

УДК 624.954

ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАЛОРОЗМІРНИХ БУНКЕРНИХ ЄМНОСТЕЙ З ДРІБНОЗЕРНИСТИХ ТЕРМОЗМІЩЕНИХ СТАЛЕЙ

Банніков Д. О., д.т.н., проф., Мунтян А. О., к.ф.н., доц.

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, bdo2020@yahoo.com

Гезенцевей Ю. І.

ВАТ «Метінвест Інжинірінг», м. Дніпро,
efim.gezentsvey@metinvestholding.com

Сталеві бункерні ємності на тепер є основним видом листових споруд, призначеним для зберігання різноманітних сипучих матеріалів в різних галузях промисловості. В процесі їх роботи виникає ціла низка специфічних динамічних впливів, пов'язаних із рухом сипучого матеріалу під час його завантаження та вивантаження. Тому проблема дослідження та керування динамічними властивостями бункерних ємностей є доволі актуальною та важливою [1]. Відсутність її рішення часто призводить до виникнення аварійних ситуацій та відмов таких споруд, які тягнуть за собою збої в роботі цілих технологічних комплексів [2].

Доволі перспективним напрямком рішення даної проблеми, якому практично не приділяється уваги в спеціалізованій літературі, є застосування сталей з покращеними механічними характеристиками. Одним з різновидів

таких сталей, які набувають все більшого поширення в Україні та в світі, є дрібнозернисті термозміцнені сталі. Їх впровадження також підтримується новітньою нормативною базою України в галузі проектування металоконструкцій – стандартом [3]. До таких сталей належать, наприклад, сталь 10Г2ФБ, яка останнім часом стала доволі популярною для конструкцій, що працюють в складних умовах [4]. Вона відноситься до класу міцності С440. Окрім підвищеної міцності (границя текучості 430 МПа і границя міцності 520 МПа) така сталь має досить високі показники ударної в'язкості (за індексом КСЧ⁻¹⁵ на рівні не нижче 59 Дж/см² і за індексом КСЧ⁻⁶⁰ на рівні не нижче 39 Дж/см²).

В європейській практиці існує спеціальний стандарт на даний різновид дрібнозернистих термозміцнених сталей [5], який містить необхідну технічну інформацію стосовно 8 таких сталей (класів від S275 і до S460). Подібну сталь ефективно застосовують для будівельних конструкцій, що працюють в складних умовах [6].

Метою даної публікації є викладення результатів аналізу динамічних властивостей та їх зміни для малорозмірних бункерних ємностей, виконаних із сталей різного рівня міцності.

Об'єкт досліджень. В якості об'єкту досліджень розглядалась конструкція сталевого бункера обвідного траку подачі шихтових матеріалів для доменних печей. Бункери спеціально проектувались з урахуванням роботи за понижених температур для умов півночі. Прийняте детальне конструктивне рішення бункерної ємності описано в роботі [7]. Завважимо лише, що ємність являє собою пірамідально-призматичну споруду загальною висотою 4,5 м обумовлену технологічними вимогами. При цьому висота пірамідальної частини становить 4,0 м і висота призматичної частини становить 0,5 м. Конструкція є симетричною в обох площинах. Розміри ємності поверху дорівнюють 6,0×5,2 м, а розміри розвантажувального отвору – 1,2×1,2 м. Нахили граней пірамідальної частини утворюють кути із горизонтом в 59 ° і 63 °, відповідно. Повний об'єм бункера становить 68 м³, корисний об'єм – порядку 40 м³. Сипучим матеріалом, зберігання якого передбачається в ємності, є скрап ошлакований, густина якого відповідно до вихідних даних сягає 3 т/м³, а кут внутрішнього тертя – 45 °.

Процес завантаження сипучого матеріалу в ємність відповідно до технологічних умов передбачається автосамосвалами. При цьому обсяг сипучого матеріалу, який одноразово вивантажується в ємність, становить близько 50 т. В свою чергу вивантаження сипучого матеріалу з ємності супроводжується дією спеціального вібропітателя, який жорстко закріплений на конструкції самої бункерної ємності. За даними замовника режим роботи цього пристрою передбачається цілодобовим. Конструктивно вібропітатель має робочу частоту коливань 50 Гц.

Метод досліджень. В якості методу досліджень для оцінки та аналізу динамічних властивостей сталеві бункерної ємності був обраний метод скінчених елементів. Завдяки низці доволі відомих переваг та можливості

аналізу складних просторових конструкцій метод є найбільш вдалим для рішення сформульованої задачі. Практична реалізація методу скінчених елементів була обрана на базі проектно-обчислювального комплексу SCAD for Windows, який є розробкою фахівців України [8].

Методика досліджень. В ході досліджень проводився модальний аналіз для порожньої бункерної ємності, повної бункерної ємності, а також при рівня її завантаженості в 1/4, 1/2 і 3/4 повної висоти. Сипучий матеріал моделювався прикладанням тиску на поверхні ємності, які створювали необхідні значення динамічних мас. При цьому використовувались окремі напрацювання щодо моделювання ґрунтових масивів, представлені в [9].

Аналізувалась конструкція бункерної ємності, виконаної з двох видів сталей різної міцності відповідно до вітчизняного стандарту [3] – класів С255 і С440. До першого класу С255 відносяться сталі марок Ст3сп5 і Ст3пс5, з яких традиційно виконують бункера. До класу С440 відносить дрібнозерниста термічнозміцнена сталь 10Г2ФБ, яка розглядається як альтернатива традиційним сталям [4]. Для кожного варіанту попередньо виконувався статичний аналіз і підбір перерізів основних конструктивних елементів.

Результати досліджень. Поперед всього слід зауважити, що частотний спектр як порожньої, так і завантаженої на різних рівнях сталеві бункерної ємності є доволі щільним. Це відноситься до застосування сталей будь-якого рівня міцності, тобто він якісно не змінює ситуацію. Це дещо ускладнює аналіз парційних характеристик для різних елементів конструкції ємності, адже необхідно досить точно відслідкувати зміну кожної з них, виділивши із загальної маси.

Відповідно до певної форми коливань відслідковувались власні парційні частоти коливань. Вони наведені в табл. 1 і табл. 2 для різних елементів конструкції розглядуваної сталеві бункерної ємності при різних рівнях завантаженості сипучим матеріалом. Частоти згруповані відповідно до рівня міцності застосованої сталі. Нумерація горизонтальних ребер жорсткості та ділянок стінки між ними починається зверху бункерної ємності.

Таблиця 1. Парційні частоти власних коливань сталеві бункерної ємності, виконаної зі сталі класу С255

№	Елемент ємності	Парційна частота (Гц) при рівні завантаженості ємності				
		0	1/4	1/2	3/4	1
1	Бункерна балка	38,69	38,69	37,57	36,96	35,58
2	Горизонтальне ребро № 1	30,34	30,34	29,48	12,94	9,12
3	Горизонтальне ребро № 2	41,17	39,73	16,61	11,80	9,52
4	Горизонтальне ребро № 3	69,96	64,45	42,66	32,89	28,21
5	Ділянка стінки № 1	43,58	43,58	37,39	22,87	13,75
6	Ділянка стінки № 2	36,83	32,41	28,19	13,95	9,95
7	Ділянка стінки № 3	43,09	41,68	18,59	13,40	10,26
8	Ділянка стінки № 4	58,51	27,38	20,02	15,51	12,33

**Таблиця 2. Парційні частоти власних коливань
сталеві бункерної ємності, виконаної зі сталі класу С440**

№	Елемент ємності	Парційна частота (Гц) при рівні завантажуваності ємності				
		0	1/4	1/2	3/4	1
1	Бункерна балка	31,75	31,75	30,49	28,45	26,93
2	Горизонтальне ребро № 1	26,18	26,18	22,79	9,07	6,77
3	Горизонтальне ребро № 2	33,96	32,88	12,77	11,42	6,00
4	Горизонтальне ребро № 3	47,96	47,41	26,91	23,50	19,23
5	Ділянка стінки № 1	32,87	31,85	31,38	16,65	9,32
6	Ділянка стінки № 2	29,70	26,27	23,27	10,10	6,68
7	Ділянка стінки № 3	35,69	34,47	12,40	7,56	6,93
8	Ділянка стінки № 4	46,12	17,86	10,64	10,51	8,87

Як видно із представлених в таблицях результатів власний частотний спектр сталеві бункерної ємності знижується із збільшенням рівня міцності застосованої сталі. Кількісно це становить від 15 до 45 % в залежності від рівня завантажуваності бункерної ємності. Сам рівень завантажуваності ємності призводить до суттєвих зміщень спектру власних частот в нижчу сторону, порівняно із порожньою конструкцією – для окремих конструктивних елементів зниження досягає 5 раз. В практиці це призводить до того, що виникає необхідність в зменшенні частоти коливань вібропітателя. Найбільш доцільним при цьому є плавне регулювання частоти роботи вібропітателя в діапазоні до 50 Гц замість його сталої роботи з даною частотою, що і було рекомендовано розробникам.

- [1]. Качуренко В. В., Банников Д. О. Конструктивные решения стальных емкостей для сыпучих материалов : монография. Днепропетровск : Новая идеология, 2016. 168 с.
- [2]. Bannikov D. O. Analysis of the causes of accidents of steel capacitive structures for bulk materials. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. Vol. 5, pp. 91-96.
- [3]. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. [Чинний від 2015-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон, 2014. 205 с.
- [4]. Гезенцвей Е. И. Технологичность применения мелкозернистых термоупрочненных сталей в конструкциях кожухов доменных печей. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2016. № 3, С. 43-47.
- [5]. EN 10025-4:2004. Hot rolled products of structural steels. Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels, CEN, 2004. 24 p.
- [6]. Efron L. I., Litvinenko D. A. Structural-Steels - Obtaining High-strength Weldable Steels With Bainite Structure Using Thermomechanical Treatment. *Metal Science and Heat Treatment*. 1994. Vol. 36, No. 9-10, pp. 532-538.
- [7]. Hezentsvei Yu., Bannikov D. Effectiveness Evaluation of Steel Strength Improvement for Pyramidal-Prismatic Bunkers. *Eureka: Physics and Engineering*. 2020. No. 2, pp. 30-38.
- [8]. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++ / В. С. Карпиловский, Э. З. Крикунов, А. А. Маляренко, С. Ю. Филалко. А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер. – Москва : СКАД СОФТ, 2015. – 850 с.

[9]. Tiutkin O., Miroshnyk V., Radkevych A., Alkhdour A. Nonuniform Stress State of a Hoisting Shaft Lining as a Result of Disturbance of the Ground Freezing Technology. 2019. *E3S Web of Conferences*, Vol. 109, Article 00099.

DYNAMIC PROPERTIES OF SMALL-SIZED BUNKER CAPACITIES FROM SMALL-GRAINED HEAT-REINFORCED STEELS

The purpose of this publication is to present the results of the analysis of dynamic properties and their changes for small-sized bunker capacities made of steels of different strength levels. The structure of a steel bunker of bypass for the supply of charge materials for blast furnaces designed for PAO Severstal is the object of research. The design of the bunker capacity made of two types of steels of different strengths - C255 (St3sp5 and Ct3ps5) and C440 (10G2FB) grades was analyzed. The research was done using the finite element method based on the SCAD for Windows design complex. As a main result it was concluded that increased strength of steel for the container structure reduces the natural frequency values by an average of 15% for every 100 MPa of increase in strength.