

АНОТАЦІЯ

Црноя Анджелко. Ефективні звукоізоляційні матеріали для реконструкції огорожувальних конструкцій будівель. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. Одеська державна академія будівництва та архітектури. – Одеса, 2021.

Метою роботи є підвищення ізоляційних властивостей конструкції за рахунок використання панелей з гумової крихти, отриманої з переробленої сировини.

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження, її актуальність, показаний зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовані мета та задачі досліджень, наведені положення наукової новизни та практичного значення отриманих результатів.

У першому розділі проаналізовано стан проблеми звукоізоляції огорожувальних конструкцій. Наведено принципи зниження рівня шуму та звукових хвиль. Проведено огляд основних типів звукоізоляційних матеріалів. Встановлено, що всі звукоізолюючі матеріали можна розділити відповідно до основи, на якій вони виробляються, – на матеріали, вироблені на органічній основі та матеріали, виготовлені на неорганічній основі.

Встановлено, що звукоізоляційні конструкції більш ефективні порівняно зі звукоізоляційними матеріалами, оскільки розраховані на широкий частотний діапазон звукової хвилі, яка має високі проникаючі властивості. За рахунок застосування в звукоізоляційних конструкціях матеріалів різної густини і структури, а також через дотримання правил герметичності та відсутність жорстких зв'язків з іншими огорожувальними конструкціями їх ефективність значно збільшується.

Проведено огляд патентів та сучасних методів звукоізоляційних робіт. Проаналізувавши знайдені патенти на корисні моделі, наукові статті та праці,

встановлено, що тема звукоізоляції є досить актуальною. Але більшість цих патентів показують, що звукоізоляцію виконують за допомогою гіпсокартону, скла та нашаровуванням волокнистих матеріалів.

Сформульовано *робочу гіпотезу* роботи, згідно з якою найбільшу звукоізоляцію будуть мати панелі з меншою середньою густиною і виготовлені з гранул різного фракційного складу. Обґрунтування базується на тому, що при поширенні звукова хвиля зустрічає перешкоду, то в разі, коли її довжина значно менше перепони, буде спостерігатися явище відбивання хвиль. Якщо розміри перешкоди набагато менше довжини хвилі, буде спостерігатися явище дифракції: хвилі огинають перешкоду, заходячи в область геометричної тіні. У тих випадках, коли розміри перешкоди можна порівняти з довжиною хвилі, закони поширення звукової хвилі стають більш складними, тому, що одночасно має місце і певне відбивання, і дифракція. Перешкодою, від якої відбиваються хвилі, є будь-яка границя, на якій змінюється акустичний опір середовища. При падінні звукової хвилі на границю розділу двох середовищ, частина її енергії переходить в енергію відбитої хвилі, а частина проникає в інше середовище. Звукова хвиля, що розповсюджується в середовищі, досягає границі розділу цього середовища з іншим середовищем. При цьому виникають відбивна і заломлена хвилі. У нашому випадку такими середовищами є гранули гуми, в'язуче середовище та поровий простір.

У *другому розділі* описано методику проведення досліджень і наведено характеристики використаних матеріалів. В якості основної сировини для виробництва панелей в роботі застосовували використанні автомобільні шини. Встановлено, що зазначені панелі можуть використовуватися в звукоізоляційних конструкціях, а також в якості самостійного матеріалу для звукоізоляції. Для виготовлення зразків, які використовувались під час експерименту, був обраний метод при якому, під час переробки шин проводилось нагрівання гуми, після відбувалось розділення на металеві, текстильні та гумові складові, а потім гума подрібнювалась до фракції, яка

потрібна для досліджень. Для проведення експерименту були використані три фракційні комбінації гранул: 0,5-2,0 мм; 2,0-3,5 мм; 35% (0,5-2,0 мм) та 65% (2,0-3,5 мм).

Наведена загальна послідовність проведення досліджень. На всіх етапах досліджено вплив змінних першого параметра була прийнята товщина панелі: 10, 15 та 20 мм. Другим змінним параметром виступив показник середньої густини матеріалу панелі, в залежності від показників якої досліджувани зразки були розділені наступним чином: близько $\rho=600$ кг/м³, близько $\rho=700$ кг/м³, близько $\rho=900$ кг/м³. Третім змінним параметром прийнято гранулометричний склад суміші гранул, який змінювався таким чином: 0,5-2 мм; 2-3,5 мм; 0,5-2 мм (35%) + 2-3,5 мм (65%).

Разом з цим, також, були проведені вимірювання звукоізоляції для різних частотних діапазонів: для низьких (до 500 Гц), середніх (500-2000 Гц) та високих (2000-5000 Гц). Вимірювання проводилося таким чином, щоб потужність звуку була приблизно 105 дБ та випромінювалася протягом 60 секунд в два етапи.

У третьому розділі проаналізовано вплив змінних параметрів на показник звукоізоляції в огорожувальних конструкціях. Всього було виготовлено 27 зразків різної товщини, ваги і гранулометричного складу.

В ході проведення досліджень проаналізовано вплив частоти і гранулометричного складу суміші гранул на значення індексу звукоізоляції виробу. Також було показано варіювання величини звукоізоляції в залежності від товщини стінової панелі, яка була виготовлена з використанням гумової крихти. Розглянуто способи отримання і спектр застосування в сучасній промисловості гумової крихти, як матеріалу подрібнення зношених шин, що є одним з найбільш багатотоннажних полімерних відходів. Проілюстровано спосіб установки звукоізоляційних панелей під час проведення експерименту. Результати експериментів були порівняні між собою та представлені на діаграмах для кожної групи окремо.

Результати випробувань дозволили провести аналіз зміни показників звукоізоляції відносно зміни певних параметрів, а саме, як змінювався показник звукоізоляції при різній товщині зразка з постійним гранулометричним складом гумових гранул і середньою густиною матеріалу панелі, яка варіювалася для різних груп зразків. На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що середня густина істотно впливає на показник звукоізоляції. Проаналізовано вплив факторів на теплоізоляційні властивості огорожувальної конструкцій. Результати експерименту показують, що перероблений каучук може поліпшити теплові властивості конструкції будівлі. Вибір матеріалу залежить від потреб і способу застосування виробів. Визначено, що для всіх зразків наявність в матеріалі виробу дрібних частинок гумової крихти дає найкращі результати. Також встановлено, що значення коефіцієнта теплопровідності зменшується зі зменшенням середньої густини матеріалу панелі.

У четвертому розділі проаналізовано вплив змінних параметрів на фізико-механічні та фізико-хімічні властивості панелей з переробленої гуми.

Проаналізовано вплив факторів на міцність при розтягу. Зразки були протестовані для перевірки загального ефекту і оцінки статистичної моделі, щоб отримати параметри, за допомогою яких можна оцінити очікувану подію залежно від прояву деформації і руйнування матеріалу. Також зразки випробувались для отримання даних модуля пружності для кожної групи зразків. Отримані результати використовувалися для визначення ступеня деформації по відношенню до даного навантаження. Також визначалось, як матеріал реагує та як він поводить себе в цих умовах. Отримані результати дозволяють визначити, як одинична зміна, наприклад, гранулометричного складу (або середньої густини, або кількості клею) впливає на зміну залежності від сили деформації. Встановлено, що при більш низькій густині матеріалу (менше $\rho=750 \text{ кг/м}^3$), найкращі результати досягаються при раціональному розподілу гумових гранул за розмірами. Слід підкреслити, що панелі з більш високим показником середньої густини включають більшу

кількість клею. Тому можливо припустити, що цей параметр, також впливає на кінцеві результати.

Аналізувався вплив основних факторів на модуль пружності. Випробування проводилися на зразках, виготовлених відповідно до DIN 53504-S1. Згідно даного нормативного документу важливо, щоб дотримувався принцип обмеження площі максимум до 80% від пружної площі, який не має входити в зону пластичної деформації. Результати інтерпретувалися для визначення ступеня деформації по відношенню до даного навантаження і того, як матеріал реагує і як він поводить себе в цих умовах. Експериментальні дані були згруповані в три групи відповідно до щільності $\rho=700 \text{ кг/м}^3$, $\rho=900 \text{ кг/м}^3$ і $\rho=1100 \text{ кг/м}^3$. Кожен із зразків також відрізнявся гранулометричним складом гумових гранул та кількістю в'язучого матеріалу. Аналіз результатів показав невеликий відсотковий розрив між ранжируемими зразками за модулем пружності. Спостерігається чітка тенденція, за якою найбільший вплив на формування властивостей надає середня густина матеріалу виробу.

Був проведений аналіз впливу основних факторів на пористість матеріалу панелей з переробленої гуми. Експеримент проводився за нормами EN 993-1: 2018. Аналіз результатів досліджень дозволив встановити, що зразки з гранулометричним складом із дрібних частинок гуми мають найвищу пористість практично у всіх зразків, незалежно від середньої густини матеріалу. Також встановлено, що зразки з гранулометричним складом з великих зерен гуми мають знижену пористість, незалежно від середньої густини матеріалу. Також підтверджено, що пористість матеріалу безпосередньо залежить від величини середньої густини твердої складової виробу: чим вище середня густина, тим нижче пористість матеріалу.

Проведено контроль внутрішніх напружень, що виникають в матеріалі панелі. Встановлено, що зміни розміру зерна гуми в матеріалі можуть бути виміряні у відсотках до та після прикладання навантаження. Було забезпечено порівняння фотографій, зроблених до і після вилучення зерна з

матеріалу (або вивільнення зерна, хоча б по обидва боки), тобто зроблених в однакових умовах. Вимірювання виконували в різних (переважно вертикальних) напрямках. Результати експерименту показали, що в матеріалі панелей з переробленої гуми виникають внутрішні напруження.

Проведене визначення куту внутрішнього тертя гранул та гранульованої ваги переробленої гуми. Тест проводився за допомогою цифрового вимірювання масштабу і обчислення з використанням тангенса кута. Оскільки матеріалу панелей не є в'язким матеріалом, обґрунтуванням був той факт, що при заливці матеріалу в одну точку створюється кінцеве тіло, похідна якого розташована відносно основи, утворюючи певний кут. Цей кут представляє собою кут внутрішнього тертя частинок.

Результати досліджень впроваджені компанією Stas d.o.o (м. Дуго-Село, Хорватія) при монтажі звукоізоляційних панелей в зовнішніх стінах шлюсарного заводу для зниження шуму від будівлі в оточуючому середовищі, а також у навчальному процесі в Одеській державній академії будівництва та архітектури та University Nord (Університет Север, Хорватія).

Ключові слова: гумова крихта, панель, звукоізоляція, теплоізоляція, міцність, пружність, деформації.

ABSTRACT

Crnoja Andjelko. Efficient soundproofing materials for reconstruction of building enclosures. *Qualification scientific work* on the manuscript.

The thesis for candidate degree of engineering science (PhD) in the specialty 192 – Construction and civil engineering. Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. – Odessa, 2021.

The purpose of the work is to increase the insulating properties of the structure through the use of panels of rubber crumb obtained from recycled materials.

The introduction substantiates the choice of research topic, its relevance, shows the relationship of work with scientific programs, plans, topics, formulates the purpose and objectives of research, and provides the provisions of scientific novelty and practical significance of the results.

In ***first section*** is analyzed the state of the problem of sound insulation of enclosing structures. The principles of noise reduction and sound waves are given. A review of the main types of soundproofing materials performed. It is established that all soundproofing materials can be divided according to the basis on which they are made - into materials made on an organic basis and materials made on an inorganic basis.

It is established that sound insulation structures are more effective along with sound insulation materials, as they are designed for a wide frequency range of the sound wave, which has high penetrating properties. Due to the use in sound insulation constructions of materials of different densities and structures, as well as compliance with the rules of tightness and the absence of rigid connections with other enclosing structures, the efficiency increases significantly.

A review of patents and modern methods of sound insulation works was performed. After analyzing the found patents for utility models, scientific articles and works, it was found that the topic of sound insulation is quite relevant. But most of these patents show that sound insulation is performed using drywall, glass

and layering of fibrous materials.

The working hypothesis of researching according to which the panels with smaller density and are made of granules of various fractional structure will possess the greatest sound insulation is formulated. The statement is based on the fact, when sound wave is spreading and encounters an obstacle, then in the case when its length is much less than the obstacle, the phenomenon of reflection of waves will be observed. If the size of the obstacle is much smaller than the wavelength, the phenomenon of diffraction will be observed: the waves envelop the obstacle, entering the area of geometric shadow. In cases when the size of the obstacle can be compared with the wavelength, the laws of spreading of the sound wave become more complex, because there is both a certain reflection and diffraction. The obstacle from which the waves are reflected is any boundary at which the acoustic resistance is changes. When a sound wave falls on the boundary between two media, part of its energy passes into the energy of the reflected wave, and part penetrates into another medium. A sound wave spreading in a medium reaches the boundary between this medium and another medium. At the same time there are arise reflected and refracted waves. In our case, such media are both granules with a binder and a pore space.

The method of research is described and the characteristics of the used materials are given. The main raw material for the production of panels in the researching it is reused car tires. It is established that the material can be used in sound insulation structures, and as an independent material for sound insulation. To make the samples used during the experiment, a method was chosen in which, during the processing of tires, it was heated, then divided into metal, textile and rubber components, and then the rubber was crushed to the required fraction. Three fractional combinations of granules were used for the experiment: 0,5-2,0 mm; 2,0-3,5 mm; 35% (0,5-2,0 mm) and 65% (2,0-3,5 mm).

Second section provides a general sequence of studies. At all stages the influence of variable parameters on the values of the studied properties is investigated.

First variable parameter is the thickness of the panel, for this work it was in three sizes: 10, 15 and 20 mm. The second variable parameter was the density of the panel, depending on the indicators of which, the test samples were classified as follows: about 600 kg/m³, about 700 kg/m³, about 900 kg/m³. The third variable parameter is the particle size distribution of the mixture, which varied as follows: 0.5-2 mm; 2-3.5 mm; 0.5-2 mm (35%) + 2-3.5 mm (65%).

At the same time, sound insulation measurements were performed for different frequency ranges: for low (up to 500 Hz), medium (500-2000 Hz) and high (2000-5000 Hz). The measurement was performed so that the sound power was approximately 105 dB and radiated for 60 seconds in two stages.

In *third section* was analyzed the influence of variable parameters during experiments on the sound insulation in enclosing structures. A total of 27 samples of different thickness, weight and particle size distribution were made.

While researching, the influence of the frequency and particle size distribution of the mixture on the value of the sound insulation index was analyzed. It was also shown the variation of the amount of sound insulation depending on the thickness of the wall panel, which was made using rubber crumb. The methods of obtaining and the range of applications in the modern industry of rubber crumb as a material for grinding worn tires, which is one of the most tonnage polymer wastes. The structure of installation of sound insulation panels during the experiment is illustrated. The results were compared and presented in the diagrams for each group separately.

The test results allowed analyzing the change in sound insulation performance relative to the change of certain parameters. Namely, how did the sound insulation index change at different sample thicknesses with constant particle size distribution and density, which varied in different groups and samples.

Based on the results obtained, we can conclude that the specific gravity significantly affects to the sound insulation. We mean that at a lower density there is a condition under which the thickness of the panel does not have a significant impact on the amount of sound insulation.

The third section also analyzes the influence of factors on the thermal insulation properties of enclosing structures. The results of the experiment show that recycled rubber can improve the thermal properties of the building structure. The choice of material depends on the needs and method of application. For all samples, the presence of fine particles gives the best results. It is also found that the value of the thermal conductivity decreases with decreasing average density.

In *fourth section* was analyzed the influence of variable parameters on the physico-mechanical and physico-chemical properties of recycled rubber panels. In the first stage of the fourth section, the influence of factors on tensile strength is analyzed.

The samples were tested to verify the overall effect and evaluate the statistical model to obtain parameters that can estimate the expected event in terms of deformation and fracture of the material. The samples were also tested to obtain modulus of elasticity for each group of samples. In the test, the tensile strength was checked so that the resistance was determined by applying force. The results are considered to determine the degree of deformation in relation to this load. It was also determined how the material reacts and how it behaves in these conditions.

The obtained results allow determining how a single change, for example, the particle size distribution (or density, or amount of glue) affects the change depending on the force of deformation.

The influence of the main factors on the modulus of elasticity was analyzed. The tests were performed on samples manufactured in accordance with DIN 53504-S1. According to this normative document, it is important to adhere to the principle of limiting the area to a maximum of 80% of the elastic area. It should not enter the zone of plastic deformation.

The results are interpreted to determine the degree of deformation in relation to a given load and how the material reacts and how it behaves under these conditions.

Analysis of the results shows a small percentage gap between the ranked samples by modulus of elasticity. There is a clear trend in which the specific gravity predominates.

The influence of the main factors on the porosity was analyzed. The experiment was carried out according to the norms EN 993-1: 2018.

Analysis of the research results allowed us to establish that the samples with particle size distribution of fine particles have the highest porosity in almost all samples, regardless of the density of the material. It was also found that samples with a particle size distribution of large grains have a reduced porosity regardless of the density of the material.

It is also confirmed that the porosity of the material directly depends on the mass of the solid component of the panel.

The control of the internal voltage of the panel was performed. It is established that changes in the grain size of the material can be measured as a percentage before and after application of the load. A comparison of photographs taken before and after the extraction of grain from the material (or the release of grain, at least on both sides), taken under the same conditions, was provided. Measurements were performed in different (mostly vertical) directions. The results of the experiment show that there are internal stresses in the material.

The stage is the analytical determination of the angle of internal friction of the granules and the granular weight of the processed rubber. The test was performed using digital scale measurement and calculation using the angle tangent. Because it is a non-viscous material, the fact was used that when pouring the material at one point, a conical body is created, the derivative of which is located relative to the base, forming a certain angle. This angle represents the angle of internal friction of the particles.

The research results were implemented by the company Stas d.o.o (Dugo Selo, Croatia) during the installation of soundproof panels in the outer walls of the locksmith's to reduce noise from the building in the environment, as well as in the educational process at the Odessa State Academy of Construction and Architecture and University Nord (University North, Croatia).

Keywords: rubber crumb, panel, sound insulation, thermal insulation, strength, elasticity, deformations.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Попов О. А., Гострик А. Н., Црноя А. Аналіз теплоізоляційних властивостей монолітного перекриття із застосуванням гумової крихти, як конструктивного шару. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. Вип. 73. С. 98–104.

2. Попов О. А., Гострик А. Н., Црноя А. Вплив діапазону частоти і товщини панелі із застосуванням гумової крихти на значення індексу звукоізоляції. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. Т. 26. № 1. С. 6–12.

3. Meneulyuk A., Popov O., Hostryk A., Crnoja A. Analysis of the change of sound insulation index from the range of frequency, density and thickness of the panel with the use of rubber crumb. *Науковий вісник будівництва*. 2019. Т. 96. № 2 (2). С. 353–358.

4. Попов О. А., Гострик А. Н., Црноя А. Вплив щільності панелі з застосуванням гумової крихти на показник звукоізоляції. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 4. С. 57–63.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:

5. Crnoja A., Kos Z., Popov O. Application of a Logarithmic Model on a Stress – Deformation Interdependence of the Recycled Tires. *Tehnički Glasnik*. 2019. Vol. 13. № 3. P. 180–183.

6. Crnoja A., Kersh V., Popov O., Dovhulia A. Laboratory Studies of The Heat-Insulating Properties of the Panels that Made of Recycled Rubber. *Key Engineering Materials*. Vol. 864. P. 66–72.

7. Crnoja A. Panels made from recycled tire-application of linear model to test the tensile force. *Croatian Regional Development Journal*. 2020. Vol. 1. № 1. P. 1–15.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Попов О.О., Гострик А.Н., Црноя А. Аналіз теплотехнічного розрахунку самоущільнюючої бетонної суміші з гумовою крихтою. *Актуальні проблеми інженерної механіки* : мат-ли V-ї Міжнар. наук.-практ. конф., м. Одеса, 22-25 травня 2018 р. Одеса, 2018. С. 191–193.

9. Попов О.О., Гострик А.Н., Црноя А. Вплив щільності панелі з застосуванням гумової крихти на показник звукоізоляції. *Структурутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і констрок* : зб. тез наук. конф., м. Одеса, 23-24 квітня 2019 р. Одеса, 2019. С. 79–80.

10. Попов О. О., Гострик А.Н., Црноя А. Вплив діапазону частоти і товщини панелі із застосуванням гумової крихти на значення індексу звукоізоляції. *Експлуатація і реконструкція будівель і споруд* : мат-ли III-ї міжнар. наук.-практ. конф., м. Одеса, 26-28 вересня 2019 р. Одеса, 2019. С. 130.

11. Єрмакова С., Срноја А. Теплоізоляційні можливості гумової крихти на засадах бережливого будівництва: *75-ї наук.-техн. конф. проф.-викл. складу академії* : зб. тез наук. конф., м. Одеса, 16-17 травня 2019 р. Одеса, 2019. С. 282.