

DOI 10.32820/2079-1747-2020-25-145-151

УДК 624.15.04 (075.8)1:621.835

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ
БЕТОНУ ПІД ДІЄЮ ІМПУЛЬСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**©Фролов Е.А.¹, Резніченко Н.К.², Коробко Б.О.¹, Попов С.В.¹, Дерябкіна Є.С.²*Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка,¹**Українська інженерно-педагогічна академія²***Інформація про авторів:**

Фролов Євгеній Андрійович: ORCID 0000-0002-9415-1066, naumova_olga1@gmail.com, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування, Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, Першотравневий проспект, 24, 36011, м. Полтава, Україна.

Резніченко Микола Кирилович: ORCID: 0000-0002-6989-0270; rezlynik@ukr.net; доктор технічних наук, професор кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні і зварювальному виробництві; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська 16, г. Харків, 61003, Україна.

Коробко Богдан Олегович: ORCID 0000-0001-5319-6615, natavereh@ukr.net, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування, Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, Першотравневий проспект, 24, 36011, м. Полтава, Україна.

Попов Станіслав В'ячеславович: ORCID: 0000-0003-2381-152X, psv26@i.ua, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних машин і устаткування, Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, Першотравневий проспект, 24, 36011, м. Полтава, Україна.

Дерябкіна Євгенія Станіславівна: ORCID: ORCID 0000-0002-5531-0124, 216464@mail.ru, кандидат технічних наук, доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні і зварювального виробництва, Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Робота присвячена експериментальним дослідженням із вивчення тривалої міцності бетону, що підлягає дії ударних імпульсних навантажень. Для технологічного обладнання машинобудівних цехів виникає необхідність у створенні бетонних фундаментів, що мінімізують його динамічний вплив на промислову будівлю, а також споруди, розташовані поруч. Фундаменти зазнають ударно-імпульсних навантажень. Характер руйнування бетонних фундаментів для ударно-імпульсного обладнання обробки металів тиском (штампування, зварювання вибухом, електрогідравлічне штампування, пневмоударне штампування та ін.) не досліджений належним чином. Для експериментальних досліджень запропоновано конструкцію газодетонаційної установки ГДУ-1. Робочим середовищем є рідина. Енергія повідомляється від тиску горючої газокисневої суміші. Досліджувався характер руйнування бетонних неармованих, армованих та зразків із консервованими торцями. За результатами практичних експериментів рекомендовано до використання у конструкціях, на які діють багатократні імпульсні навантаження, бетону із арматурою періодичного профілю. Рекомендовано заходи, щодо підвищення довговічності бетону: часткове консервування циліндричної поверхні верхнього торця листовим металом; застосування не монолітних конструкцій, а блочних. Виконання запропонованих рішень дозволить встановлення даного обладнання у цехових приміщеннях поряд з іншим ковальсько-пресовим обладнанням.

Ключові слова: ударно-імпульсне штампування, бетонні зразки, навантаження, тріщина, армування, стійкість.

Фролов Е.А., Резниченко Н.К., Коробко Б.О., Попов С.В., Дерябкина Е.С. «Экспериментальное исследование длительной прочности бетона под действием импульсной нагрузки».

Работа посвящена экспериментальным исследованиям по изучению длительной прочности бетона, подлежащего действия ударных импульсных нагрузок. Для технологического оборудования машиностроительных цехов возникает необходимость в создании бетонных

фундаментов, мінімізують його динамічне вплив на промислове будинок, а також споруди, розташовані поруч. Фундаменти піддаються ударно-імпульсних навантажень. Характер руйнування бетонних фундаментів для ударно-імпульсного обладнання обробки металів тиском (штампування, зварка вибухом, електрогідролінійна штампування, пневмоударного штампування і др.) Не досліджено належним чином. Для експериментальних досліджень запропоновано конструкцію газодетонаційної установки ГДУ-1. Робочою середою є рідина. Енергія передається від тиску горючої газокислородної суміші. Досліджено характер руйнування бетонних неармированих, армированих і зразків з консервованими торцями. По результатам практичних експериментів рекомендується використовувати в конструкціях, на які діють багаторазові імпульсні навантаження, бетон з арматурою періодичного профілю. Рекомендовано заходи по підвищенню довговічності бетону: частичне консервування циліндричної поверхні верхнього торця листовим металом; застосування не монолітних конструкцій, а блочних. Виконання запропонованих рішень дозволить установки даного обладнання в цехових приміщеннях поруч з іншим кузнечно-пресовим обладнанням.

Ключові слова: ударно-імпульсне штампування, бетонні зразки, навантаження, тріщина, армування, стійкість.

Frolov E., Reznichenko N., Korobko B., Popov S., Deryabkina E. «Experimental research on durable strength of concrete under the impulse load».

The work is devoted to experimental studies on the long-term strength of concrete which is subject to the action of shock impulse loads. For technological equipment of machine shops there is a need to create concrete foundations that minimize its dynamic impact on the industrial building, as well as the structures located nearby. The foundations are subjected to impulse loads. The nature of the destruction of concrete foundations for impact impulse metalworking equipment (stamping, blast welding, electro-hydraulic punching, pneumatic punching, etc.) has not been properly investigated. For experimental research, the design of the gas-detonation plant GDU-1 is proposed. The working medium is liquid. Energy is reported from the pressure of the combustible gas / oxygen mixture. The character of the destruction of concrete unreinforced and reinforced specimens as well as specimens with canned ends was investigated. According to the results of practical experiments, it is recommended that concrete with periodic reinforcement be used in structures subject to multiple impulse loads. The article recommends measures to improve the durability of concrete, which include partial preservation of the cylindrical surface of the upper end by sheet metal; the use of block structures, not of monolithic structures. The implementation of the proposed solutions will allow the installation of this equipment in the shop premises, along with other forging and press equipment.

Keywords: impulse punching, concrete specimens, loading, cracking, reinforcement, durability.

Вступ

Широкого застосування у різних галузях машинобудування для виготовлення листових деталей суцільної форми на ударно-імпульсному цеховому обладнанні з малопластичних та високоміцних матеріалів набули такі види штампування: вибухове, електрогідролінійне, пневмоударне рідиною та еластичним середовищем [1, 2]. Невід'ємною частиною такого обладнання є бетонний фундамент. Він призначений для запобігання динамічного

впливу на будівлю роботи обладнання, а також забезпечення виконання безпечних технологічних процесів. Прагнення розташувати таке обладнання у цехових приміщеннях вимагає створення надійних фундаментів для встановлення із метою забезпечення достатньої жорсткості, міцності, довговічності від дії багатократного імпульсного навантаження, а також для зниження вартості виготовлення [3].

Для вирішення цих питань необхідно знати параметри руху фундаментів під дією ударно-імпульсного навантаження, а саме вплив на оточуюче обладнання сейсмічної активності.

В існуючій літературі [4] наведено методики розрахунку коливань фундаментів як динамічного, так і імпульсного навантаження. Однак, недостатня кількість робіт присвячена випробуванню бетону від дії багатократних імпульсних навантажень значних енергій. Остаточо не досліджені характер руйнування бетону і, навіть, орієнтовні величини руйнуючих імпульсів або тисків на фронті падаючих ударних навантажень. Відомо лише, що бетон при дії багатократних навантажень схильний до втоми [5].

Мета роботи полягає у дослідженні армованих та неармованих бетонів на тривалу міцність від багатократного імпульсного навантаження, а також визначенні оптимальної конфігурації армування. Це надасть можливість створити високоміцні фундаменти для ударно-імпульсного обладнання, що застосовується під час різних операцій обробки металів тиском (штампування, пресування тощо).

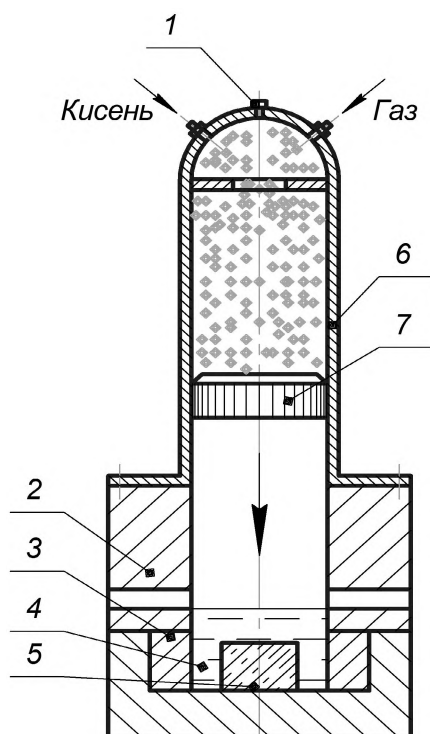


Рис.1-Експериментальна установка ГДУ-1 для газодетонаційного навантаження зразків: 1 – електрична свічка; 2 – камера; 3 – перехідна плита; 4 – рідина; 5 – зразок; 6 – газодетонаційна труба; 7 – бойок.

Основний матеріал.

Експериментальні випробування здійснювались на лабораторній газодетонаційній установці ГДУ-1 (рис.1). Енергія установці повідомляється імпульсом тиску залежно від початкового тиску газокисневої суміші від 1,0 до 5,0 кДж.

Варіюванням величини падаючого імпульсу тиску (за рахунок початкового тиску газокисневої суміші) та залежно від числа циклів навантаження даного бетонного зразка до руйнування побудовано графічні залежності ($i_{шт}$, N), де N – число імпульсів, яким піддається даний зразок.

Під час досліджень велися спостереження за характером руйнування зразків. Проаналізовано фактори їх руйнування та можливі способи підвищення їх стійкості.

Встановлено, що характер руйнування зразків залежить від їх конструкції. Якщо неармовані зразки руйнувалися у діаметральних перетинах, у загальному наслідуючи наші уявлення про механізм руйнування під дією ударних хвиль, то армовані зразки

руйнувалися шляхом відколювання частинок переважно на передньому торці.

У зв'язку із виявленим характером руйнування зразків виникло складне питання щодо встановлення меж їх граничного стану. За граничний стан неармованих зразків було прийнято їх повне розколювання у діаметральній площині, а армованих зразків – закріплення відколів за кільцевим периметром переднього торця зразка.

Неармовані бетонні зразки (серія А)

Під час багатократних навантажень зразків було встановлено, що останні руйнуються у площинах, перпендикулярних до напрямку поширення ударних хвиль на цілком визначеній відстані від заднього торця зразка. Після розвитку площини розколу приблизно на такій самій відстані виникає друга площина розколу, зміщена за напрямком до переднього торця і т.д. (рис. 2).

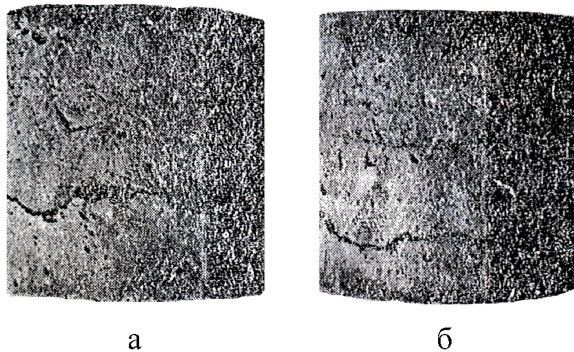


Рис.2 Неармований бетонний зразок:
а – із розвинутою першою тріщиною;
б – із першою та другою тріщинами.

Імпульс настільки незначний, що можна вважати неармований бетон марки М-500 непридатним для використання у конструкціях, що зазнають багатократної дії жорстких ударних хвиль. У пошуках відповіді на питання підвищення стійкості конструкцій з неармованого бетону досліджувались зразки, завчасно розрізані на дві нерівні частини 1 та 2 (рис.3). Місце розрізу зразка приблизно відповідало положенню тріщини розколу. Досліди показали, що частина 1 руйнується так само, як і нерозрізаний зразок. Стійкість же частини 2 виявилася набагато більшою. Наприклад, при $i = 26 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ та $N = 11$ не помічено ніяких слідів руйнування частини 2, у той же час як нормальні зразки при такому ж імпульсі та $N = 1 - 2$ вкривалися мікротріщинами, а при $N = 5 - 6$ виявлені закріплені тріщини.

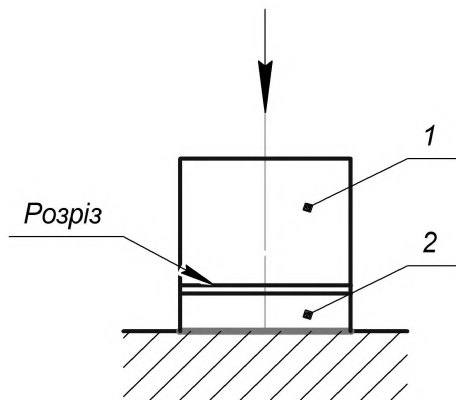


Рис.3 Схема дослідження зразків з розрізом.

Спостерігаючи за цілком закономірним розташуванням тріщин розколу за довжиною зразка, можна зробити висновок, що причиною розколу є відбиті хвилі розтягу. За графіками хвильових течій та межею міцності зразка при динамічному розтязі можна завчасно встановити розташування зон розколу. Наприклад, для числа імпульсів $N = 100$ розкол зразка слід очікувати при величині імпульсу $i_{100} = 11 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{м}^2$, а закріплення тріщини за периметром зразка при $i_{100} = 1,74 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{м}^2$.

Зміна положення площини перетину зразка суттєво не впливає на стійкість частини 2.

Отже, можна суттєво підвищити стійкість неармованого бетону дії жорстких ударних хвиль, якщо монолітні конструкції замінити конструкціями, що розчленовані на блоки. Верхній блок, що підлягає дії імпульсу, буде як і раніше, менш стійким, і його легко змінити, проте стійкість нижніх блоків підвищиться на багато разів.

Армовані бетонні зразки (серії Б та В)

Загальна картина руйнування армованих блоків має наступний характер. Після декількох навантажень на поверхні зразків з'являються волосяні (розглядаються при збільшенні) тріщини, локалізовані переважно у зонах розташування арматури, спочатку на передньому торці, пізніше у середній частині та, нарешті, на задньому торці зразка (рис. 4, а). Спочатку волосяні тріщини з'являються у кільцевих напрямках, а пізніше і вздовж твірних. Зі збільшенням числа навантажень ці тріщини стають видимими та заглиблюються аж до відколювання поверхневих частин бетону (рис. 4, б). Відколювання частинок спостерігається перш за все на передньому торці, дещо пізніше починається відколювання у середній частині зразка в області кільцевої арматури (рис. 4, в).

Таким чином, армовані зразки руйнуються відколюванням частинок бетону переважно на передньому торці, що звернений до заряду. Частинки бетону відколюються за периметром зразка і при більшому числі навантажень на самому торці (рис. 4, в).

У всіх випадках було помічено, що тріщини виникають перш за все у районі кільцевої периферійної арматури і досить прогресивно розвиваються, тому слід визнати у подібних конструкціях кільцеву арматуру небажаною, надаючи перевагу арматурі осьовій та радіальній. Зразки із посиленою поздовжньою арматурою, серія Б, виявили більшу довговічність у порівнянні зі зразками серії В. Суттєвої різниці в характері руйнування зразків серії Б і В не було помічено.

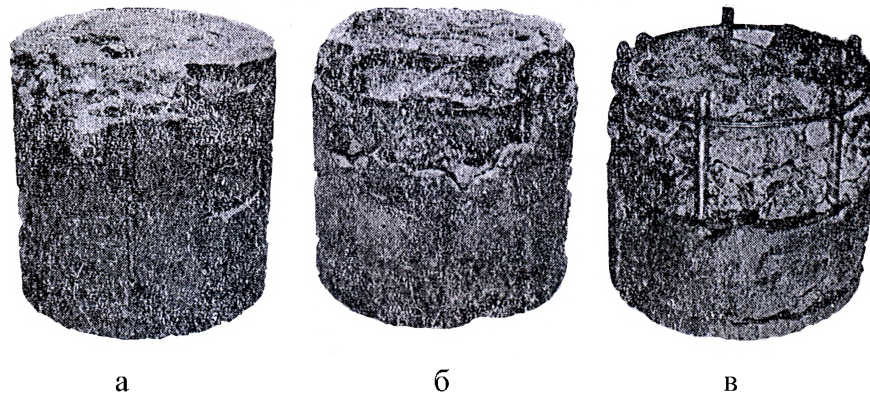


Рис. 4 Армований бетонний зразок у різних фазах руйнування.

Армовані зразки виявили значно більшу витривалість по відношенню до імпульсних навантажень, ніж зразки неармовані. Навіть при досить великих імпульсах не вдалося довести армований зразок до повного руйнування. Характер руйнування армованих та неармованих зразків також суттєво відрізняється один від одного. Якщо неармовані зразки розколювалися у діаметральних перетинах від дії відбитих хвиль розтягу, то в армованих зразках таких розколів не помічено. Очевидно, внаслідок наявності поздовжньої арматури. На торцях же, де матеріал бетону менш обмежений арматурою, дія пробігаючих хвиль розтягу проявляється в відколюванні частинок матеріалу, а пізніше вони проникають вглиб зразка.

Слідкуючи за характером руйнування армованих зразків, для підвищення їх довговічності бажано змінити схему арматури, обладнавши її консервуючими елементами у вигляді торцевих дисків, до яких була б приварена поздовжня арматура.

Якщо прийняти за граничний стан зразка відколювання частинок бетону на торці, що закріплювалися по периметру зразка, то при числі імпульсів $N = 100$ слід очікувати $i = 18,5 \text{ кг} \cdot \text{с}/\text{м}^2$, що у 10 разів більше, ніж у неармованого зразка.

Армовані зразки із консервованими торцями (серія Г)

Після деякого числа навантажень на поверхні зразка у зоні обох торців з'являються волосяні тріщини, видимі лише при збільшенні. Зі збільшенням числа імпульсів тріщини розвиваються до видимих. Загальна орієнтація тріщин осьова із більшою інтенсивністю тріщиноутворення на передньому торці у зоні розташування поздовжньої арматури. Пізніше починається відколювання частинок бетону: спочатку оголюється поздовжня арматура, а потім розміри частинок, що відколюються, збільшуються і руйнування проникає вглиб зразка. Відколювання частинок у переднього торця більше, ніж у заднього. При достатньо великому числі імпульсів відколювання закріплюється за периметром зразка, за усією поверхнею без якої-небудь закономірності проявляються багаточисельні добре розвинені тріщини. У цій фазі руйнування починає розвиватися розколювання у діаметральній площині, що аналогічне до розколювання неармованих зразків (рис. 5).

Зразки із консервованими торцями виявили значно більшу витривалість по відношенню до імпульсних навантажень, ніж армовані зразки, а тим більше неармовані.

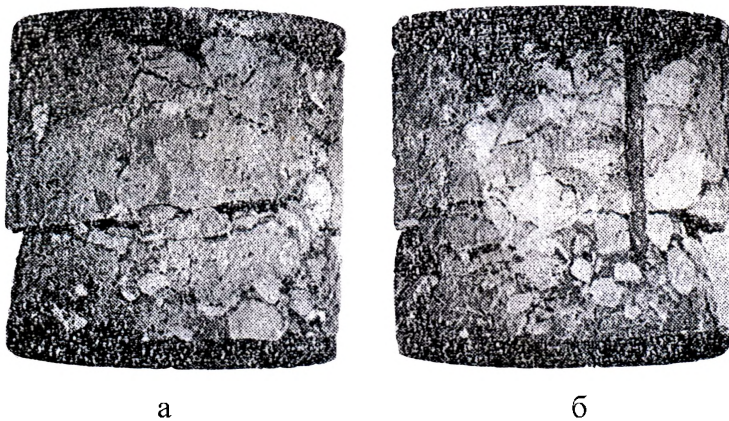


Рис. 5 Армований бетонний зразок із консервованими торцями у різних фазах руйнування.

Причиною відколювання частинок бетону слугують напруження розтягу, викликані відбитими хвилями напружень, що пробігають, а оскільки поздовжня арматура у поєднанні із торцевим консервуванням найкращим чином обмежує деформації від дії хвиль розтягу, слід визнати консервування торців неминучим елементом конструкцій, що зазнають дії багатократних імпульсних навантажень.

На рис. 6 зображено графіки ($i_{\text{пит}}, N$), що дають уявлення про величини граничних питомих імпульсів за умовою закріплення тріщин по периметру зразків із консервуванням, армованих та неармованих. Пунктирна область графіків не досліджувалася та побудована імовірно.

Аналізуючи графічні залежності (рис. 6) встановлено, що найбільший імпульс можливо орієнтовно визначити за рівнянням типу $i_{\text{пит}} \cdot N^{1,45} = 2 \cdot 10^4$.

На підставі вивчення характеру руйнування зразків відмічено, що можливе подальше підвищення їх довговічності. Це досягається шляхом часткового консервування циліндричної поверхні зразка поблизу верхнього торця. Вивчення поведінки таких зразків становить перспективу подальших наукових досліджень.

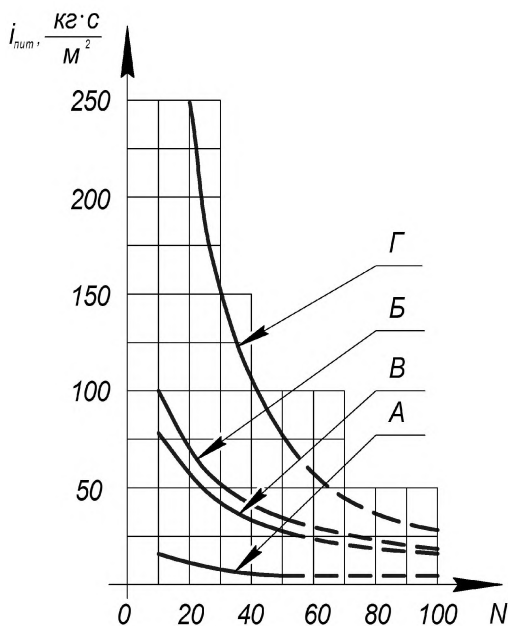


Рис. 6 Графіки граничних питомих імпульсів залежно від числа навантажень.

Висновки

У конструкціях, що зазнають багатократної дії імпульсних навантажень значних енергій, застосовувати армований бетон із арматурою періодичного профілю, що періодично закладається у напрямкові поширення ударних хвиль. Поверхні конструкцій з боку дії імпульсів необхідно консервувати захисними сталевими листами, що приварені до поздовжньої арматури, утворюючи із нею єдине ціле. Марка бетону повинна бути не нижче М-300. Рекомендується також консервувати бічні грані конструкції поблизу робочого торця. Доцільно монолітні конструкції замінювати блочними. Площини поділу моноліту на блоки повинні бути перпендикулярними до напрямку поширення ударних хвиль. У блочній конструкції достатньо консервувати лише перший блок, що розташований із боку діючого імпульсу.

Список використаних джерел

1. Пневмоударная и статикодинамическая штамповка сложнорельефных листовых деталей упругими средами : монография / Е. А. Фролов, А. Я. Мовшович, И. В. Манаенков [и др]. – Харьков : [б.и.], 2010. – 286 с.
2. Спеціальні методи обробки металів тиском / Ю. Є. Шамарін, С. С. Коваленко, Л. Т. Кривда [та ін]. – Київ : НМК ВО, 1992. – 208 с.
3. Строительные нормы и правила: СНИП 2.02.05 – 97. Фундаменты машин с динамическими нагрузками: нормативно-технический материал. – Москва, 1998. – 32 с.
4. Болдырев Г. Г. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах): учеб. пособие / Г. Г. Болдырев, М. В. Малышев. – Пенза : ПГУАС, 2009. – 412 с.
5. Голубков В. Н. Исследования деформации основания фундаментов квадратной и ленточной формы / В. Н. Голубков, Ю. Ф. Тугаенко, И. Л. Сива // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1998. – № 1. – С. 112–118.

References

1. Frolov, EA, Movshovich, AI, Manchenkov, IV et. al. 2010, *Pnevmoударная i statikodinamicheskaja shtampovka slozhnorelyefnyh detalej uprugimi sredami*, Harkov.
2. Shamarin, YuE, Kovalenko, SS, Krivda, LT et. al. 1992, *Spetsialni metody obrobky metaliv tyskom*, NМК VO, Kyiv.
3. Nauchno-issledovatel'skij, proektno-izyskatel'skij i konstruktorsko-tehnologicheskij institut osnovanij i podzemnyh sooruzhenij imeni N.M. Gersevanova 1997, *Stroitelnye normy i pravila: SNIP 2.02.05 – 97. Fundamenty mashin s dinamicheskimi nagruzkami*, Moskva.
4. Boldyrev, GG & Malyshev, MV 2009, *Mehanika gruntov. Osnovaniya i fundamenti (v voprosah i otvetah)*, Penzenskij gosudarstvennyj universitet arhitektury i stroitelstva, Penza.
5. Golubkov, VN, Tugaenko, YuF & Siva, IL 1968, 'Issledovanija deformacii osnovanija fundamentov kvadratnoj i lentocnoj formy', *Osnovaniya, fundamenti i mehanika gruntov*, no. 1, pp. 112-118.

Стаття надійшла до редакції 17 лютого 2020 р.