

Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine  
Ministry of Education and Science of Ukraine  
National University of Food Technologies  
Institute of Food Resources of the National Academy  
of Agricultural Sciences of Ukraine  
AKKO International

**12<sup>th</sup> International Specialized  
Scientific and Practical Conference**

**Trends in LEAN food production  
and packaging**

Conference's title in 2012-20:  
Resource and Energy Saving Technologies of Production and Packing of Food  
Products as the Main Fundamentals of Their Competitiveness

**September 20, 2023**  
AKKO International Exhibition Centre  
Kyiv, Ukraine

---

**Kyiv 2023**

Міністерство аграрної політики та продовольства України  
Міністерство освіти і науки України  
Національний університет харчових технологій  
Інститут продовольчих ресурсів Національної академії аграрних  
наук України  
ТОВ «АККО Інтернешнл»

## **12-а Міжнародна спеціалізована науково- практична конференція**

# **Тренди Lean-виробництва та пакування харчової продукції**

Назва конференції у 2012–20 р.:  
Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової  
продукції – основні засади її конкурентоздатності

**20 вересня 2023 р**  
Виставковий центр «АССО International»  
Київ, Україна

## Робочі тіла бісерних млинів

Грінінг К.Р., Пономаренко А.М., Губеня О.О.

Національний університет харчових технологій (НУХТ), м. Київ, Україна

**Вступ.** Хімічна, фармацевтична, керамічна та інші промисловості вимагають все більшої кількості суспензій матеріалів з високою проникністю і стабільністю при зберіганні. Одним із способів виготовлення таких низьков'язких суспензій є подрібнення в бісерних млинах в рідкому середовищі шляхом перетирання суспензії матеріалу твердими кульками – бісером. Діапазони продуктивності складають від одиниць грамів до декількох тонн на годину [2]. При коефіцієнті подрібнення 1:10 000 (від 200 мкм до субмікронних розмірів), діапазон застосувань дуже широкий, і кількість вирішуваних завдань величезне. В останні роки спостерігається тенденція до використання розмелювальних середовищ набагато менших розмірів (<100 мкм) для нанонізації ліків [1].

**Матеріали та методи.** Аналітичні дослідження проведені на основі аналізу сучасних наукових літературних джерел.

**Результати і обговорення.** Матеріал, який подрібнюється, надходить до камери подрібнення в проміжки між робочими тілами і подрібнюється між ними та стінками камери, заповнюючи весь вільний обсяг. Коли ротор обертається, система «бісер-продукт» переміщується навколо камери і створює стиснення та зсувні сили для зважених часток, руйнуючи їх [3]. Робочі тіла являють собою бісер (синоніми: намистини, перли, кульки, beads, pearls, balls) і робиться зі скла, кераміки або сталі.

**Скляний бісер** виготовляються шляхом обертального пресування або термічним формуванням, а потім шліфуються [2-5].

**Переваги** скляного бісеру [2-5]:

- Допуск на діаметр і округлість становить <10 мкм;
- Однорідні поверхні з визначеною шорсткістю з  $R_a \leq 30$  нм;
- Відсутність спайок, включень та бульбашок повітря;
- Хімічна стійкість дозволяє використовувати в агресивних середовищах;
- Підходить для контакту з продуктами харчування [2-5].

**Керамічний бісер** виготовляється шляхом спікання та можна використовувати як альтернативу бісеру зі сталі [2-5].

**Переваги** керамічного бісеру:

- Надзвичайна висока зносостійкість;
- Дрібнопориста (або без пористості) щільна спечена структура;
- Гладка (полірована) поверхня, висока округлість;
- Висока твердість, питома вага та насипна щільність;
- Не мають радіоактивності [2-5].

**Сталевий бісер** виготовляється загартованої вуглецевої сталі [2-5].

**Переваги** сталевих бісеру:

- Дрібнозерниста мікроструктура;
- Висока стійкість до руйнування;
- Висока зносостійкість;
- Підходить для контакту з продуктами харчування;
- Гладка поверхня, хороша сферичність [2-5].

Компанія Sigmund Lindner GmbH (Німеччина) пропонує бісер під торговою маркою Silibeads зі скла та кераміки.

Характеристики скляного та керамічного бісеру компанії Sigmund Lindner GmbH [4]

Назва	Склад	Твердість по Віккерсу, HV	Густина, кг/л	Насипна густина, кг/л	Модуль Юнга, ГПа	Діапазон розмірів, мм
<b>Скляний бісер</b>						
P Pharma	Боросилікатне або натрієво-вапняне скло	-	Кількість на 1 кг, шт 54 800	2,23	-	1,5-6,0
M	Натрієво-вапняне скло	≥6 (за Моосом)	2,5	2,0	65	1,5-16,0
S	Натрієво-вапняне скло	≥6 (за Моосом)	2,5	2,1	65	0,25-4,40
SL	Алюміній-боросилікатне скло	≥6 (за Моосом)	2,59	2,5	77	0,5-4,40
Q	Кварцове (синтетичний діоксид кремнію) скло	-	2,2	1,35	75	0,-1,2
<b>Керамічний бісер</b>						
ZY-P Pharma	Оксид цирконію стабілізований ітрієм	1300	6,0	3,62-3,69	210	0,08-1,60
TC 9.5	Суміш карбиду вольфраму та оксиду цирконію, стабілізованого ітрієм	1600	9,2	5,7	-	0,1-1,2
ZY 6.0	Оксид цирконію стабілізований ітрієм	1300	6,0	3,23-3,78	210	0,1-25
ZC 6.1	Оксид цирконію/церію стабілізований	1050	6,13	3,66-3,84	205	0,3-2,5
ZA 5.3	Цирконій-алюміній-оксид, стабілізований церієм	1050	5,3	3,3	-	0,4-3,2
ZS 4.1	Спечений силікат цирконію	1000	4,1	2,39-2,49	100	0,4-4,0
ZSA 3.7	Циркон-сілікат-алюмінію оксид	1250	3,7	2,19-2,32	-	0,4-6,0
A 92.0	Алюмінію оксид та оксид кремнезему	-	3,7	2,2	-	0,2-0,7
A 99.3 та A 99.9	Алюмінію оксид	-	3,8	2,3	-	0,2-1,8

NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH (Німеччина) пропонують не тільки обладнання, але й робочі тіла для процесу надтонкого подрібнення зі сталі, кераміки та скла.

Таблиця 2

Характеристики скляного та керамічного бісеру компанії NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH [2]

Назва	Склад	Твердість по Віккерсу, НV	Густина, кг/л	Насипна густина, кг/л	Модуль Юнга, ГПа	Діапазон розмірів, мм
<b>Сталевий бісер</b>						
SteelBeads Micro	Підшипникова сталь	-	7,6	4,5	-	0,2-1,4
SteelBeads Q	Хромована сталь	211-294	7,85	4,8	-	2,0-6,35
SteelBeads HQ	Підшипникова сталь	740-900	7,85	4,8	-	1,6-8,7
<b>Скляний бісер</b>						
ClassBeads	SiO <sub>2</sub> – 72.5 % Na <sub>2</sub> O – 13 % CaO – 9 % MgO – 4 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> < 0.6 %	-	2,5	1,5	-	0,4-2,1
<b>Керамічний бісер</b>						
ZetaBeads	Оксид цирконію, стабілізований ітрієм	1100	6,0	3,6	200	0,2-3,3
ZetaBeads Plus	Оксид цирконію, стабілізований ітрієм	1150	6,0	3,6	200	0,07-0,6
ZetaBeads Nano	Оксид цирконію, стабілізований ітрієм	1200	6,0	3,6	200	0,03-0,2
VitaBeads Nano	Оксид цирконію, стабілізований ітрієм	1200	6,0	3,6	200	0,2-1,0
CeraBeads	Оксид цирконію, стабілізований церієм	1180	6,2	3,8	-	0,4-3,1
ZsBeads	Силікат цирконію	900	4,0	2,5	-	0,6-1,8

Чим краще внутрішня структура кульок, тим краще зносостійкість і опір розриву при подальшому застосуванні в процесі подрібнення. Інші параметри, такі як якість сировини (хімічний склад, розмір часток, питома поверхня), добавки, склад матеріалу і режим випалу при спіканні, впливають на якість кульки з точки зору ефективності подрібнення і терміну служби кульки [5]

Таблиця 3

Рекомендації щодо сфер використання робочих тіл компанії NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH [2]

	Steel Beads Micro	Steel Beads Q	Steel Beads HQ	Class Beads	ZetaBeads	ZetaBeads Plus	ZetaBeads Nano	VitaBeads Nano	Cera Beads	ZsBeads
Агрохімікати				+	+				+	+
Поліграфічні фарби	+	+	+		+	+	+		+	+
Кераміка/скло	+	+	+							
Цифрове чорнило					+					
Лакофарбова промисловість				+	+	+	+		+	+
Руди/мінерали/метали					+	+	+		+	+
Нано						+	+			
Науки про живе								+		
Пігменти/барвники	+	+	+	+	+	+	+		+	+
Харчова промисловість			+							

Табл. 4

Рекомендації щодо сфер використання робочих тіл компанії Sigmund Lindner GmbH [4]

	P Pharma	M	S	SL	Q	ZY-P Pharma	TC 9.5	ZY 6.0	ZC 6.1	ZA 5.3	ZS 4.1	ZSA 3.7, A 92.0, A 99.3, A 99.9
Агрохімікати		+	+						+	+	+	
Поліграфічні фарби							+					
Кераміка/скло					+				+			
Цифрове чорнило			+				+					
Лакофарбова промисловість				+			+	+	+	+	+	
Руди/мінерали/метали			+						+	+	+	+
Нано				+	+		+		+	+		
Науки про живе	+	+			+	+						
Пігменти/барвники		+	+				+	+	+	+	+	
Харчова промисловість		+						+				
Косметичні засоби		+			+			+				

Пояснення до табл. 3 та таблицю 4. (Рекомендації щодо застосування) [2,5]:

**Агрохімікати:** добрива; пестициди; фунгіциди; гербіциди; інсектициди.

**Поліграфічні фарби:** друкарські фарби для флексографії; чорнила для струменевого друку; гарячий/холодний/звичайний офсетний друк; фарби для трафаретного друку; фарби для глибокої ротаційного друку.

**Кераміка / скло:** фарби; скляні фарби; високочисті силікатні матеріали; магнітна кераміка; технічні керамічні компоненти.

**Цифрове чорнило:** керамічний струменевий друк; упаковка для струминного друку; промисловий і комерційний струменевий друк; виробництво добавок.

**Лакофарбова промисловість:** судові фарби; конструкційна фарба; дисперсійна фарба; фарба для доріг; фарба по дереву (лаки); лакові покриття; наповнювачі; прозорий лак; покриття для листових матеріалів; занурюване катодне ґрунтування; автомобільна фарба; антикорозійні фарби.

**Руди/мінерали/метали:** карбонат кальцію; графіт; тальк; дорогоцінні і рідкоземельні метали; метали; тверді сплави.

**Нано:** багатошарові керамічні конденсатори (MLCC); рідкокристалічні дисплеї (LCD); фотокаталізатори; полірування (CMP); обробка та подрібнення різних акумуляторних матеріалів, таких як катодні та анодні матеріали, наприклад, для літій-іонних батарей; магнітні стрічки.

**Науки про живе:** фармацевтичні засоби (подрібнення до нанорозміру для виробництва активних фармацевтичних інгредієнтів (API)), дезінтеграція клітинної стінки мікроорганізмів (лізис); змішування ліків; подрібнення та гомогенізація біологічних зразків (тканини рослин або тварин).

**Пігменти/барвники:** виробництво пігментів; діоксид титану; тонер; барвники.

**Харчова промисловість:** терте какао; начинки, глазури, шоколадні суміші; шоколад.

**Косметичні засоби:** подрібнення та диспергування пігментів і твердих речовин для помад та різних кремів.

#### **Правила підбору бісеру [2, 5]:**

- Продукти, що легко подрібнюються: можна використовувати робочі тіла меншого розміру;
- Продукти, які важко подрібнити: робочі тіла більшого розміру більш ефективні в порівнянні з робочими тілами меншого розміру;
- Бісер додають в млин по обсягу, і замінюють в міру вироблення робочих поверхонь;
- Бісер виготовляють різного діаметру, в залежності від розміру розмельної камери і цілей процесу;
- Кращий результат подрібнення досягається при використанні найменшого діаметра робочих тіл;
- Зміна швидкості змішувача не має істотного впливу на результат;
- Робочі тіла повинні бути в 2-3 рази більше, ніж сепаратор або фільтр млина (наприклад, щільне сито, ситовий патрон);
- Робочі тіла мають бути принаймні в 5 разів менше за відстань між диском робочого органу та стінкою робочої камери;
- Розмір робочих тіл повинен бути приблизно у 20-30 разів більший за розмір частинок ( $d_{95}$ ) подрібнюваного продукту на початку процесу подрібнення.
- Цільовий середній розмір частинок ( $d_{50}$ ) меленого продукту після подрібнення становить приблизно 1/1000 розміру робочого тіла: Приклад:

$$\text{Розмір робочого тіла } 2 \text{ мм} \rightarrow d_{50} = 0,002 \text{ мм} = 2 \text{ мкм.}$$

Результати підтверджують, що бісер одного розміру дає кращі характеристики подрібнення, ніж бімодальний бісер, в тому, що стосується зносу середовища. Існують оптимальні розміри кульок для певних розмірів корму щодо швидкості руйнування частинок, розміру продукту та розподілу за розміром. Підтверджено, що оптимальне співвідношення розміру бісеру до розміру продукту становить приблизно 20:1 [1].

Правильний підбір режимів роботи і матеріалів грає вирішальну роль в економічній ефективності процесу і забезпечує необхідну чистоту продукту, якщо цього вимагає технологія.

### Література

1. Loh Z.H., Samanta A.K., Heng P.W.S. Overview of milling techniques for improving the solubility of poorly water-soluble drugs // *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*. – 2015. – Volume 10. – P.255-274. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2014.12.006>
2. NETZSCH – світовий лідер-виробник машино- та приладобудування: аналіз та тестування, подрібнення та диспергування, насоси та ін системи. Режим доступу: <https://www.netzsch-grinding.com> (25.02.2021)
3. Patravale V.B., Date A.A., Kulkarni R.M. Nanosuspensions: a promising drug delivery strategy // *Journal of Pharmacy and Pharmacology*. – 2004. – Volume 56. – Issue 7. – P. 827-840. <https://doi.org/10.1211/0022357023691>
4. Sigmund Lindner GmbH – виробник та дистриб’ютор технічного скла та керамічного бісеру з 1854 року. Режим доступу: <https://www.sigmund-lindner.com> (13.03.2021).
5. Weber U., Langlois D. The effect of grinding media performance on milling and operational behaviour // *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2010. – Volume 110. – pp. 147-152.