

12. **Тімченко Р.О.** Проектування і розрахунок урівноважуючих плитних фундаментів: Навч. посібн. для студентів будівельних спеціальностей. – Кривий Ріг, Мінерал, 2005. □ 82 с
13. **Тімченко Р. А., Кришко Д. А.** Работа плитных фундаментов-саморегуляторов (ПФС) на неравномерно-деформируемом основании // Современные проблемы строительства. – Донецк, 2010. – № 9. С. 173-177.
14. **Ильичёв В. А., Петрухин В. П., Шейнин В. И.** Принципы проектирования оснований и фундаментов высотных зданий, учитывающие их геотехнические особенности // Современное высотное строительство / ГУП «ИТЦ Москомархитектуры». – М., 2007. – С. 255-261.
15. **Федоровский В. Г., Колыбин И. В.** Расчеты и проектирование оснований и фундаментов // Современное высотное строительство / ГУП «ИТЦ Москомархитектуры». – М., 2007. – С. 255-261.
16. **Hanisch J., Katzenbach R., Konig G.** Kombinierte Pfahl-Plattengrundungen. Ernst&Sohn. – 2002. – 222 p.
17. **Тер-Мартиросян З. Г., Теличенко В. И., Королев М. В.** Проблемы механики грунтов, оснований и фундаментов при строительстве многофункциональных высотных зданий и комплексов // Вестник МГСУ. – 2006.– №1.– С.18–27.
18. **Шашкин К. Г.** Расчет напряженно-деформированного состояния основания фундаментов и здания с учетом их взаимодействия // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2003. – №4. – С. 15–25.
19. **ДБН В.2.2-41:2019.** Висотні будівлі. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд, 2019. – 59 с.
20. **ДБН В.1.2-12-2008.** Будівництво в умовах ущільненої забудови. Вимоги безпеки. – К.: Мінрегіонбуд, 2008. – 34 с.
21. **ДБН В.2.2-15:2019.** Житлові будинки. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд, 2019. – 42 с.
22. **ДБН В.2.1-10:2018.** Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення – К.: Мінрегіонбуд, 2018. – 40 с.

Рукопис подано до редакції 06.04.2021

УДК 622.1

М.М. КОНДРАТЕНКО, ст. викл., С.Г. САВЕЛЬЄВ, д-р техн. наук, доц.  
Криворізький національний університет

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ В ПРОЦЕСАХ ПІДГОТОВКИ МЕТАЛУРГІЙНОЇ СИРОВИНИ ДО ПЕРЕДІЛУ

**Метою роботи** є дослідження можливості застосування і ефективності ультразвукової обробки в процесах підготовки металургійної сировини до переділу.

Розглянуто відмітні особливості ультразвукових хвиль, явища стабільної та нестабільної кавітації, умови їх виникнення. Зазначено про необхідність процесів огрудкування тонких концентратів залізорудних матеріалів для забезпечення початкової міцності агрегату дисперсних часточок після глибокого збагачення і важливості застосування зміцнювальних домішок в шихту огрудкування. В якості останніх здебільшого використовують бентоніти, які задля поліпшення їх властивостей піддають хімічній або механічній активації.

Відзначено широке розповсюдження використання ультразвукових технологій у народному господарстві взагалі і наявність вданих методик ультразвукової обробки бентонітів з метою покращення їх в'язучих властивостей зокрема. Ця обробка фактично є різновидом механічної активації. Проаналізовано можливі механізми впливу ультразвукової обробки на зміну властивостей оброблювального матеріалу. Зроблено висновок про можливість отримання позитивного результату ультразвукової активації бентонітів, які використовують при огрудкуванні металургійної сировини.

**Методи дослідження.** В роботі використані загальнологічні методи наукового дослідження – аналіз і синтез, аналогія, узагальнення.

**Наукова новизна роботи.** На основі проведеного літературного аналізу встановлено, що за відповідних параметрів обробки застосування ультразвуку може дати позитивний ефект у покращенні в'язучих властивостей бентоніту, як зміцнювальної домішки в шихту огрудкування.

**Практична значущість** роботи полягає у необхідності розробки та застосуванні ультразвукових, кавітаційних, бічастотних методів впливу на металургійну шихту в процесах її підготовки до огрудкування.

**Результати роботи** свідчать про те, що застосування ультразвуку за відповідних параметрів обробки може дати позитивний ефект. Подальше проведення досліджень доцільно продовжити у напрямку вивчення прив'язки певних видів бентоніту до режимних параметрів його обробки ультразвуком для використання в якості зміцнювальних домішок у шихту огрудкування.

**Ключові слова:** бентоніт, диспергування, ультразвук, кавітація, монтморилоніт, обкотиші, міцність

doi: 10.31721/2306-5435-2021-1-109-91-98

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** З початку промислового виробництва згрудкованої сировини для металургійного переділу досить гостро стоїть питання

покращення її міцнісних та термостійких властивостей. За останні 60-70 років було запропоновано безліч варіантів заміни існуючих домішок або покращення їх властивостей.

З одного боку існує проблема пошуку підвищення ефективності використання такої домішки у шихту огрудкування, як бентоніт. З іншого боку – відоме широке використання ультразвуку в самих різноманітних сферах народного господарства в якості інтенсифікатора технологічних процесів та засобу покращення властивостей речовин. Пошук шляхів реалізації поєднання цих двох передумов на сьогоднішній день є актуальним завданням в галузі підготовки сировини до металургійних процесів.

**Аналіз дослідження публікацій.** Вивчення звуку та його властивостей розпочалося з давніх часів. Піфагор, Аристотель, Ф. Савар, Д. Джоуль, П. Кюрі, Ж. Кюрі, Ф. Гальтон, П.Н. Лебєдев, П. Ланжевен, Г.В. Пірс, Р. Вуд, К. Дуссик, Л.Д. Розенберг – ось далеко не повний перелік імен вчених, які зробили значний внесок у розвиток акустики – науки про звукові коливання [1]. У кожному епоху немало уваги приділялося вивченню звукових явищ та можливості їх практичного застосування. І зараз, у ХХІ сторіччі майже не залишилось галузі людської діяльності, де б не застосовувався ультразвук. Фармацевтика, медицина, ветеринарія, біологія, географія, екологія, косметологія, агрономія, тваринництво, сільське господарство, хімічна та харчова промисловість, машино- та приладобудування, метало- та матеріалознавство, металургія, збагачення корисних копалин, гальванотехніка, нанотехнології, рибна та легка промисловість, автоматизація та будівництво – у всіх цих галузях можливо застосування ультразвукових приладів та технологій.

Ультразвук – хвилеподібний розповсюджуваний коливальний рух часточок середовища, що характеризується низкою відмітних особливостей в порівнянні з коливаннями чутного діапазону [2]. У будь-якому суцільному середовищі – газі, рідині, твердому тілі – в разі виведення молекул чи атомів із положення рівноваги, саме пружні сили, діючі на них з боку сусідніх часточок, будуть повертати їх у положення рівноваги. При цьому часточки будуть виконувати коливальні рухи, які розповсюджуватимуться у вигляді пружних коливань, і у суцільному середовищі являтимуть собою хвилеподібний процес. Через наявність у будь-якому середовищі прагнення до зменшення вільної енергії звукові коливання згасатимуть після одноразового виведення із стану рівноваги частинки середовища. Тому для виникнення та існування у часі будь-яких хвильових процесів потрібне постійне джерело (випромінювач) – збудник коливань з потрібними параметрами частоти та інтенсивності.

За загальноприйнятою класифікацією коливання із частотою від 0 до 20 Гц називають інфразвуковими; діапазон від 20 Гц до  $16 \div 20$  кГц утворює чутні для людського вуха звуки; вище цієї частоти розташовано діапазон ультразвукових коливань, а коливання з частотою понад  $10^8$  Гц отримали назву гіперзвуку [3]. Верхня межа частоти залежить від матеріального пружного середовища, в якому коливання можуть розповсюджуватись лише за умови, що довжина хвилі буде більше міжатомної відстані. На основі досліджень встановлено, що існує ультразвук з частотою понад 100 МГц. Коливання ж з більшою частотою згасають настільки, що поглинаються безпосередньо у поверхні випромінювача. На практиці застосовують ультразвукові коливання з частотою до 25 МГц, бо коливання з більшими частотами можуть розповсюджуватись лише у кристалах [4, 5].

Розглянемо низку відмітних особливостей, які має ультразвук [2].

Довжина будь якої хвилі  $\lambda$  обернено пропорційна частоті коливань  $f$ , а швидкість хвилі  $v$  дорівнює їх добутку:  $v = \lambda f$ . Тому у порівнянні зі звуковими коливаннями, ультразвук, який має набагато більшу частоту  $f$ , за однакової швидкості розповсюдження  $v$  відрізняється набагато коротшою довжиною хвилі  $\lambda$ . Ультразвукові коливання у різних середовищах з довжиною хвилі  $1 \div 10$  мм за своїми властивостями аналогічні світловим променям. Вони також можуть заломлюватись та віддзеркалюватись у відповідності до законів оптики. Це дозволяє не лише фокусувати коливання, але й формувати направлене випромінювання у потрібному напрямку та зосереджувати його в потрібному об'ємі.

Розповсюдження ультразвуку можливе у будь-яких матеріальних середовищах незалежно від прозорості, щільності, електропровідності, магнітних властивостей, тощо. Крім того, сучасні технології найбільш часто реалізують гетерогенні процеси між двома чи більшою кількістю неоднорідних середовищ (рідина – газ, рідина – рідина, рідина – тверде тіло, тощо). Але саме в рідких середовищах вплив ультразвукових технологій має найбільш високу ефективність через

значно більший, ніж у газів, питомий хвильовий опір (для води в 3500 разів більше, ніж для газів). Тому за однакових параметрів (амплітуда коливань) із ультразвукової системи найбільша акустична потужність випромінюється саме у рідину [6].

Потужність хвилі пропорційна квадрату частоти, і тому в ультразвукових коливаннях має дуже великі значення – сягає сотень кіловат; інтенсивність (енергія, що розповсюджується через одиницю площі за одиницю часу) також величезна –  $1 \div 1000 \text{ Вт/см}^2$ . За такої інтенсивності ультразвукової хвилі енергія механічних коливань, розповсюджуваних всередині матеріальних тіл, дуже велика. Перепади звукового тиску перевищують десятки МПа та мають знакозмінні значення: стиснення змінюється розрідженням і навпаки – від 20 000 до 100 000 000 разів за секунду. При цьому часточки середовища коливаються з малими амплітудами (частки мікрона) і величезними прискореннями – близько  $10^5 \cdot g$ .

У рідинах завдяки отриманому порушенню однорідності середовища у фазі розрідження в найбільш слабких місцях починається виділення розчинених тут газів з утворенням бульбашок, які стабілізуються моношаром органічних речовин. Бульбашки спочатку лінійно, а, зі збільшенням інтенсивності хвиль, не лінійно коливаються з частотою ультразвуку відносно свого рівноважного радіусу, тому самі стають джерелами ультразвукових коливань. Це явище називають стадією стабільної кавітації. З подальшим збільшенням інтенсивності ультразвукового джерела утворюються швидко зростаючі парогазові бульбашки, що миттєво скорочуються в об'ємі та лускаються – настає колапс. Ця стадія називається стадією нестабільної кавітації, яка характеризується розігрівом парогазової суміші у бульбашках до  $8\,000 \div 12\,000 \text{ }^\circ\text{K}$ , створенням тисків понад 10 000 атм, високою радіальною швидкістю стінок бульбашки, більшою за швидкість звуку (340 м/с). На місті кульки, що луснула, утворюється ударна хвиля, подібна до точкового вибуху [8-10], виникає мікроточковий електричний розряд високої напруги (десятки мільйонів вольт). Все це породжує швидкі мікропотоки та течії. Ультразвукова кавітація забезпечує максимальний енергетичний вплив як на власне рідини, так і на тверді тіла у них [7].

В основу застосування ультразвуку покладено можливість введення всередину речовини величезних енергій, що дозволяє підвищувати ефективність безлічі різних технологічних процесів [11], створювати нові матеріали, отримувати нові речовини, вирішувати багато питань технологічного контролю і вимірів.

Так, в роботі [12] виконано детальний огляд методів переробки корисних копалин із застосуванням ультразвукових коливань. При переробці корисних копалин ультразвукові коливання використовують для руйнування мінеральної речовини і поверхневих плівок (при подрібненні і дезінтеграції мінералів), інтенсифікації процесу магнітної сепарації, флотації, обезводненні та сушці продуктів збагачення.

Використання ультразвуку для подрібнення і диспергування мінералів вважається особливо перспективним тоді, коли необхідно отримувати невеликі кількості матеріалу високої дисперсності або подрібнювати дорогі продукти. Процес ультразвукового подрібнення мінералів відбувається в основному за рахунок ерозії кавітації [9].

Кавітаційні процеси прискорюють процеси дезінтеграції та диспергування мінералів, емульгування флотреагентів і деструкції адсорбційних шарів реагентів, які знаходяться на поверхні часточок концентратів, інтенсифікують процеси очищення поверхні рудних частинок від плівок і налиплих забруднень, підвищують швидкість дифузії рідкої частини пульпи у пори та тріщини, що утворюються на поверхні мінеральних плівок завдяки кавітаційному руйнуванню [13].

Під дією потужного ультразвукового випромінення в рідині виникають акустичні потоки, які інтенсивно перемішують пульпу, зменшують товщину ламінарного шару біля кордону з твердими тілами і сприяють усуненню дифузійних обмежень. Цей процес відіграє велику роль при ультразвуковому очищенні поверхні рудних часток від забруднень мінерального характеру [14].

При флотації мінералів у воді, заздалегідь обробленій ультразвуком, підвищується витягання мінералів в пінний продукт в порівнянні з флотацією без попередньої обробки води [15].

У зв'язку із залученням до сфери металургійного переділу бідних залізних руд, що заздалегідь піддаються збагаченню, залізорудний концентрат, особливо глибокого збагачення, є дрібним матеріалом, непридатним для безпосереднього проплавлення в доменних печах [16]. Згрудкування – обов'язкова стадія підготовки шихти при виробництві обкотишів, призначена для забезпечення початкової міцності агрегату дисперсних часточок [17]. Згрудкування пиловатих залізних руд і тонких концентратів перед доменною плавкою дозволяє суттєво покращити тех-

ніко-економічні показники роботи доменних печей, збільшити їх продуктивність. В наш час промисловістю найчастіше використовуються два методи згрудкування: агломерація залізних руд і концентратів і виробництво залізородних обкотишів з концентратів [18]. Спікання тонких концентратів магнітної сепарації та флотації на агломераційних стрічках викликає зниження продуктивності установок і отримання низькоякісного агломерату. Тонкий концентрат навіть після попереднього огрудкування створює значний опір проходженню газів, що примушує працювати з низьким шаром шихти на стрічці за мінімального розвитку регенерації тепла і за низької вертикальної швидкості спікання. Надмірна тонкість концентратів, яка є недоліком для агломерату, виявляється їх великою перевагою при огрудкуванні. Найбільш міцні обкотиші може бути отримано саме з дуже тонких концентратів [19].

Сирі обкотиші повинні мати достатню міцність для запобігання деформації і руйнуванню під час транспортування до обпалювального агрегату та термостійкістю, тобто властивістю не руйнуватися під час обпалювання. Для підсилення цих властивостей до шихти перед огрудкуванням вводять домішки [18].

За своїм складом зміцнювальні домішки можуть бути мінеральними (бентонітові глини, гашене вапно, крейда, хлористий кальцій, хлористий натр, сульфат заліза, залізні та марганцеві глинисті руди) і органічними (лужно-спиртова барда, торф, соєва мука, крохмаль, тощо) [20].

У промисловому виробництві обкотишів в якості зміцнюючих домішок використовують головним чином бентоніти – глини, що відрізняються тонкою дисперсністю і великою спроможністю набрякати при зволоженні, збільшуючись у об'ємі у 15÷20 разів. Для збільшення міцності обкотишів перед орудкуванням у шихту вводять 0,5÷1,5 % цієї глини. Вибір бентоніту зумовлений його властивістю утворювати гелі з надзвичайно розвиненою питомою поверхнею (600÷900 м<sup>2</sup>/г), яка приблизно у 7 разів більша за поверхні часточок інших сортів глини [18]. Під дією розклинювального ефекту молекул води бентоніт розпадається на дрібні часточки, що сильно гідратуються, завдяки чому об'єм бентоніту зростає у вищезазначену кількість разів. Заповнюючи простір між рудними часточками, колоїдизований бентоніт суттєво підвищує зчеплення в об'ємі концентрату [21]. Бентоніт збільшує пористість сирих обкотишів, що сприятливо відбивається на швидкості видалення вологи під час сушки обкотишів без зниження їх міцності.

Найбільшу гідрофільність, пластичність, водонепроникність і властивість набрякати мають глини з одновалентними катіонами – лужні натрієві та калієві бентоніти. Вони набрякають у 10 разів сильніше за кальцієві. У водних розчинах лужні бентоніти утворюють 70÷90 % колоїдних часточок розміром менше 0,015 мм, а лужноземельні – лише 30÷40 %.

Відома процедура хімічної активації природних лужноземельних бентонітів, яка полягає в обробці їх лужними розчинами, завдяки чому вони перетворюються в штучні лужні бентоніти. Це відбувається завдяки властивості глинистих мінералів віддавати у водний розчин позитивно заряджені іони замість поглинених катіонів. Ця реакція іонного обміну протікає в еквівалентних кількостях і в більшості випадків обернена [20].

В той же час відомі та широко використовувані на практиці механічні методи активації бентонітів, під час яких активність їх часточок різко збільшується. Класичним прикладом такого впливу є тонке здрібнення, шліфування та помел. В роботі [22] таким чином оброблялися Хакаські бентонітові глини: БП1Т<sub>1</sub> – бентоніт Чорногорського родовища, активований содою за фабричною технологією на ОАО «Хакбент» та БМ2Т<sub>2</sub> – бентоніт Чорногорського родовища в природному стані (з кар'єру). Після активації, яка відбувалася в енергонапруженому планетарно-відцентровому млині АГО-2, вміст часточок з розміром < 1мкм збільшився на 25 %. У своїх часточках матеріал «запасає» енергію, що надходить до нього під час механічної активації. Кількість цієї енергії залежить від природи і потужності діючих на нього сил. В статті [23] зазначено про велику увагу, що приділялась вивченню структурно модифікованих глинистих мінералів після механічної деформації за допомогою планетарного шарового млина, оскільки це викликає фізичні та хімічні зміни в оброблених матеріалах. В роботі [24] повідомлялося про вплив зменшення розмірів часточок монтморилонітів на їх властивості.

Як було показано вище, аналогічний вплив на гетерогенну систему має також і ультразвукова обробка. Збільшуючи міжфазну поверхню реагуючих елементів, ультразвукові коливання забезпечують надтонке диспергування, яке не реалізовується іншими способами. Це є одним з механізмів інтенсифікації процесів в рідких середовищах. Кавітація, яка виникає під дією коли-

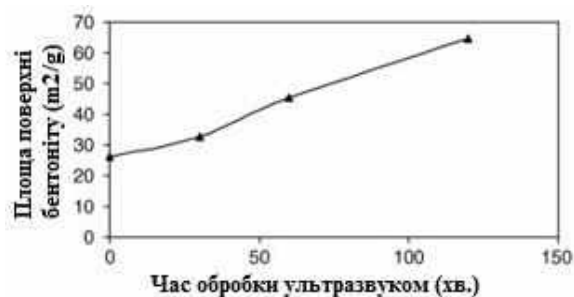
вань в рідині, та найпотужніші мікропотоки, що її супроводжують, звуковий тиск і звуковий вітер впливають на пограничний шар і «змивають» його. Таким чином, усувається опір перенесенню реагуючих речовин та інтенсифікується технологічний процес. Гетерогенні процеси ультразвукового емульгування (диспергування рідин в рідинах) і диспергування (отримання тонкодисперсних суспензій) пов'язані зі збільшенням поверхні взаємодії і тому лежать в основі інтенсифікації безлічі інших процесів [2].

Бетоніти використовують у дуже широкому спектрі галузей народного господарства: виноробство та виробництво соків і олій (оклеювання для висвітлення вин та соків, екстракція олій); сільське господарство (меліорація та адсорбція при проведенні польових робіт); ливарне виробництво (в'язучий елемент для приготування формувальних та стрижневих сумішей, у проти пригарних покриттях); виготовлення речовин побутової хімії (поглинаючі властивості та домішки до миючих засобів для пом'якшення води, текстильних виробів); земляні роботи (зміцнення стінок свердловин і траншей); корми для тваринництва (харчові домішки, що збільшують показники); екологічні програми (для очищення стічних і оборотних вод, для гідроізоляції водойм, для очищення питної води, для адсорбції забрудників) [25].

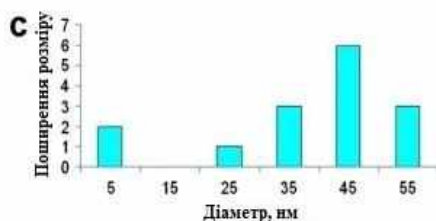
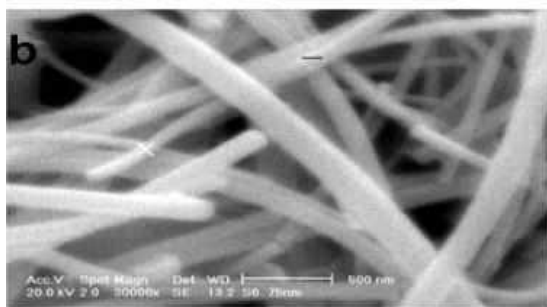
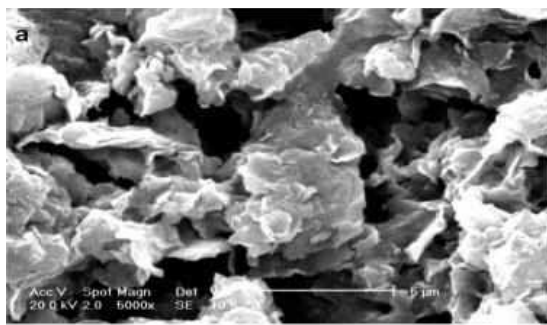
**Постановка задачі.** Проаналізувати і оцінити можливість ефективного використання ультразвуку для покращення в'язучих властивостей бентоніту, використовуваного у якості зв'язуючої домішки в процесах підготовки сировини до металургійного переділу.

**Викладення матеріалу та результати.** В роботі [23] вивчався впливу часу обробки ультразвуком на розмір часток і колоїдну стабільність сирового бентоніту з Саудівської Аравії. Зі збільшенням часу обробки ультразвуком від 0 до 120 хв. збільшувалася питома поверхня зразків бентоніту з 26,8 до 64,6 м<sup>2</sup>/г (рис. 1).

**Рис. 1.** Питома поверхня бентоніту як функція часу обробки ультразвуком



В роботі [26] було розроблено звукохімічний метод, за яким виготовлено нанобентоніт з новою морфологією нанодропинок. Зразок бентоніту було отримано від Merck. Суспензія бентоніту готувалася в етанолі й оброблялася високо інтенсивним ультразвуковим зондом, зануреним безпосередньо у розчин, з різною потужністю на протязі 0,5, 1, 2, 4 годин. Ультразвук викликає хімічні зміни через явища кавітації, які включають утворення, зростання і миттєве імпульсивне згортання бульбашок в рідині, що може створювати локальні гарячі точки з температурою приблизно 5 000 °С, тиском приблизно 500 атм і тривалістю декілька мікросекунд. Багатохвильовий ультразвуковий генератор (Sonicator 3000; Misonix, Inc., Farmingdale, Нью-Йорк, США), оснащений перетворювачем/приймачем і титановим осцилятором (рупором) діаметром 12,5 мм, працюючий на 20 кГц з максимальною вихідною потужністю 600 Вт, використовувався для створення ультразвуку при 25 °С. Найкраща морфологія і розміри часточок визначалися у зразка, який оброблявся на протязі 4 годин з потужністю ультразвуку 50 Вт. На рис. 2 показано зображення зі скануючого електронного мікроскопу (SEM) контрольного зразка бентоніту, отриманого за тих же температурних умов, але лише при перемішуванні та без ультразвукової обробки (рис. 2а) та нанобентоніту, отриманого методом ультразвукового руйнування (рис. 2б). Гістограма розмірів часток нанобентоніту (рис. 2с) показує, що розмір часток знаходиться в діапазоні від 5 до 50 нм. На зображенні, отриманому з електронного мікроскопу, що просвічує (ТЕМ), нанобентоніт має дротяну або волокнисту структуру і дуже ефективно диспергує у воді (рис. 3). Проте, площа поверхні у нанобентоніту виявилася меншою (11,08 м<sup>2</sup>/г), ніж у контрольного зразка бентоніту (24,08 м<sup>2</sup>/г), а середній діаметр пор – більшим (2,34 нм), ніж у не обробленого зразка (1,97 нм). Автори пояснюють це набагато меншою кількістю пор у нанорозмірному бентоніті. Для вивчення термічної стабільності нанобентоніт було прожарено за температури 800 °С на протязі 4 годин, після чого зразок іще раз досліджували. Авторами було зроблено висновок про те, що прожарювання, мабуть, призводить до повного розкладання і руйнування з'єднання, а також до змін як морфології, так і наноструктури.



кання глини не було повним впродовж тримісячного періоду витримки. В результаті ультразвукової обробки тактоїди розшарувалися, а набрякання часток глини стало ефективнішим.

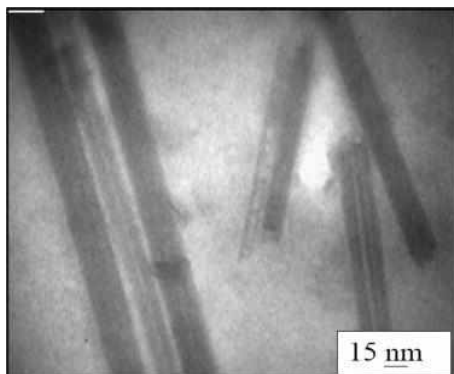


Рис. 2. SEM-фотографії: *a* – об'ємний бентоніт; *b* – нанобентоніт; *c* – гістограми розмірів часток нанобентоніту

Вивчали пластинчасті частки мікронного і субмікронного розмірів товщиною < 10 нм отримані шляхом ультразвукової обробки суспензій термічно спученого вермикуліту у воді та у перекису водню на протязі < 12 годин [27]. Використання  $H_2O_2$  давало більш дрібні часточки, ніж  $H_2O$ , але в обох середовищах відшаровування та зменшення розмірів часточок спостерігалось лише після однієї години обробки ультразвуком.

В роботі [28] описано водні суспензії натрієвого монтморилоніту (1,80 і 0,60 мас. %), які витримувалися впродовж трьох місяців і оброблялися ультразвуком впродовж різного часу. Після тривалої обробки ультразвуком в концентрованій суспензії спостерігалось поступове збільшення розміру найбільших часток, збільшення середньоарифметичного і медіанного розміру часток, а також зменшення відсоткового вмісту часток діаметром менше 1,5 мкм. З іншого боку, у розбавленій суспензії все відбувалося абсолютно навпаки. У розбавленій суспензії обробка ультразвуком призводила до утворення дрібних набряклих часток в результаті відшаровування великих набряклих тактоїдів. У концентрованій суспензії набря-

Рис. 3.ТЕМ-зображення нанобентоніту

В інституті прикладної фізики АН Молдови для застосування глин Молдовського видобутку для оклеювання вин та соків з метою їх висвітлення і депротейнізації було розроблено технологію виготовлення активованої високодисперсної суспензії бентоніту [29]. Експерименти проводились на чотирьох різних дослідних установках, але кращі результати були отримані на бічастотної установці. Дослідження [30] підтверджують доцільність застосування бічастотної кавітації. Одночасна дія вібрацій різних частот на фізико-хімічні процеси обробки значно збільшує ефек-

тивність дій кавітацій. Досліди [29] виконувались на зразках бентоніту з первинними розмірами часток ~ (200 ÷ 300) мкм. Концентрація твердої фази в суспензії бентоніту складала 5 %. Розміри часток і міру дисперсності суспензії визначали методом електронної мікроскопії. При диспергуванні бентоніту ультразвуковою кавітацією найбільш суттєвий вплив чинить тривалість обробки. Її збільшення супроводжується інтенсивним зменшенням розмірів часток бентоніту до досягнення тонкої постійної дисперсії (починаючи з 12 хв. обробки) незалежно від використовуваних амплітуд коливальних. Електронно-мікроскопічний аналіз показав, що в оброблюваній суспензії містяться частки різних розмірів. Проте для досягнення 100 % гомогенної тонкої суспензії потрібна амплітуда коливальних вище 20 мкм та тривалість обробки більше 12 хв. Основний недолік ультразвукового методу полягає в тому, що він не дозволяє обробляти бентоніт у великих об'ємах. Метод гідродинамічної та гідроакустичної кавітації дозволяє диспергувати і гомогенізувати рідину і тверді частки у великих кількостях. Згідно з аналізом отриманих результатів з підвищенням тривалості обробки розміри часток бентоніту зменшуються: з гідродинамічним апаратом – до 35÷40 мкм, з пульсуючим ротором – до 8÷15 мкм. Результати дослідження диспергування бентоніту під впливом гідроакустичної бічастотної кавітації представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Розміри часток бентоніту залежно від тиску і тривалості дії гідроакустичної бічастотної кавітації

Тиск в зоні гідроакустичної кавітації $P$ , атм	Тривалість дії гідроакустичної кавітації $\tau$ , хв.					
	Контроль	10	20	30	40	50
	Розмір часточок $d$ , мкм					
4	200÷250	52	18	10	6	5
5	200÷250	36	12	5	4	3
6	200÷250	28	7	3	0,5	0,4
7	200÷250	24	5	1,4	0,4	0,4
8	200÷250	22	4	1,0	0,4	0,4

Вивчення відсоткового вмісту часток з розміром (0,3 ÷ 2,0) мкм залежно від тиску рециркуляції і часу обробки під впливом гідроакустичної бічастотної кавітації свідчить, що однорідна за розмірами часток суспензія складає близько 100 % при тиску 7÷8 атм і тривалості обробки (40÷50) хв. (табл. 2).

Таблиця 2

Відсоткова залежність розмірів часточок, переважаючих в суспензії бентоніту після кавітаційної бічастотної обробки

Тиск в зоні бічастотної обробки $P$ , атм	Тривалість кавітаційної обробки $\tau$ , хв.				
	10	20	30	40	50
	Максимальний розмір часток $d$ , мкм відсотковий вміст часток з розмірами в межах (0,3÷2,0) мкм				
4	$\frac{52 \div 5}{6}$	$\frac{18 \div 3}{22}$	$\frac{10 \div 1}{40}$	$\frac{6 \div 0,5}{55}$	$\frac{5 \div 0,5}{58}$
8	$\frac{22 \div 2}{15}$	$\frac{4 \div 1}{49}$	$\frac{2,0 \div 0,5}{87}$	$\frac{1,6 \div 0,4}{96}$	$\frac{0,5 \div 0,3}{98}$

Бічастотне кавітаційне диспергування дозволяє зменшити витрату бентоніту при освітленні вина в 6 разів. Отримана суспензія складається з води, нанорозмірних газових бульбашок і твердих часток бентоніту, площа контакту яких з продуктами обробки на 2÷3 порядки вище, ніж при класичному методі.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Проведений аналіз свідчить про перспективність застосування ультразвукового методу активації зв'язуючої дії бентоніту при огрудкуванні тонко дисперсних металургійних шихт. У всіх досліджених джерелах інформації застосування ультразвукових коливань давало неабиякі результати зі зміни морфологічних та фізичних властивостей оброблюваних матеріалів. Різниця значень параметрів ультразвукового впливу, початкового та кінцевого розмірів часточок досліджуваних матеріалів, часу обробки, тощо скоріш за все пояснюються застосуванням у дослідженнях бентонітів з різним складом і початковими властивостями, їх видобутком із різних родовищ.

Застосування ультразвуку за відповідних параметрів обробки може дати позитивний ефект. Подальше проведення досліджень доцільно продовжити у напрямку вивчення прив'язки певних видів бентоніту до режимних параметрів його обробки ультразвуком для використання в якості зміцнювальних домішок у шихту огрудкування.

#### Список літератури

1. Ультразвуковые приборы "УЗО". <http://www.ultrazvu.com>.
2. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. **Хмелев В.Н., Сливин А.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В.** – Бийск: Издательство АлтГТУ. – 2010. – 176 с.
3. **Радж Балдев, Раджендран В., Паланичами П.** Применения ультразвука. М.: Техносфера, 2006. – 576 с.
4. **Шутилов В.А.** Основы физики ультразвука / **В.А. Шутилов.** – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1980. – 280 с.
5. **Розенберг, Л.Д.** Источники мощного ультразвука / под ред. Л.Д.Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 380 с.
6. **Кикучи Е.** Ультразвуковые преобразователи / **Е. Кикучи.** – М.: Мир, 1972. – 424 с.
7. **Эльпинер, И.Е.** Биофизика ультразвука / **И.Е. Эльпинер.** – М.: Наука, 1973. – 384 с.
8. **Розенберг Л.Д.** Фокусирующие излучатели ультразвука. В кн.: Физика и техника мощного ультразвука. Т. 1. Источники мощного ультразвука. – М.: Наука, 1967.
9. **Агранат Б.А., Башкиров В.И.** Критерий оценки интенсивности ультразвуковой кавитации. "Доклады АН СССР", 1968, 179, № 4.
10. **Розенберг Л.Д.** Энергетические соотношения при ультразвуковой кавитации. В сб.: "Ультразвуковая техника", вып. 6. – М.: НИИМаш, 1964.

11. **Новицкий, Б.Г.** Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / Б.Г. Новицкий. – М.: Химия, 1983. – 192 с.
12. **Губин Г.Г.** Обобщение и анализ возможности использования ультразвуковых колебаний при переработке полезных ископаемых / Г.Г. Губин, Т.П. Ярош, Л.В. Скляр // Збагачення корисних копалин: Наук.-тех. зб. – 2016. – Вип. 62 (103). – С. 132-143.
13. Ультразвук в обогащении полезных ископаемых / В.А. Глембоцкий, М.А. Соколов, И.А. Якубович и др. – Алма-Ата: Наука Каз. ССР, 1972. – 229 с.
14. Ультразвук в гидрометаллургии / Б.А. Агранат, О.Д. Кириллов, Н.А. Преображенский и др. – М.: Металлургия, 1969.
15. **Агранат Б.А., Хавский Н.Н., Хан Г.А., Пантелеева Н.Ф., Эльберт А.В.** Флотация в воде, обработанной ультразвуком // Интенсификация процессов извлечения металлов из руд в ультразвуковом поле. – М.: Металлургия, 1969.
16. **Коротич В.И.** Теоретические основы окомкования железорудных материалов. – М.: Металлургия, 1966.
17. **Кокорин Л.К., Лелеко С.Н.** Производство окисленных окатышей. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2004, – 280 с.
18. Теоретические основы производства окускованного сырья: Учебное пособие для высших учебных заведений. **Ковалёв Д.А., Ванюкова Н.Д., Иващенко В.П. и др.** – НМетАУ. – Днепропетровск: ИМА-пресс. – 2011. – 476 с.
19. **Вегман Е.Ф.** Окускование руд и концентратов. М.: Металлургия. 1968. – 259 с.
20. Сырье для черной металлургии: Справочное издание: в 2-х т. Т.1 Сырьевая база и производство окускованного сырья (сырье, технологии, оборудование) / М.Г. Ладыгичев и др. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 896 с.
21. **Коротич В.И.** Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке / **Коротич В.И.** – М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
22. **Лесив Е.М.** Механохимическая активация каолиновых и бентонитовых глин для формовочных смесей и противопожарных красок: автореф. дис. канд. тех. наук: спец. 05.16.04 «Литейное производство» / **Е.М. Лесив.** – Челябинск, 2007. – 21 с.
23. **Mekhamer W.K.** The Colloidal Stability of Raw Bentonite Deformed Mechanically by Ultrasound. J Saudi Chem Soc. 2010, 14(3), 301–306.
24. **Christidis, G.E., Dellisanti, F., Valdre, G., Makri, P.,** 2005. Clay Miner. 40, 511–522] i [Bastida, J., Kojdecki, J., Pardo, M.A., Amoros, P., 2006. Clays Clay Miner. 54, 390–401.
25. **Максютова О.** Бентонит и его применение / TheChemicalJournal // – 2017 – №12. – С. 20-25.
26. **Darvishi Z., Morsali A.** Synthesis and Characterization of Nano-bentonite by Sonochemical Method. Ultrason-Sonochem. 2011, 18, 238–242.
27. **Nguyen A.N., Reinert L., Lévêque J.-M., Beziat A., Dehaut P., Julia J.-F., Duclaux L.** Preparation and Characterization of Micron and Submicron-sized Vermiculite Powders by Ultrasonic Irradiation. Appl Clay Science. 2013, 72, 9–17.
28. **Lapides I., Yariv Sh.** The Effect of Ultrasound Treatment on the Particle-size of Wyoming Bentonite in Aqueous Suspensions. J Mater Sci. 2004, 39, 5209–5212.
29. Приготовление высокодисперсных суспензий бентонита в бичастотном кавитационном поле / **П.Г. Думитраш, М.К. Болога, Т.Д. Шемякова** // [Электронная обработка материалов](#). 2015, – Том 51 (№1), – с. 85-91.
30. **Маргулис М.А., Хавский Н.И.** О механизме одновременного воздействия двух частот акустических колебаний на физико-химические и химические эффекты. Всес. симпозиум «Акустическая кавитация и применение ультразвука в химической технологии» (Славское, 26 февр. – 1 марта 1985 г.). Тезисы докладов. Славское, 1985, с. 93–94

Рукопис подано до редакції 06.04.2021

УДК 004.942

Ж.Г. РОЖНЕНКО, канд.техн. наук, О.К. ДАНИЛЕЙКО, ст. викл.,  
Г.В. КОЛОМЦ, асист., А.В. ЯТЧУК, студ.  
Криворізький національний університет

## ВИКОРИСТАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРІВ НА БАЗІ ARM CORTEX В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЦІ

**Мета.** Проведений аналіз ринку мікропроцесорів показав поширення використання пристроїв мікроконтролерів на основі ARM Cortex. У роботі на прикладі контролера STM32, побудованого на основі ARM Cortex, розглянуто використання мікропроцесорів у електромеханічних системах. Для більшості сучасних електромеханічних систем необхідні пристрої, що будуть об'єднувати різноманітні пристрої в єдину мережу для обміну даними. В роботі проведено огляд номенклатури мікропроцесорів різних моделей та виробників та обрано найбільш прийнятний варіант відповідно до висунутих вимог.

Також було проведено вибір периферійних пристроїв для роботи в досить поширеній локальній мережі промислової автоматизації Modbus.