

## MIKROSKOPOWA WERYFIKACJA MECHANIZMU USZKODZEŃ LIŚCIENI NASION SOCZEWICY I SOI

*B. Dobrzański, jr, B. Szot*

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN

ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

bdob@demeter.ipan.lublin.pl

**Streszczenie.** Wilgotność liścieni i okrywy nasiennej decyduje o mechanizmie powstawania uszkodzeń nasion roślin strączkowych. Suche nasiona podczas ściskania ulegają niewielkiej deformacji, stąd uszkodzenia związane są głównie z pękaniem liścienia. Celem badań było wyznaczenie zakresu odkształceń sprężystych nasion soi (*Glicine hispida* Max.) i soczewicy (*Lens culinaris* Medic.) oraz weryfikacja modelu opisującego mechanizm powstawania uszkodzeń liścieni. Wpływ osiowej prędkości deformacji na powstawanie odkształceń i naprężeń określano rejestrując krzywą siła-deformacja podczas ściskania pojedynczych liścieni o niskiej zawartości wody. Wyniki otrzymane podczas ściskania wskazują, że uszkodzenie każdej z odmian powstaje przy różnej sile. Jednak wartości modułu sprężystości wyznaczone w zakresie niewielkiej deformacji osiowej potwierdzają zbliżone cechy materiałowe liścieni badanych odmian.

Słowa kluczowe: Soczewica, soja, deformacja, uszkodzenia liścieni, mikroskopia.

### SPIS OZNACZEŃ

$d_p$ - deformacja postaciowa	[mm]
$d_{cod}$ - deformacja złomu rozdzielczego liścieni	[mm]
$d_K$ - średnica pola powierzchni kontaktu	[mm]
$d_{Kp}$ - średnica pola powierzchni kontaktu deformacji postaciowej	[mm]

$V_{cz}$ - objętość deformacji postaciowej czaszy liścienia	[mm <sup>3</sup> ]
$V_{cod}$ - objętość spęczenia postaciowego liścienia	[mm <sup>3</sup> ]
$D_w$ - średnica nasion bez okrywy	[mm]
$F$ - siła w zakresie granicy wytrzymałości	[N]
$F_s$ - siła w zakresie deformacji sprężystej	[N]
$R_m$ - granica wytrzymałości liścienia na rozciąganie	[MPa]
$\sigma_{cod}$ - naprężenie na powierzchni złomu rozdzielczego	[MPa]
$A_{cod}$ - pole powierzchni złomu rozdzielczego	[mm <sup>2</sup> ]
$L_{dp}$ - praca deformacji postaciowej czaszy liścienia	[mJ]
$L_{cod}$ - praca deformacji złomu rozdzielczego	[mJ]

### WSTĘP

Nasiona soczewicy i soi tak jak wielu innych roślin strączkowych, przechodząc przez kolejne etapy obróbki pozbiorowej poddawane są obciążeniom mechanicznym, które prowadzą do ich uszkodzeń. Uszkodzenie nasion powstaje pod wpływem deformacji, gdy wartość naprężeń w okrywie czy też liścieniach przekroczy granicę wytrzymałości tkanki z jakiej są zbudowane [17,18,23-29].

Test ściskania osiowego pomiędzy równoległymi płytkami jest najczęściej stosowaną metodą badania wytrzymałości mechanicznej nasion przez wielu badaczy [1,2,5-13,15-18,22,27,30-32]. W prowadzonych badaniach ściskano całe nasiona, a krzywą siła-przemieszczenie interpretowano w zakresie odkształceń niszczących, dla których wartości zarówno siły jak i deformacji często zależały od wielu czynników takich jak: kształt nasion i ich nierównomierność, wielkość, pomarszczenie okrywy, geometryczne cechy charakterystyczne dla poszczególnych odmian i gatunków, a także sposób podparcia i kształt płaszczyzny obciążającej.

Nasiona o dużej zawartości wody ( $W > 14\%$ ) podlegają głównie deformacji postaciowej i znacznym zmianom kształtu [14,17-22]. Natomiast nasiona suche o wilgotności  $w < 10\%$  podlegają deformacji w bardzo niewielkim zakresie i uszkodzenia powstają często dla odkształceń nieznacznie większych od zakresu odkształceń sprężystych [16-18]. Małe odkształcenie dla deformacji sprężystej nie może powodować znacznych zmian kształtu, a jak wykazano we wcześniejszych pracach [8,11,15], niewielka zmiana kształtu nie może być przyczyną powstawania naprężeń rozciągających w okrywie.

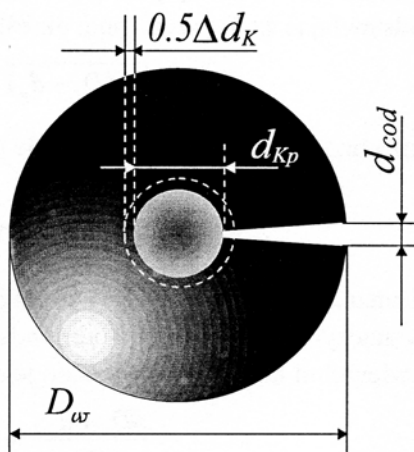
Należy przypuszczać, że przyczyny uszkodzeń nasion suchych należy poszukiwać podczas deformacji liścieni, a nie rozciągania okrywy, dlatego też badanie wytrzymałości mechanicznej liścieni może ułatwić wyjaśnienie mechanizmu powstawania uszkodzeń i było celem wyznaczenie zakresów odkształceń sprężystych oraz weryfikacji mikroskopowej uszkodzeń liścieni.

### ZAŁOŻENIA TEORETYCZNE

W przypadku interpretacji uszkodzeń powstałych w trakcie ściskania całych nasion określany zostaje skutek wywołany różnymi mechanizmami, co może prowadzić do wyciągania fałszywych wniosków dotyczących wytrzymałości mechanicznej nasion. Badanie deformacji liścieni nasion suchych; a właściwie ich połówek, podyktowane było chęcią wyeliminowania wpływu złożonego mechanizmu uszkodzeń oraz wyodrębnienie właściwości wytrzymałościowych liścieni na wartości pomiarowe.

Ułożenie liścienia podczas ściskania tak, aby płaszczyzna podziału stanowiła płaszczyznę podparcia zapewniało deformację jednostronną oraz symetryczny rozkład naprężeń. W zależności od wielkości deformacji układ ten może prowadzić zarówno do sprężystych jak i trwałych odkształceń, skutkiem których może być powstanie uszkodzenia szczelinowego (Rys. 1) zwanego w technice złomem rozdzielczym [17,18]. Dobrzański [17] przewiduje dwa przypadki powstawania złomu; gdy deformacja sprężysta powoduje złom kruchy oraz gdy powstanie złomu poprzedza trwała deformacja postaciowa.

Trwały charakter deformacji złomu rozdzielczego pozwala zastosować metodę wyznaczenia naprężenia złomu rozdzielczego  $\sigma_{cod}$  w oparciu o zasadę zachowania energii, a właściwie pracy deformacji. W przybliżeniu można przyjąć, że praca deformacji postaciowej czaszy liścienia  $L_{dp}$  określona wyrażeniem:



**Rys. 1.** Deformacja kulistej czaszy liścienia i uszkodzenie szczelinowe (widok z góry).

**Fig. 1.** Deformation of spherical cup of the cotyledon and crack opening displacement (top view).

$$L_{dp} = \frac{(F - F_s)d_p}{2} \quad (1)$$

zostaje zamieniona na pracę  $L_{cod}$ , powodującą powstanie szczeliny:

$$L_{cod} = \frac{\sigma_{cod} A_{cod} d_{cod}}{2} \quad (2)$$

Przyrównując wyrażenia (1) i (2) oraz przekształcając otrzymujemy zależność umożliwiającą wyznaczenie naprężenia złomu rozdzielczego  $\sigma_{cod}$

$$\sigma_{cod} = \frac{(F - F_s)d_p}{A_{cod} d_{cod}} \quad (3)$$

gdzie powierzchnia złomu  $A_{cod}$  zależna jest od liczby szczelin  $n$  oraz średnicy liścienia  $D_w$  i średnicy pola powierzchni kontaktu po deformacji postaciowej  $d_{kp}$ . Podstawiając za  $d_{kp}$  wyrażenie określające średnicę podstawy czaszy deformacji:

$$d_{kp} = 2\sqrt{d_p(D_w - d_p)} \quad (4)$$

oraz porządkując otrzymujemy pole powierzchni złomu rozdzielczego:

$$A_{cod} = \frac{nD_w}{4} \left( \frac{\pi D_w}{4} - 2\sqrt{d_p(D_w - d_p)} \right) \quad (5)$$

Nieznana wielkość szczeliny złomu  $d_{cod}$  dla deformacji postaciowej  $d_p$ , można wyznaczyć z proporcji obwodu podstawy liścienia do jego średnicy oraz obwodu powierzchni kontaktu również do jego średnicy:

$$\frac{\pi D_w + d_{cod}}{D_w} = \frac{\pi(d_{kp} + \Delta d_k)}{d_{kp}} \quad (6)$$

Z powyższej proporcji po przekształceniu otrzymujemy zależność określającą wielkość rozwarcia obwodowego szczeliny złomu rozdzielczego  $d_{cod}$ :

$$d_{cod} = \pi D_w \left( \frac{d_{kp} + \Delta d_k}{d_{kp}} - 1 \right) \quad (7)$$

Nieznany jest natomiast przyrost średnicy pola powierzchni kontaktu  $\Delta d_k$  w trakcie deformacji postaciowej, której górną granicę można w przybliżeniu wyznaczyć zakładając stałą objętość liścienia. Stąd, przyrównując objętość deformowanej czaszy  $V_{cz}$  i objętość spęczenia rdzenia deformacji postaciowej

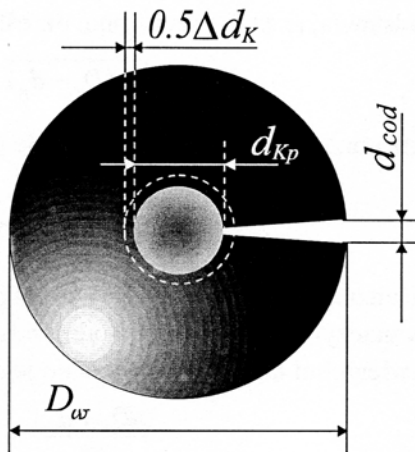
Należy przypuszczać, że przyczyny uszkodzeń nasion suchych należy poszukiwać podczas deformacji liścieni, a nie rozciągania okrywy, dlatego też badanie wytrzymałości mechanicznej liścieni może ułatwić wyjaśnienie mechanizmu powstawania uszkodzeń i było celem wyznaczenie zakresów odkształceń sprężystych oraz weryfikacji mikroskopowej uszkodzeń liścieni.

### ZAŁOŻENIA TEORETYCZNE

W przypadku interpretacji uszkodzeń powstałych w trakcie ściskania całych nasion określany zostaje skutek wywołany różnymi mechanizmami, co może prowadzić do wyciągania fałszywych wniosków dotyczących wytrzymałości mechanicznej nasion. Badanie deformacji liścieni nasion suchych; a właściwie ich połówek, podyktowane było chęcią wyeliminowania wpływu złożonego mechanizmu uszkodzeń oraz wyodrębnienie właściwości wytrzymałościowych liścieni na wartości pomiarowe.

Ułożenie liścienia podczas ściskania tak, aby płaszczyzna podziału stanowiła płaszczyznę podparcia zapewniało deformację jednostronną oraz symetryczny rozkład naprężeń. W zależności od wielkości deformacji układ ten może prowadzić zarówno do sprężystych jak i trwałych odkształceń, skutkiem których może być powstanie uszkodzenia szczelinowego (Rys. 1) zwanego w technice złomem rozdzielczym [17,18]. Dobrzański [17] przewiduje dwa przypadki powstawania złomu; gdy deformacja sprężysta powoduje złom kruchy oraz gdy powstanie złomu poprzedza trwała deformacja postaciowa.

Trwały charakter deformacji złomu rozdzielczego pozwala zastosować metodę wyznaczenia naprężenia złomu rozdzielczego  $\sigma_{cod}$  w oparciu o zasadę zachowania energii, a właściwie pracy deformacji. W przybliżeniu można przyjąć, że praca deformacji postaciowej czaszy liścienia  $L_{dp}$  określona wyrażeniem:



**Rys. 1.** Deformacja kulistej czaszy liścienia i uszkodzenie szczelinowe (widok z góry).

**Fig. 1.** Deformation of spherical cup of the cotyledon and crack opening displacement (top view).

$$L_{dp} = \frac{(F - F_s)d_p}{2} \quad (1)$$

zostaje zamieniona na pracę  $L_{cod}$ , powodującą powstanie szczeliny:

$$L_{cod} = \frac{\sigma_{cod} A_{cod} d_{cod}}{2} \quad (2)$$

Przyrównując wyrażenia (1) i (2) oraz przekształcając otrzymujemy zależność umożliwiającą wyznaczenie naprężenia złomu rozdzielczego  $\sigma_{cod}$

$$\sigma_{cod} = \frac{(F - F_s)d_p}{A_{cod} d_{cod}} \quad (3)$$

gdzie powierzchnia złomu  $A_{cod}$  zależna jest od liczby szczelin  $n$  oraz średnicy liścienia  $D_w$  i średnicy pola powierzchni kontaktu po deformacji postaciowej  $d_{kp}$ . Podstawiając za  $d_{kp}$  wyrażenie określające średnicę podstawy czaszy deformacji:

$$d_{kp} = 2\sqrt{d_p(D_w - d_p)} \quad (4)$$

oraz porządkując otrzymujemy pole powierzchni złomu rozdzielczego:

$$A_{cod} = \frac{nD_w}{4} \left( \frac{\pi D_w}{4} - 2\sqrt{d_p(D_w - d_p)} \right) \quad (5)$$

Nieznana wielkość szczeliny złomu  $d_{cod}$  dla deformacji postaciowej  $d_p$ , można wyznaczyć z proporcji obwodu podstawy liścienia do jego średnicy oraz obwodu powierzchni kontaktu również do jego średnicy:

$$\frac{\pi D_w + d_{cod}}{D_w} = \frac{\pi(d_{kp} + \Delta d_K)}{d_{kp}} \quad (6)$$

Z powyższej proporcji po przekształceniu otrzymujemy zależność określającą wielkość rozwarcia obwodowego szczeliny złomu rozdzielczego  $d_{cod}$ :

$$d_{cod} = \pi D_w \left( \frac{d_{kp} + \Delta d_K}{d_{kp}} - 1 \right) \quad (7)$$

Nieznany jest natomiast przyrost średnicy pola powierzchni kontaktu  $\Delta d_K$  w trakcie deformacji postaciowej, której górną granicę można w przybliżeniu wyznaczyć zakładając stałą objętość liścienia. Stąd, przyrównując objętość deformowanej czaszy  $V_{cz}$  i objętość spęczenia rdzenia deformacji postaciowej

$V_{cod}$ ; powodującego złom rozdzielczy, wielkości te przyjmują następujące postacie:

$$V_{cz} = \frac{\pi}{2} \left( \frac{d_{kp}}{2} \right)^2 d_p + \frac{\pi}{6} d_p^3 \quad (8)$$

oraz

$$V_{cod} = \pi \left( \frac{D_w}{2} - d_p \right) \left[ \left( \frac{d_{kp} + \Delta d_K}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{kp}}{2} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Przyrównując zależności (8) i (9) oraz przekształcając otrzymujemy wyrażenie przyrostu pola powierzchni kontaktu deformacji postaciowej  $\Delta d_K$ :

$$\Delta d_K = \sqrt{\frac{2d_p \left[ \left( \frac{d_{kp}}{2} \right)^2 + \frac{1}{3} d_p^2 \right]}{\frac{D_w}{2} - d_p}} + d_{kp}^2 - d_{kp}} \quad (10)$$

gdzie do powyższego wyrażenia (10) należy podstawić zależność opisującą średnicę pola powierzchni kontaktu  $d_{kp}$  (4), tak aby wielkość ta zależna była tylko od wielkości mierzonej deformacji osiowej  $d_p$  nasienia o średnicy  $D_w$ . Uproszczając wyrażenie (7) otrzymujemy bardzo prostą zależność określającą wielkość szczeliny złomu  $d_{cod}$  dla deformacji postaciowej  $d_p$ :

$$d_{cod} = \pi D_w \frac{\Delta d_K}{d_{kp}} \quad (11)$$

w której za wielkości  $\Delta d_K$  i  $d_{kp}$  należy podstawić wcześniej przedstawione zależności (4) i (10). Podstawiając zaś do wyrażenia (3) zależności (5) i (11) istnieje możliwość wyznaczenia naprężenia złomu rozdzielczego  $\sigma_{cod}$  dla tych samych wielkości eksperymentalnych czyli deformacji postaciowej liścienia  $d_p$  nasienia o znanej średnicy  $D_w$ .

## MATERIAŁ I METODA

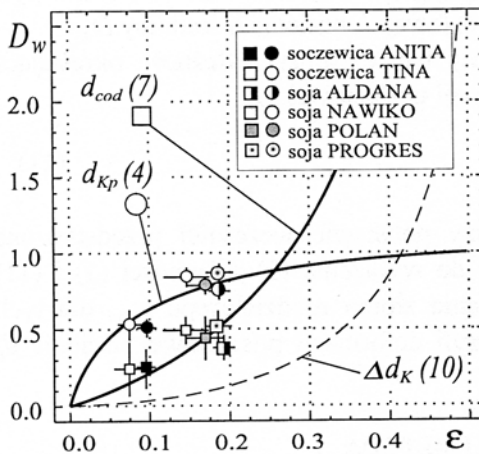
Badania prowadzono na nasionach soi (*Glicine hispida* Max.) następujących odmian: Aldana, Nawiko, Polan i Progres oraz soczewicy (*Lens culinaris* Medic.) odmian: Tina i Anita. Do pomiaru wytrzymałości mechanicznej liścieni zastosowano test ściskania osiowego między równoległymi płytkami. Liścienie ścisniano w kierunku prostopadłym do płaszczyzny podziału.

Testy przeprowadzono przy prędkości przesuwu głowicy 5-100 mm/min, wykorzystując maszynę wytrzymałościową Instron model 6022, rejestrując wielkości mechaniczne odpowiadające deformacji powodującej uszkodzenie: siła  $F$ , deformacja  $d$ , praca  $L$  oraz wyznaczono moduł sprężystości  $E$  w zakresie deformacji sprężystej. Nasiona o wilgotności poniżej 8%, szlifowano, a liścienie dosuszano i po każdej utracie 2% wilgotności ( $w-2\%$ ) wykonywano testy.

Weryfikację fotograficzną uszkodzeń prowadzono w celu określenia charakteru złomu rozdzielczego. Do oceny struktury tkankowej preparaty liścieni nasion roślin strączkowych utrwalano po ich wysuszeniu w punkcie krytycznym (Blazers Union) i napyleniu węglem oraz złotem (JEOL JEE 4X) zgodnie z procedurą opisaną przez Fornala i wsp. [19,20], a analizę mikroskopową wykonano w skaningowym mikroskopie elektronowym JEOL JSM 5200 przy napięciu przyspieszającym 10 keV.

## WYNIKI

Przeprowadzone badania na liścieniach nasion roślin strączkowych pozwoliły zaobserwować charakterystyczne przykłady uszkodzeń szczelinowych, czyli złom rozdzielczy. Zarówno wartości roz-



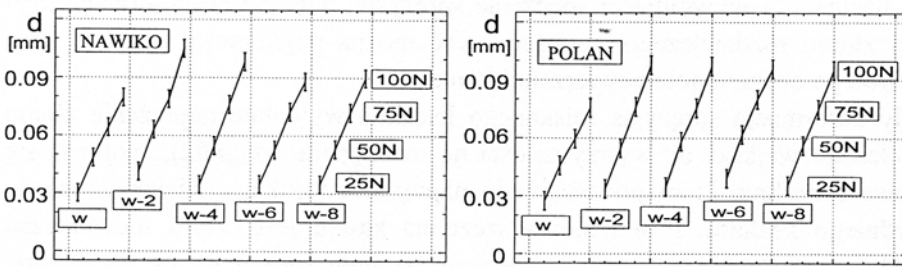
**Rys. 2.** Rozwarcie szczelinowe  $d_{cod}$ , średnica powierzchni kontaktu  $d_{kp}$  i jej przyrost  $\Delta d_K$  podczas deformacji osiowej ( $V=100$  mm/min).

**Fig. 2.** The crack opening displacement  $d_{cod}$ , diameters of contact area  $d_K$  and its increase  $\Delta d_K$  for axial deformation of the cotyledon at 100 mm/min of crosshead move.

zarwania szczelinowego  $d_{cod}$  jak również pola powierzchni kontaktu  $d_{kp}$  - powstałego po deformacji wypukłej czaszy liścienia, uzyskane w teście ściskania osiowego, potwierdzają rozważania modelowe wyznaczone z zależności (7) i (4). Większe, niż dla nasion soczewicy, wartości deformacji nasion soi związane są z wyższą zawartością tłuszczu w liścieniach, a zarazem ich większą plastycznością. Stąd nasiona soi (Rys. 2) ulegają deformacji powodując uszkodzenie przy odkształceniu, którego wartość osiąga 0,2, podczas gdy liścienie soczewicy podlegają zniszczeniu dla odkształceń w przedziale od 0,75 do 0,93.



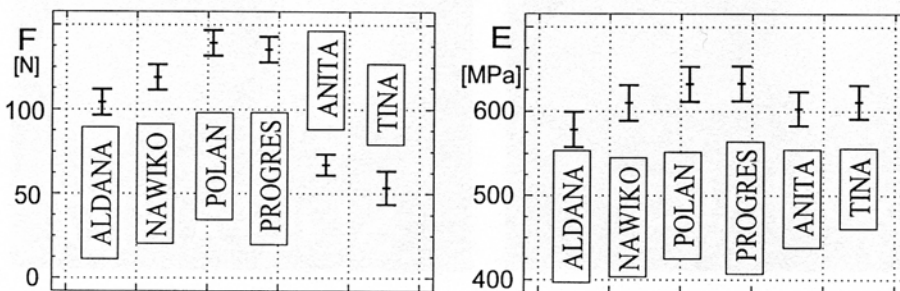
Nasiona soczewicy w zakresie małej wilgotności zachowują się jak ciała sprężyste, natomiast nasiona soi o zwiększonej zawartość tłuszczu cechują się wzrostem plastyczności liścieni. Badanie nasion soczewicy i soi miało również na celu wyznaczenie zakresów deformacji dla różnych wartości sił obciążeń progowych w zakresie odkształceń sprężystych liścieni nasion soi dosuszanych w zakresie wilgotności od 8% do 0% (Rys. 3). Zbliżone wartości deformacji liścieni dosuszanych nasion obu odmian soi Nawiko i Polan, dla wszystkich wilgotności z badanego zakresu, potwierdzają sprężyste właściwości w całym zakresie sił progowego obciążenia.



Rys. 3. Deformacja liścieni nasion soi odmian Nawiko i Polan dla różnych wartości sił obciążeń progowych w zakresie odkształceń sprężystych.

Fig. 3. The cotyledon deformation of Nawiko and Polan soybean for different compression force at elasticity limit.

Wyniki otrzymane podczas ściskania wskazują, że uszkodzenie każdej z odmian powstaje przy różnej sile (Rys. 4), co wskazywałoby na zróżnicowaną wytrzymałość mechaniczną liścieni poszczególnych odmian. Zwłaszcza wartości sił



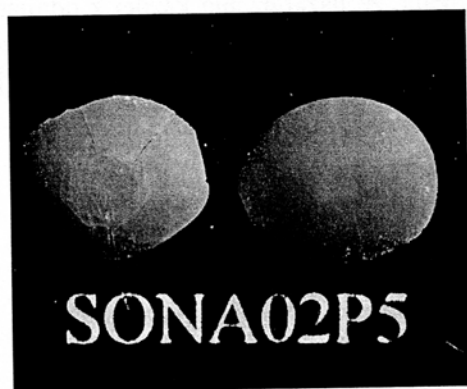
Rys. 4. Siła  $F$  oraz moduł sprężystości  $E$  liścieni nasion soi i soczewicy wyznaczony w teście ściskania osiowego przy prędkości przesuwu głowicy 100 mm/min.

Fig. 4. The force  $F$  and modulus of elasticity  $E$  of soybean and lentil seed determined at axial compression of the cotyledon at 100 mm/min rate of crosshead move.

uzyskane dla obu badanych odmian soczewicy są prawie trzykrotnie (Anita) i ponad dwukrotnie (Tina) mniejsze niż w przypadku badanych odmian soi. Jednak wartości modułu sprężystości wyznaczone w zakresie niewielkiej deformacji osiowej potwierdzają zbliżone cechy materiałowe liścieni badanych odmian.

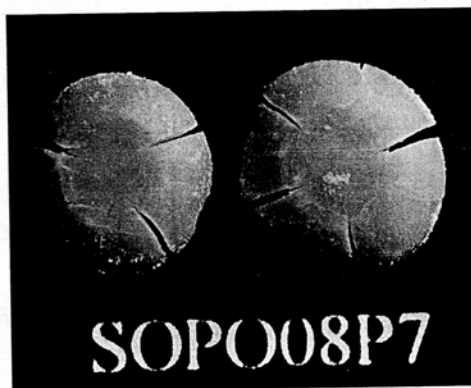
Makroskopowa weryfikacja uszkodzeń stworzyła możliwość łatwiejszego obserwowania charakteru uszkodzeń oraz pozwalała na eksperymentalne wyznaczenie wartości rozwarcia szczeliny  $d_{cod}$ . Dla mniejszych prędkości deformacji zaobserwowano pojedyncze szczeliny, rozchodzące się promieniście. Jednak w przypadku osiowej deformacji sprężystej, nie powodującej zagęszczenia tkanki liścienia, a wywołującej spęczenie sprężyste, większe od deformacji krytycznej złomu rozdzielczego, zaobserwować można pojedynczą szczelinę oraz brak trwałego obszaru pola powierzchni kontaktu.

Gdy deformacja sprężysta ściskanego liścienia wywołuje naprężenie złomu rozdzielczego większe od wytrzymałości na rozciąganie ( $\sigma_{cod} > R_m$ ), pojawia się chwilowa szczelina, która po ustąpieniu naprężenia zanika, a liścień wraca do poprzedniego kształtu. Promieniowa szczelina złomu jest często niewidoczna (Rys. 5), mimo że na wykresie siła-przemieszczenie obserwuje się gwałtowny spadek siły. Jednak interpretacja naprężenia złomu rozdzielczego ze względu na brak trwałych przemieszczeń jest niemożliwa. Dopiero dalszy wzrost obciążenia i trwałe spęczenie centralnej części liścienia powoduje utratę spójności materiału, czyli złom rozdzielczy (Rys. 6). Obserwując powierzchnię kontaktu, zauważyć



**Rys. 5.** Uszkodzenie szczelinowe liścienia nasion soi odmiany Nawiko przy prędkości deformacji 5 mm/min.

**Fig. 5.** The cotyledon crack of Nawiko soybean at 5 mm/min rate of deformation.



**Rys. 6.** Uszkodzenie szczelinowe liścienia nasion soi odmiany Polan przy prędkości deformacji 100 mm/min.

**Fig. 6.** The cotyledon crack of Polan soybean at 100 mm/min rate of deformation.

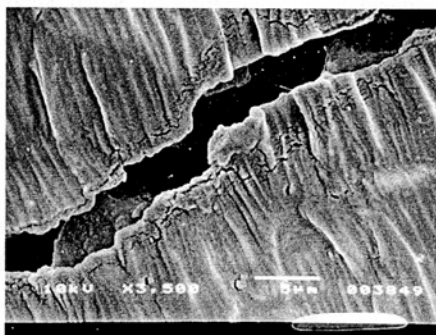
można obszar stałego pola oraz spęczenie tkanki liścienia, które powoduje powstawanie naprężeń złomu rozdzielczego, i dla którego często zaobserwowano regularny podział płaszczyznami złomu co  $180^{\circ}$ ,  $120^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  lub  $60^{\circ}$ .

W przypadku nasion soczewicy uszkodzenia tkanki często są trudne do zaobserwowania i dopiero interpretacja fotografii mikroskopii skaningowej pozwala wyjaśnić przyczynę uszkodzenia. Podobnie dla nasion soi przy prędkościach deformacji (5 mm/min) trudne do zaobserwowania uszkodzenie o gładkiej powierzchni złomu potwierdza 1000-krotne powiększenie (Rys. 7). Na przykładzie złomu sprężystego suchego liścienia, o wilgotności 0%, nasion soi odmiany Nawiko powiększenie 3500-krotne uwidacznia szczelinę złomu rozdzielczego liścienia (Rys. 8), powstałą między ścianami komórek.



**Rys. 7.** Gładka powierzchnia uszkodzenia liścienia nasion soi odmiany Progres.

**Fig. 7.** The smooth surface of cotyledon crack of Progres soybean.



**Rys. 8.** Uszkodzenia szczelinowe liścienia nasion soi odmiany Nawiko.

**Fig. 8.** Crack opening displacement of the cotyledon of Nawiko soybean.

## WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania na liścieniach nasion roślin strączkowych pozwoliły zaobserwować charakterystyczne przykłady uszkodzeń szczelinowych, czyli złom rozdzielczy, a mikroskopowa weryfikacja uszkodzeń umożliwiła zaobserwowanie zmian strukturalnych tkanki uszkodzonych liścieni.
2. Dla mniejszych prędkości deformacji zaobserwowano pojedyncze szczeliny, rozchodzące się promieniście. Obserwując powierzchnię kontaktu, zauważyć można obszar stałego pola powierzchni kontaktu oraz spęczenie tkanki liścienia, które powoduje powstawanie naprężeń złomu rozdzielczego.

3. W przypadku osiowej deformacji sprężystej, nie powodującej zagęszczenia tkanki liścienia, a wywołującej spęczenie sprężyste, większe od deformacji krytycznej złomu rozdzielczego, zaobserwować można pojedynczą szczelinę oraz brak trwałego obszaru pola powierzchni kontaktu.
4. Nasiona soczewicy w zakresie małej wilgotności zachowują się jak ciała sprężyste, natomiast nasiona soi o zwiększonej zawartości tłuszczu cechują się wzrostem plastyczności liścieni, podlegając większej deformacji.

## PIŚMIENNICTWO

1. **Anazodo U.G.N., Chikwendu S.C.:** Poisson's ratio and elastic modulus of radially compressed biomaterials - I: Small deformation approximation. Trans. of the ASAE, 923-929, 1983.
2. **Arnold P.C., Mohsenin N.N.:** Proposed techniques for axial compression tests on intact agricultural products of convex shape. Trans. of the ASAE, 14, 78-84, 1971.
3. **Bhatty R.S.:** Composition and quality of lentil (*Lens culinaris* Medic.). A Review, Can. Inst. Food Sci. Technol. J., 21, 2, 144, 1988.
4. **Bhatty R.S.:** Relationship between physical and chemical characteristics and cooking quality in lentil. J. Agric. Food Chem., 32, 1161, 1984.
5. **Bilanski W.K.:** Mechanical properties of soyabeans. Physical Properties of Agricultural Materials and Products. Hemisphere Publ. Co., 363-368, 1988.
6. **Chikwendu S.C., Anazodo U.G.N.:** Poisson's ratio and elastic modulus of radially compressed biomaterials -II: Large deformation approximation. Trans. of the ASAE, 1563-1572, 1984.
7. **Dobrzański B., Szot B.:** Strength of pea seeds during compression. Proceedings of the 4-ICPP of Agricultural Materials, Rostock, Niemcy, 144-148, 1989.
8. **Dobrzański B.:** Theoretical model of large deformation of compressed rapeseed. Proceedings of 8-GCIRC Rapeseed Congress, Saskatoon, Canada, v.4, 1261-1266, 1991.
9. **Dobrzański B., Szot B.:** Mechanical properties of pea seed. Agricultural Engineering and Rural Development, A Pergamon-CNPIEC Joint Venture, Beijing, China, II, D, 12-16, 1992.
10. **Dobrzański B.:** Germination capacity of compressed pea seed. Zesz. Prob. Post. Nauk Rol., 399, 31-34, 1993.
11. **Dobrzański B.:** Geometrical dependences of seed shell of compressed pea. Int. Agrophysics, 7, 259-264, 1993.
12. **Dobrzański B., Horabik J.:** Strain as a factor of mechanical strength of pea seed. XII ICAE, AgEng'94, Milano, 2, 905-906, Report N. 94-G-071, 1-8, 1994.

13. **Dobrzański B., Rybczyński R.:** Mechanical properties of leguminous seeds. Agric. & Biol. Eng. Conf., Newcastle, 4.4, 1-2, 1995.
14. **Dobrzański, jr B.:** The influence of moisture content on the shape deformation of soybean. AgEng' 96, Madrid, 962-963, paper: 96F-082, 1-7, 1996.
15. **Dobrzański, jr B., Szot B.:** Strength of pea seed cover. Int. Agrophysics, 11, 301-306, 1997.
16. **Dobrzański, jr B.:** Elasticity strain limit for leguminous seeds. Book of Abstracts of 6<sup>th</sup> ICA, v1, 29-32, 1997.
17. **Dobrzański, jr. B.:** Mechanizmy powstawania uszkodzeń nasion roślin strączkowych. Acta Agrophysica, 13, 1-98, 1998.
18. **Dobrzański, jr. B.:** The cracking mechanisms of the legume seeds. CD-ROM of AgEng'2000 papers, Paper: 00-PH-050, 1-10, Warwick, 2, 2000., p.111-112.
19. **Fornal J., Kaczyńska B., Sadowska J., Rutkowski A.:** Nasiona soczewicy. I. Mikrostruktura i jej związek z technologiczną przydatnością nasion. Acta Acad. Agricult. Tech. Olst., Technol Aliment, 25, 97-106, 1993.
20. **Fornal J., Kaczyńska B., Sadowska J.:** Nasiona soczewicy. II. Reologiczne właściwości nasion i ich zmiany w czasie gotowania. Acta Acad. Agricult. Tech. Olst., Technol Aliment, 25, 107-114, 1993.
21. **Herum F.L., Mensah J.K., Barre H.J., Majidzadeh K.:** Viscoelastic behavior of soybeans due to temperature and moisture content. Trans. of the ASAE, 1219-1224, 1979.
22. **Laskowski J., Skonecki S.:** The influence of moisture on the physical properties and parameters of the compression process of legumes' seeds. Int. Agrophysics, 11, 245-254, 1997.
23. **Liu M., Haghghi K., Stroshine R.L., Ting E.C.** Mechanical properties of the soybean cotyledon and failure strength of soybean kernels. Trans. of the ASAE, 33, 2, 559-566, 1990.
24. **Mac Donald, Jr. M.B.:** Physical seed quality of soybean. Seed Sci. Technol., 13, 601-628, 1985.
25. **Milczak M.:** An integrating case spontaneous mutation in lentil (*Lens culinaris* Medic.). Genetica Polonica, 31, 213-216, 1990.
26. **Misra R., Young J.H.:** A model for predicting the effect of moisture content on the modulus of elasticity of soybeans. Trans. of the ASAE, 24, 5, 1338-1341, 1981.
27. **Paulsen M.R.:** Fracture resistance of soybeans to compressive loading. Trans. of the ASAE, 1210-1216, 1978.
28. **Palusen M.R., Nave W.R., Gray L.E.:** Soybean seed quality as affected by impact damage. Transaction of the ASAE, 24, 6, 1577-1582, 1589, 1981.
29. **Palusen M.R., Nave W.R., Mounts T.L., Gray L.E.:** Storability of harvest-damaged soybeans. Trans. of the ASAE, 24, 6, 1583-1589, 1981.
30. **Szot B., Stępniewski A.:** Mechaniczne właściwości pojedynczych nasion polskich odmian soczewicy. II Zjazd Naukowy PTA, Lublin-Dąbrowica, 276-277, 2000.

31. Szot B., Stępniewski A.: Niektóre właściwości fizyczne nasion polskich odmian soczewicy. Acta Agrophysica, 46, 187-196, 2001.
32. Szot B., Stępniewski A.: Agrophysical approach to lentil seeds. PMA, Prague, 227-228, 2001.

## THE MICROSCOPIC VERIFYFICATION OF COTYLEDON CRACKING MECHANISM OF SOYBEAN AND LENTIL SEED

*B. Dobrzański, jr, B. Szot*

B. Dobrzański Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences  
Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27  
bdob@demeter.ipan.lublin.pl

**Summary.** The moisture content of the seed coat and cotyledon influences the cracking mechanism of the legume seeds. Dry seed during compression is only slightly deformed and damage is mostly connected with cotyledon cracking. The objectives of this study were to determine the elasticity strain limit of soybean (*Glicine hispida* Max.), and lentil seed (*Lens culinaris* Medic.), and to verify a model describing cotyledon cracking mechanism. The resistance of seeds to compression was studied at low moisture content only. Every single cotyledon was compressed and force-deformation curve was obtained at different rates of deformation to determine the effect of load rate on the strain and stress development. For large displacement, a spherical cup of cotyledon was deformed to the circle contact area that regular cracks around core were observed. However, for low rate of axial deformation, compression caused one crack, that after unloading was frequently invisible. The results obtained at compression test shows different values of damage force for each cultivar. It looks apparent that strength is also different. However, the modulus of elasticity is at similar level and there is no significance difference for most cultivars. It shows that the cotyledon for all rate of load at the elasticity deformation achieves the same value.

**Key words:** Lentil seeds, soybean, deformation, cotyledon cracking, microscopy verification.

---

Autorzy pragną wyrazić podziękowanie Zespołowi z Zakładu Fizycznych Właściwości Żywności Oddziału Nauki o Żywności IRZiBŻ PAN w Olsztynie za wykonanie dokumentacji fotograficznej uszkodzeń liścieni nasion oraz za pomoc przy analizie strukturalnej obrazów mikroskopii skaningowej.