1964. – № 52.
27. Донской А. В. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении / А. В. Донской, В. С. Клубникин. – Л. : Машиностроение, 1979. – 221 с.
28. Евсеев Г. А. Кислородная резка бетона и железобетона / Г. А. Евсеев, В. М. Рыбаков. – М. : Стройиздат, 1969. – 96 с.
29. Евсеев Г. В. Оборудование и технология газопламенной обработки металлов и неметаллических материалов / Г. В. Евсеев, Д. Л. Глизманенко. – М. : Машиностроение, 1974. – 312 с.
30. Егоров В. И. Точные методы решения задач теплопроводности : учеб. пособ. / В. И. Егоров. – СПб : Спб ГУ ИТМО, 2006. – 39 с.

31. Жанлав Т. Метод сплайн-коллокации для параболических уравнений второго порядка с гладкими и разрывными коэффициентами / Т. Жанлав, В. Л. Мирошниченко. // Метод сплайн-функций. Вычислительные системы. Новосибирск. – 1981, Вып. 87. – С. 77–98.
32. Жизняков С. Н. Сварка и резка в строительстве / С. Н. Жизняков, В. И. Мельник. – Учеб. пособие для средних спец. учеб. заведений. – М. : Стройиздат, 1995. – 544 с. : ил. ISBN 5-274-00418-0
33. Ильин И. А. Применение кубических сплайнов к решению второй краевой задачи уравнения теплопроводности с разрывными коэффициентами. Численные методы механики сплошной среды / И. А. Ильин, А. Т. Лукьянов. – Новосибирск. – 1976. – Т. 7, № 1. – С. 62–71.
34. Термический способ проведения шпуров / [Р.П. Каплунов, С. К. Кочнев, А. Н. Коваленко, Л. И. Завялов]. – М. : Недра, 1954, Горный журнал № 3.
35. Киреев В. И. Численные методы в примерах и задачах / В. И. Киреев, А. В. Пантелеев. – М. : Высшая школа, 2008. – 480 с.
36. Корсаков П. Ф. Классификация способов разрушения горных пород / П. Ф. Корсаков. – М. : Нерудные строительные материалы. – 1967. – Вып. 22.
37. Кортес А. П. Сварка, резка, пайка металлов / А. П. Кортес. – Аделант, 2007. – с. 192. – ISBN: 5–89691–032–0.
38. Крылов В. И. Начало теории вычислительных методов / В. И. Крылов, В. В. Бобков, П. И. Монастырский. // Дифференциальные уравнения. – М. : Наука и техника, 1986. – 311 с.
39. Ладыженская О. А. Метод конечных разностей в теории уравнений с частными производными / О. А. Ладыженская. – УМИ. – 1957. – Т. 12, № 5. – С. 10–13.
40. Лионс Ж. Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач / Ж. Л. Лионс. – Эдиториал УРСС, 2010. – 588 с.
41. Лучко Й. Й. Методи оцінки несучої здатності і підвищення тріщиностійкості залізобетонних елементів конструкцій / Й. Й. Лучко. – Львів : Слово і Комерція. – 436 с. – 1997.
42. Лучко Й. Й. Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних та залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування : моногр. / Й. Й. Лучко, В. М. Чубріков, В. Ф. Лазар. – Львів : Каменяр, 1999, 348 с. – ISBN: 577450753X.
43. Любов Б. Я. Математический анализ плавления тел / Б. Я. Любов. – Изв. АН СССР Металлы, 1970, № 2. – С. 152–162.

44. Маилян Р. Л. Строительные конструкции / Р. Л. Маилян, Д. Р. Маилян, Ю. А. Веселев. – Учебное пособие. Изд. 2е. – Ростов н/Д : Феникс, 2005. – 880с.
45. Макаров В. Л. Применение точных разностных схем к оценке сходимости метода прямых / В. Л. Макаров, А. А. Самарский // Вычислительная математика и математическая физика. – 1980. – Т. 20, № 2. – С. 371–387.
46. Мальцев А. П. О сходимости метода прямых для некоторых задач параболического типа / А. П. Мальцев. – Изв. вузов. Радиофизика. – 1972. – Т. 15, № 7. – С. 1452–1455.
47. Марчук Г. И. Применения метода расщепления /дробных шагов/ для решения задач математической физики / Г. И. Марчук, Н. Н. Яковенко. – Новосибирск : Наука, 1966.
48. Меженин Ю. М. Резка штраб в бетонных конструкциях вольтовой дугой / Ю. М. Меженин. – М. : Механизация строительства, 1980. – № 10.
49. Михлин С. Г. Вариационные методы в механической физике / С. Г. Михлин. – М. : Наука, 1970. – 512 с.
50. Михлин С. Г. Численная реализация вариационных методов / С. Г. Михлин. – М. : Наука, 1966. – 432 с.
51. Монастырский О. В. Машина для резания бетона и железобетона / О. В. Монастырский // Механизация строительства. – 1980, № 2.
52. Монахов В. Н. Краевые задачи со свободной границей для эллиптических систем уравнений / В. Н. Монахов. – М. : Наука, 1977. – 424 с.
53. Морозов В. А. О дифференциально-разностных схемах 2-го порядка точности для квазилинейных задач параболического типа с разрывными элементами / В. А. Морозов // Вестник Московского университета. – 1964. – Сер. 1, № 2. – С. 12–22.
54. Морозов В. А. Сходимость метода прямых для некоторых краевых задач / В. А. Морозов // Вестник Московского университета. – 1962. – Сер. 1, № 5. – С. 25–33.
55. Нестеренко А. И. Метод вспомогательной сетки для численного решения задач с подвижными границами фаз / А. И. Нестеренко, И. Г. Нестеренко . // Вычислительная математика и математическая физика. – 1984. – Т. 24, № 3. – С. 651–659.
56. Никитенко Н. И. Исследование нестационарных процессов тепло- и массообмена методом сеток / Н. И. Никитенко. – К. : Наукова думка, 1971. – 266 с.

57. Николаев И. А. Параллельные алгоритмы решения трехмерного уравнения теплопроводности на основе схем расщепления / И. А. Николаев, А. И. Сухинов, О. И. Овчаренко. – Таганрог. радио-техн. ин. – Таганрог, 1986. – 10 с.
58. Обэн Ж. П. Приближенное решение эллиптических краевых задач / Ж. П. Обэн. – М. : Мир, 1977. – 383 с.
59. Оганесян Л. А. Вариационно-разностные методы решения эллиптических уравнений / Л. А. Оганесян, Л. А. Руховец. – Ереван : Изд-во АН АрмССР, 1979. – 335 с.
60. Олейник О. А. Задачи Коши и краевые задачи для уравнения типа нестационарной фильтрации / О. А. Олейник, А. С. Калашников. – ИАН СССР, сер. «Математика». – 1958.– Т. 22, № 5. – С. 667–704.
61. Патанкар С. В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах / С. В. Патанкар. – М. : МЭИ, 2003. – 312 с. – ISBN: 5–7046–0898–1.
62. Победря Б. Е. Численные методы в теории упругости и пластичности / Б. Е. Победря. – М. : МГУ, 1995. – 366 с.
63. Полевой Г. В. Газопламенная обработка металлов / Г. В. Полевой, Г. К. Сухинин. – М. : Академия, 2005. – 336 с.
64. Полуянский С. А. Плазмо-шарошечное разрушение крепких горных пород / С. А. Полуянский, Б. Д. Алымов, И. В. Трусков. – К. : Наукова думка, 1979. – 192 с.
65. Попов В. М. Исследование параметров бурения и резание искусственных минеральных сред термобурами / В. М. Попов. – Автореферат канд. диссерт. Томский политехнический институт, 1966.
66. Попов В. М. Огнеструйный способ бурение бетонов / В. М. Попов, И. А. Федин // Механизация строительства. – № 9. – 1966.
67. Румянцев А. В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности / А. В. Румянцев. – Калининградский государственный университет, 1995. – 170 с. – ISBN: 5–230–08824–9.
68. Рыжкин А. А. Обработка материалов резанием / А. А. Рыжкин, К. Г. Шучев, М. М. Климов. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 411 с.
69. Рыкалин Н. Н. Лазерная обработка материалов / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, А. Н. Кокора. – М. : Машиностроение, 1975. – 296 с.
70. Рыкалин Н. Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машиностроение, 1978. – 239 с.

71. Рындюк В. И. Об улучшении интегрального метода прямых для решения уравнений теплопроводности / В. И. Рындюк, А. Д. Чернышов. – Ред. Инж.-физ. журн. – Минск, 1982. – 15 с.
72. Саленко О. Ф. Эффективне гідро різання : моногр. / О. Ф. Саленко, В. Б. Струтинський. – Кременчук : КГПУ, 2005. – 488 с.
73. Самарский А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – М. : Эдиториал УРСС, 2003. – 785 с.
74. Смуров И. Ю. Нестационарные задачи нагрева и плавления металлов лазерным излучением и плазмой / И. Ю. Смуров. – Диссертация канд. физ.-мат. наук. – М., 1981. – 192 с.
75. Соловьева Е. Н. О методе итераций в решении многофронтной задачи Стефана / Е. Н. Соловьева. – М. : МГУ, 1985. – С. 37–43.
76. Сторожук Н. М. Подготовка свай под сборный ростверк с использованием плазмы / Н. М. Сторожук, А. Н. Власенко: / тезы обласной научно-технической конференції /. – Винница, 1986.
77. Тихий Д. Я. Эстафета без финиша: Открытие электрической дуги и история ее развития / Д. Я. Тихий. – Л. : Лениздат, 1984. – 55 с.
78. Тихомиров Р. А. Гидрорезания неметаллических материалов / Р. А. Тихомиров, В. С. Гуенко. – К. : Техника, 1984. – 150 с.
79. Углов А. А. Расчет Абляции пластины конечной толщины / А. А. Углов, И. Ю. Смуров, Ю. Н. Лохов // Физ.-хим. обраб. материалов. – 1982. – № 1. – С. 3–12.
80. Фокин В. М. Основы энергосбережения в вопросах теплообмена / В. М. Фокин, Г. П. Бойков, Ю. В. Видин. – М. : Машиностроение, 2005. – 192 с. – ISBN: 5–94275–178–1.
81. Цветков Ф. Ф. Тепломассообмен / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев. – М. : МЭИ, 2005. – 550 с. – ISBN: 5–7046–1270–9.
82. Чернышов В. Н. Тепловые методы технической диагностики строительных материалов и изделий : моногр. / В. Н. Чернышов. – М. : Машиностроение, 2007. – 208 с.
83. Шаповалов О. М. Залізобетонні конструкції : навч. метод. посіб. / О. М. Шаповалов. – Харків : ХНАМГ, 2005. – 147 с.
84. Шашков А. Г. Волновые явления теплопроводности. Системно-структурный подход / А. Г. Шашков, В. А. Бубнов, С. Ю. Яновский. – М. : Наука и техника. – 2004 – 280 с.
85. Эпштейн Е. Ф. Исследование работы бензовоздушного термобура / Е. Ф. Эпштейн, А. Н. Москалев. – М. : Горный журнал № 4, 1965.

Наукове видання

**Власенко Анатолій Миколайович
Риндюк Світлана Володимирівна**

**МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
РУЙНУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготовлено С. Риндюк

Підписано до друку 23.10.2014 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 6,24.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2014-49.

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.