

**Бабій А.В.,**  
**Бабій М.В.,**  
**Кучвара І.М.**  
Тернопільський національний  
технічний університет  
імені Івана Пулюя,  
м. Тернопіль, Україна,  
E-mail: ababiy@ukr.net

**АНАЛІЗ ПРИЧИН ТРАВМУВАННЯ  
ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ ЗБИРАННІ  
ТА ТРАНСПОРТУВАННІ**

УДК 631.36:656.02

*В роботі загострюється проблема пошкодженості зернового матеріалу при його збиранні, первинній переробці та транспортуванні. Приведено результати окремих досліджень, що стосуються визначення механічних властивостей зернівок при дії на них деформаторів у вигляді робочих органів обслуговуючих машин. Розглянуто основні теоретичні підходи щодо визначення критичних навантажень і деформацій зернового матеріалу. Наведено деякі статистичні дані та причини пошкодженості зернівок окремих культур при роботі навантажувально-розвантажувального обладнання пунктів перевалки зернових продуктів при їх транспортуванні до кінцевого споживача.*

**Ключові слова:** травмування, пошкодженість, зерновий матеріал, зернівка, збирання, транспортування, транспортне підприємство, логістична схема, деформація, швидкість, напруження, пневмопровід, транспортер.

**Постановка проблеми.** Аналізуючи виробничий ринок України, можна з впевненістю констатувати, що аграрний сектор має чи не найстрімкіші темпи зростання. Підвищення культури агровиробництва тягне за собою неминуче збільшення валових зборів сільськогосподарської продукції. З іншого боку виникає потреба у розробці раціональних логістичних схем для транспортування таких вантажів з метою їх подальшої переробки, зберігання, збуту тощо. І якщо аграрії виробили, наприклад один об'єм продукції, то для транспортних підприємств він може бути збільшеним у кілька разів в залежності від кінцевого призначення та самої технології доведення до кондиції кінцевого продукту [1].

Розкриваючи суть проблеми, візьмемо як приклад виробництво зернових культур, де Україна на світовому ринку має добрі позиції. Поряд з цим виникає необхідність збільшення кількості або продуктивності зернозбиральних машин; те саме стосується і машин післязбиральної доробки насіння; розроблення ефективних логістичних схем транспортування матеріалу ланцюгом технологічного процесу та кінцевої реалізації; забезпечення раціональних та безпечних для самого матеріалу навантажувально-розвантажувальних робіт.

Крім того всі ці технологічні операції – від збирання до кінцевої реалізації готового продукту супроводжуються контактом даного матеріалу з робочими органами технологічних та транспортних машин. Це несе ще одну «приховану», але дуже актуальну проблему – пошкодження насіння зернових культур.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Дослідження механічних властивостей зернових матеріалів – задача не проста, оскільки вони змінюються в досить широких межах. Це залежить від культури, сорту, вологості, температури, умов дозрівання тощо. Тому, проектуючи робочі органи технологічних машин чи призначаючи кінематичні режими, ці обставини потрібно враховувати.

Обґрунтуванням вибору цих параметрів на основі розроблених теорій та проведених експериментів займалися ряд вчених, серед яких: Войтюк Д.Г., Горячкін В.П., Кирпичев Б.Л., Ребіндер П.А., Сабліков М.В., Сироватка В.І., Пугачев А.Н. та ін.

На сьогоднішній день проблема контактної взаємодії робочого органу із зернівкою вивчена не достатньо. Мало є інформації в літературних джерелах щодо механічних властивостей різних зернових культур, якою можна скористатися при виконанні різного роду проектних розрахунків робочих органів.

**Мета досліджень.** Провести аналіз відомих підходів до визначення механічних властивостей зернового матеріалу з метою встановлення раціональних кінематичних параметрів технологічних машин при збиранні та виконанні навантажувально-розвантажувальних робіт. Запропонувати шляхи зниження травмування насіння при збереженні продуктивності розглядуваних машин.

**Результати досліджень.** Розглянемо спочатку, що собою представляє, наприклад зернівка пшениці в біологічному сенсі, рис. 1 [2].

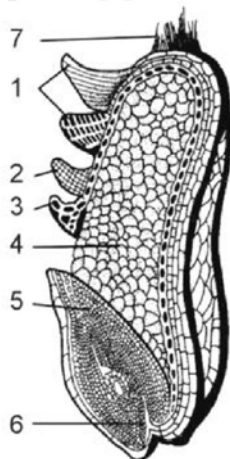


Рис. 1 – Будова зернівки пшениці:  
1 – плодова оболонка; 2 – насінна оболонка; 3 – алеїроновий шар; 4 – ендосперм; 5 – щиток;  
6 – зародок; 7 – борідка

Отже, насінина – генеративний орган, основною функцією якого є збереження і поширення виду. З цією метою Природа сформувала у зернівці три блоки тканин, які виконують такі основні функції: захисту насінини від дії навколишніх факторів; запасання поживних речовин і розвитку нової особини.

Тому серед показників якості насіння «схожість насіння» займає ключове місце. Цей показник визначають за встановленими методиками, оскільки він регламентує посівну якість насіння, що обумовлена густотою посіву, а від того і витратою посівного матеріалу. Звідси випливає, що, контактуючи з робочими органами технологічних та транспортних машин, зернівки не повинні втратити свою репродуктивну властивість. Саме в цьому спрямуванні першочергово потрібно рухатися, проектуючи робочі машини чи встановлюючи їх кінематичні режими.

При аналізі публікацій, що стосуються даного спрямування, автори в переважній більшості кінцевим результатом подають регламентовану швидкість взаємодії робочого органу тої чи іншої машини із зернівкою.

За агротехнічними вимогами для насінневого зерна пошкодженість не повинна перевищувати 1 %. Практичний досвід цю цифру наближає до 10 %.

Спираючись на роботу [3], наведено неутішну статистику травмування насіння зернових культур від загального відсотка травмування: зернозбиральний комбайн – 30...36 %; сушильні агрегати – 6,3...11,4 %; повітре-решітні машини – 2,71...5,4 %; транспортуючі механізми – 2,5...4 %; трієрні блоки – 0,32...2,33 %; пневмосортувальні машини – 0,17 %; решту – інші пошкодження.

Значну частину травмування насіння забезпечують зерномети на токах чи інших перевалочних пунктах. Пошкодженість зерна кинутого на 4 м зростає на 11 %, а на 8 м – на 17 % від базового значення [4].

Наведена статистика в більшій мірі стосується макротравм (зернівка поколена, має вм'ятини, пошкоджена захисна оболонка), але не потрібно забувати, що при механічній дії робочого органу обслуговуючих машин виникають ще мікротравми: механічні мікропошкодження захисної плівки, розвиток внутрішніх тріщин тощо. З цього випливає, що проблема має досить великі масштаби і на даний час потребує детального вивчення.

Розглядаємо зернівку як тіло, на яке чинить вплив механічна дія при відомих параметрах середовища. Міцність буде оцінюватися напруженням, яке виникає при дії зовнішнього навантаження, або руйнуючим зусиллям. Але при цьому потрібно враховувати культуру, сорт, вологість, розміри зернівки та ступінь її дозрівання, а також спосіб прикладання механічного навантаження і вид деформації, яка при цьому виникає.

В роботі [5] представлено результати дослідження механічних властивостей зернівок різних культур, табл. 1.

Таблиця 1

**Структурно-механічні властивості зерна різних культур**

Культура		Вологість, %	Руйнуюче зусилля, Н	Границя міцності $\sigma$ , МПа	Відносна деформація $\varepsilon$ , %
Ячмінь	зерно	11,6	104	4,9	13,5
		17,0	76	3,4	18,8
	ядро	11,6	102	5,1	12,6
		17,0	72	3,9	17,3
Овес	зерно	11,6	83	3,6	24,0
		17,0	32	1,3	47,5
	ядро	11,6	58	3,8	20,6
		17,0	41	1,8	39,0
Просо	зерно	11,6	22	4,3	16,1
		17,0	13	2,4	24,0
	ядро	11,6	17	4,6	14,4
		17,0	7	2,9	21,0
Гречка	зерно	11,6	43	3,9	18,0
		17,0	22	1,9	27,1
	ядро	11,6	31	4,2	15,9
		17,0	22	2,5	23,4

Аналізуючи отримані дані, видно, що при стиску ядро має більше значення границі міцності, а зернівка – значення відносної деформації при більшій вологості.

Крім того, автор [5] вказує, що розбіжність міцності різних сортів і скловидності зернівок при одному і тому ж виду деформування може сягати 50 %. Доведено, що міцність дрібніших зернівок є вищою на 30...60%. Важливим є той факт, що міцність анатомічних частин зернівки суттєво різниться – оболонка є значно міцнішою за ендосперм. Маючи природну вологість в межах 14-16 %, умовна границя міцності насінєвих оболонок, що з'єднані з алейроновим шаром становить приблизно 9...13 МПа, плодкових оболонок – 11...18 МПа, всі оболонки разом і в з'єднанні з алейроновим шаром – 20...25 МПа. Взагалі, міцність оболонок зернівок може досягати 27...33 МПа. На противагу цьому міцність ендосперма – 1...3 МПа.

За аналізом проведеного дослідження, можна почерпнути як допустимі значення напружень різних частин зернівки для моделювання контактної взаємодії робочих органів, наприклад збиральних, очисних, навантажувально-розвантажувальних машин тощо.

Наступним етапом є моделювання контактної взаємодії робочого органу (деформатора) із зернівкою для встановлення взаємозв'язку між зовнішніми і внутрішніми силовими факторами.

В роботі [6] автори представляють зернівку як пружне тіло при дії відносно незначних динамічних навантажень. Механічні властивості характеризують модулем пружності  $E$  (модуль Юнга) та коефіцієнтом Пуассона  $\mu$ . На основі базових залежностей класичної теорії пружності, деформацію зернівки від навантаження  $P$  описано виразом

$$\delta = \left( \frac{9P^2}{16R} \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

де  $R$  – радіус кривизни зернівки в точці контакту;  $E_1$  і  $E_2$  – модулі пружності зернівки та деформатора.

Вказано, що подальше збільшення навантаження  $P$  призводить до виникнення пластичних деформацій і як наслідок розвиток тріщин та в кінцевому результаті – руйнування зернівки. Тому тут в теоретичному плані вводиться показник пластичності та модуль пластичності. В кінцевому результаті виведено вираз енергії пружної деформації зернівки (2) через приведений модуль деформації  $E^*$ :

$$W = \left( \frac{9 \cdot P^5}{16 \cdot R \cdot (E^*)^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (2)$$

Сам приведений модуль деформації  $E^*$  визначається розрахунком за серією експериментальних досліджень з визначення енергії пружної деформації зернівки.

Описана методика дослідження механічних властивостей зернового матеріалу в роботі [7] має прикладне значення для дослідження конкретних конструкцій машин.

Аналізуючи дослідження, що представлені в роботі [7], використано підходи класичної механіки удару, де експериментальним шляхом зернівці надається критична кінетична енергія удару, що супроводжується відповідною швидкістю співударяння. В процесі проведення серії експериментальних досліджень фіксуються величини деформацій зернівок. Підсумком є наступне: при деформаціях в межах 260-290 мкм виникають широкі тріщини в нижній частині зернівки; деформації 370-390 мкм призводять до руйнування навпіл по борозенці зернівки. Причому описані руйнування викають при дії 2-3 ударів енергією від 87 до 204 Дж. Інша частина дослідження спрямована на визначення «безпечної» енергії співударяння для встановлення кінематичних параметрів навантажувально-розвантажувальних машин. Отже, після серії проведених досліджень встановлено значення кінетичної енергії співударяння в межах 3-4 Дж є безпечною, величина залишкової деформації становила 0-3 мкм. Звідси було знайдено максимально допустиму швидкість співударяння робочого органу технологічної машини із зернівкою. Величина цієї швидкості  $[v] = 5,15$  м/с. Рекомендовано встановити швидкість стрічки, наприклад зернової норії, в межах  $v_p = 3,43 \dots 3,22$  м/с.

Дослідження, які представлені в роботі [8], спираються на припущені, що особливістю поведінки зернівки при механічній деформації є чітко виражене явище релаксації, при якому змінюється напружений стан матеріалу зернівки. Автор виділяє релаксацію напруження, тобто його зменшення з часом при постійній величині деформації; релаксацію деформації – зростання значення деформації при підтриманні постійного значення механічного напруження. Припускається також, що можливе зменшення деформації зернівки після зняття зовнішнього напруження. По-іншому релаксацію деформації

називають повзучістю.

Наближено релаксаційні властивості зерна для одновісного напруженого стану тут описано рівнянням післядії Больцмана

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \int_0^t \varphi(t-v)\sigma(v)dv, \quad (3)$$

$\varepsilon$  – деформація;  $\sigma$  – напруження;  $t$  – час;  $v$  – змінна інтегрування, що враховує будову матеріалу та вплив температури;  $E_0$  – модуль пружності матеріалу як характеристика швидкості деформації матеріалу зі швидкістю поширення звуку

$$E_0 = \rho C^2, \quad (4)$$

тут  $\rho$  – щільність;  $C$  – швидкість поширення звуку в даному матеріалі.

Автор доводить, що час релаксації представляє собою такий період часу, протягом якого першопочаткове напруження в матеріалі знижується в  $e \approx 2,73$  рази. Ця величина виміряє швидкість релаксаційного процесу.

В роботі встановлено взаємозв'язок різних факторів на релаксаційні властивості скловидної пшениці. Прикладом є отримані дані, що зведені у табл. 2 [8].

Таблиця 2

**Взаємозв'язок різних факторів на релаксаційні властивості скловидної пшениці**

Пшениця	Вологість, %	Температура, °C	Швидкість деформації, $10^3 \text{ c}^{-1}$	Модуль пружності, $\text{кг/см}^2$
Мільтурум 553	14,0	20	0,100	1595
	16,0	20	0,610	1240
	14,0	20	0,205	1590
	16,0	20	0,540	1435
Саратовська 29	16,0	45	0,970	1375

За дослідженнями, що проведені в роботі [9], автор досліджує швидкість співударяння робочого органу із зернівкою, враховуючи властивості матеріалів контактуючих поверхонь, та кількість таких співударянь. Висновком є те, що для насіння пшениці вже при швидкості співударяння 6 м/с робочим органом зерномета є суттєве зростання пошкодженості зернівок. А прагнучи збільшення продуктивності таких машин, їх робочі швидкості є набагато більшими.

Використання пневмотранспортних систем також не позбавлені суттєвих недоліків, які позначаються на травмуванні зернівок, що транспортуються. Тут близька швидкість транспортованого матеріалу в околі 25 м/с. Не було би це проблемою, що пов'язана з травмуванням, якби не подальша зупинка транспортованого матеріалу та зміна напрямку руху зернівок вздовж транспортуючого каналу. Зупинка матеріалу в кінці пневмоканалу забезпечується спеціальними циклонами при суттєвому використанні сили тертя. Те саме відбувається і в пневмоканалі – зернівки труться об його стінки, технологічні виступи, особливо це спостерігається при зміні кривизни каналу.

При використанні на перевалочних пунктах ковшових транспортерів основне травмування зернівок припадає на фазу заповнення ковша зерновим матеріалом (підбирання). Подібно до цього, травмування шнековими навантажувачами спостерігається в зазорах між шнеком і його кожухом.

Самотічні трубопровідні магістралі своїми недоліками мають значне тертя зернівок об стінки каналу та відсутність механізму зупинки сипкого матеріалу на виході,

через що виникають значні ударні взаємодії при швидкості потоку приблизно 8 м/с.

**Висновки.** За опрацьованими даними ряду досліджень взаємодії робочих органів обслуговуючих машин із зерновим матеріалом відбувається значне пошкодження зернівок. Відхилення від нормативного значення сягає десятикратного перевищення. Наведені значення допустимих напружень, критичних швидкостей співударяння, руйнуючих зусиль чи переданих зернівці енергій повинні лягти в основу проектування та призначення кінематичних режимів робочих машин. Особлива увага повинна бути зосередженою на роботі навантажувально-розвантажувальних машин при здійсненні транспортування вказаного вантажу. Тут загострення проблеми пов'язане з тим, що транспортні підприємства не є співучасниками виробництва сільськогосподарської продукції, їх функція – транспортувати вказаний вантаж. І продуктивність навантажувально-розвантажувальних машин лежить в основі отримання добрих економічних показників, через зменшення часу на виконання такого роду операцій. Тому тут, як правило, збільшення продуктивності машин досягається за рахунок підвищення відносних швидкостей робочих органів, що призводить до підвищення кількості травмованого насіння.

Крім макропошкоджень зернівок, які ми візуально можемо спостерігати, існує значний відсоток мікропошкоджень, що в переважній більшості випадків не входить до статистичних даних щодо пошкоженості. А це означає, що масштаби проблеми значно ширші, а втрати насінневого матеріалу – вагоміші.

Представлені теоретичні доробки взаємозв'язку зовнішніх та внутрішніх силових факторів при розгляді напружено-деформованого стану зернівки носять локальний прикладний характер і повної відповіді на поставлені питання не дають. Для опису даних процесів доцільно використовувати більш складні пружнов'язкі, в'язкопружні та інші моделі, а також, наприклад, враховувати хвильові ефекти тощо.

#### Література:

1. Попович П.В. Аналіз ринку автотранспортних перевезень України / Попович П.В., Шевчук О.С., Бабій М.В., Дзюра В.О. // Вісник машинобудування та транспорту. – Випуск 2. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – С.124–128.
2. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв : навч. посіб. ; за заг. ред. О.В. Дацишина ; авт. кол.: О.В. Дацишин, А.І. Ткачук, О.В. Гвоздев, Ф.Ю. Ялчак, В.О. Гвоздев. – Вінниця: Нова книга, 2008. – 488 с.
3. Травмирование семян: [Електронний ресурс] / А.М. Гимадиев. – Режим доступу: <http://www.agro-inform.ru/2010/06/travm.htm>.
4. Михайлов Є.В. Післязбиральна обробка зерна у господарствах півдня України / Є.В. Михайлов. – Мелітополь: Люкс, 2012. – 214 с.
5. Структурно-механические свойства. Прочность зерна (часть 1): [Електронний ресурс] / Все о зерне. – Режим доступу: <http://girls4girls.ru/tehnologiya-muki/1749-strukturno-mehanicheskie-svoystva-prochnost-zernachast-1.html>.
6. Швайко В.М. Дослідження механічних властивостей зернових матеріалів / В.М. Швайко, В.О. Соломка, О.В. Соломка // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. – Випуск 93. – Т. 1. – «Механізація сільськогосподарського виробництва». – Харків, 2010. – С.176–183.
7. Пугачев А.Н. Повреждение зерна машинами / А.Н. Пугачев – М.: Колос, 1976. – 320 с.
8. Импульсное воздействие и переработка зерновых: [Електронний ресурс] / В.А. Голловацкий – Режим доступу: <http://processes.open-mechanics.com/articles/364.pdf>.



9. Повышение качества и обеспечение сохранности зерна при обработке и хранении путем применения полимерных материалов в оборудовании, силосах и бункерах: [Электронный ресурс] / М.М. Тухватуллин – Режим доступа: <http://agropolimer1993.ru>

### Summary

**Babiy A.V., Babii M.V., Kuchvara I.M.** Causes analysis of grain material damaging during harvesting and transportation

*Development of Ukraine agricultural sector contributes to cargo transportation volumes increasing. Effective logistic schemes and productive systems of machines, which will ensure this, should be developed for the successful realization of the tasks set. Along with this in article the problem of transported material damaging is highlighted. Some statistical data on the percentage ratio of damaged material quantity in the stages of harvesting, after-harvesting and transportation are present. The problem of macro- and micro-damage is relevant and has a huge agricultural significance.*

*In paper analysis of various theoretical and experimental approaches concerning mechanical properties of grain material determination is carried out. There from permissible values of the stresses of grain's different parts are found for modeling the contact interaction of operating members, such as harvesting, cleaning, loading and unloading machines, etc.*

*On the whole, the following conclusions were drawn from the research results. Percentage rejection of injury from normative reaches tenfold excess. Presented values of permissible stresses, critical collapse rates, destructive forces or transmitted to grain energy should form the basis for designing and assignment of kinematic modes for operating machines. Special attention should be paid to the operating of loading and unloading machines during transportation of the specified cargo. Here problem aggravation is due to the fact that the transport enterprises are not part of the production agricultural products, their function is to transport specified cargo. And the productivity of loading and unloading machines is at the basis of obtaining good economic indicators, through the time reduction to perform such operations. Therefore, here as a rule, an increase in productivity of machines is achieved by increasing the relative rates of operative members, which leads to increase in the number of damaged grains.*

**Keywords:** *damaging, damaged, grain material, grains, harvesting, transportation, transport company, logistics scheme, deformation, speed, tension, pneumatic drive, conveyor.*

### References

1. Popovy`ch P.V. Analiz ry`nku avtotransportny`x perevezen` Ukrayiny` / Popovy`ch P.V., Shevchuk O.S., Babij M.V., Dzyura V.O. // Visny`k mashy`nobuduvannya ta transportu. – Vy`pusk 2. – Vinny`cya: VNTU, 2017. – S.124–128.
2. Teknologichne obladnannya zernopererobny`x ta olijny`x vy`robnny`cztv : navch. posib. ; za zag. red. O.V. Dacy`shy`na ; avt. kol. : O.V. Dacy`shy`n, A.I. Tkachuk, O.V. Gvozdyev, F.Yu. Yallachy`k, V.O. Gvozdyev. – Vinny`cya: Nova kny`ga, 2008. – 488 s.
3. Travmy`rovany`e semyan: [Elektronny`j resurs] / A.M. Gy`mady`ev. – Rezhym` dostupu: <http://www.agro-inform.ru/2010/06/travm.htm>.
4. My`xajlov Ye.V. Pislyazby`ral`na obrobka zerna u gospodarstvax pivdny`a Ukrayiny` / Ye.V. My`xajlov. – Melitopol` : Lyuks, 2012. – 214 s.

5. Strukturno-mexany`chesky`e svojstva. Prochnost` zerna (chast` 1): [Elektronny`j resurs] / Vse o zerne. – Rezhy`m dostupu: <http://girls4girls.ru/tehnologiya-muki/1749-strukturno-mehanicheskie-svoystva-prochnost-zernachast-1.html>.
6. Shvajko V.M. Doslidzhennya mexanichny`x vlasty`vostej zernovy`x materialiv / V.M. Shvajko, V.O. Solomka, O.V. Solomka // Visny`k Xarkivs`kogo nacional`nogo texnichnogo universy`tetu sil`s`kogo gospodarstva. – Vy`pusk 93. – T. 1. – “Mexanizaciya sil`s`kogospodars`kogo vy`robny`cztva”. – Harkiv, 2010. – S.176–183.
7. Pugachev A.N. Povrezhdeny`e zerna mashy`namy` / A.N.Pugachev – M.: Kolos, 1976. – 320 s.
8. Y`mpul`snoe vozdejstvy`e y` pererabotka zernovix: [Elektronny`j resurs] / V.A. Golovaczky`j – Rezhy`m dostupu: <http://processes.open-mechanics.com/articles/364.pdf>.
9. Povisheny`e kachestva y` obespecheny`e soxrannosty` zerna pry` obrabotky` y` xraneny`y` putem pry`meneny`ya poly`mernix matery`alov v oborudovany`y`, sy`losax y` bunkerax: [Elektronny`j resurs] / M.M. Tuxvatully`n – Rezhy`m dostupu: <http://agropolimer1993.ru>