Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie

ACTA AGROPHYSICA

13

Bohdan Dobrzański jr

MECHANIZMY POWSTAWANIA USZKODZEŃ NASION ROŚLIN STRĄCZKOWYCH

Lublin 1998

Komitet redakcyjny
prof. dr hab. Jan Gliński, czł, koresp. PAN
prof. dr hab. Krystyna Konstankiewicz
doc. dr hab. Ryszard Dębicki

Opiniował do druku
prof. dr hab. Józef Fornal
prof. dr hab. Janusz Laskowski

Adres redakcji
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201, 20-290 Lublin 27
tel. (0-81) 744-50-61, e-mail fundacja@demeter.ipan.lublin.pl

Publikacja indeksowana przez
POLISH SCIENTIFIC JOURNALS CONTENTS - AGRIC. & BIOL. SCI.
w sieci INTERNET pod adresem http://saturn.ci.uw.edu.pl/psjc/
lub http://ciuw.warman.net.pl/alf/psjc/

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr 5 S306 010 06
finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 1994-1997

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 1998

ISBN 83-87385-14-X
ISSN 1234-4125

Wydanie I. Nakład 100 egz. Ark. wyd. 7,2
Grafika i skład komputerowy: B. Dobrzański jr
(Projekt okładki IA PAN)
Druk: "Tekst", ul. 1 Maja 51, 20-410 Lublin

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP 9
2. CEL PRACY 11
3. MATERIAŁ 12
4. PROPONOWANE MODELE POWSTAWANIA NAPRĘŻEŃ NISZCZĄCYCH 13
4.1. Deformacja postaciowa nasion - model naprężeń rozciągających w okrywie 14
4.1.1. Ułożenie równoległe osi obciążenia względem płaszczyzny podziału liścieni 14
4.1.2. Ułożenie dowolne osi obciążenia względem płaszczyzny podziału liścieni 19
4.2. Deformacja sprężysta nasion - model uszkodzenia szczelinowego liścieni . 21
4.3. Połówkowanie nasion - model naprężeń ścinających w okrywie 25
4.4. Suszenie nasion - model naprężeń skurczu okrywy 27
5. METODY EKSPERYMENTALNE 31
5.1. Metody oceny wpływu wilgotności na zmiany objętościowe nasion 32
5.1.1. Pomiary geometryczne pęczniejących i suszonych nasion 33
5.1.2. Ekstensometryczny pomiar deformacji skurczu okrywy 33
5.2. Określanie wpływu okrywy na przebieg suszenia nasion 34
5.3. Badanie właściwości mechanicznych liścieni 34
5.4. Makro- i mikroskopowa weryfikacja uszkodzeń 34
5.5. Badanie właściwości mechanicznych okrywy nasiennej 35
5.5.1. Test rozciągania okrywy 36
5.5.2. Statyczny pomiar naprężenia skurczu okrywy 36
5.6. Właściwości mechaniczne nasion 37
5.6.1. Test połówkowania nasion 38
5.6.2. Test ściskania nasion 38
6. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH 40
6.1. Zmiany geometryczne w trakcie nawilżania i suszenia nasion 41
6.2. Wpływ okrywy na przebieg suszenia nasion 44
6.3. Skurcz i naprężenia suszonej okrywy 45
6.4. Właściwości mechaniczne okrywy w testach rozciągania 50
6.5. Właściwości mechaniczne liścieni 55
6.6. Makro- i mikroskopowa ocena przyczn powstawania uszkodzeń 62
6.7. Właściwości mechaniczne nasion w testach połówkowania 67
6.8. Właściwości mechaniczne nasion oraz okrywy w testach ściskania 69
7. ANALIZA PRZYCZYN POWSTAWANIA USZKODZEŃ 75
8. WNIOSKI 86
9. LITERATURA 88
SUMMARY 96

SPIS OZNACZEŃ

a - wymiar nasienia wzdłuż podziału liścieni i położenia zarodka	[mm]
b - wymiar nasienia wzdłuż podziału liścieni, prostopadle do zarodka	[mm]
c - wymiar nasienia prostopadle do płaszczyzny podziału liścieni	[mm]
m - masa nasienia	[g]
d - deformacja	[mm]
d_s - deformacja sprężysta nasion	[mm]
d_p - deformacja postaciowa wilgotnych nasion bez naprężania okrywy	[mm]
d_o - deformacja postaciowa wilgotnych nasion do rozerwania okrywy	[mm]
d_{cwd} - deformacja postaciowa złomu rozdzielczego liścieni	[mm]
d_K - średnica pola powierzchni kontaktu	[mm]
d_{Ks} - średnica pola powierzchni kontaktu deformacji sprężystej	[mm]
d_{Kp} - średnica pola powierzchni kontaktu deformacji postaciowej	[mm]
A_K - pole powierzchni kontaktu	[mm^2]
V_{cz} - objętość deformacji postaciowej czaszy liścienia	[mm^3]
V_{cwd} - objętość spęczenia postaciowego liścienia	[mm^3]
k_K - łuk czaszy deformacji postaciowej nasion wilgotnych	[mm]
k_{Kp} - łuk czaszy deformacji postaciowej nasion suchych	[mm]
k_{Ks} - łuk czaszy deformacji sprężystej nasion suchych	[mm]
d_U - średnica pola powierzchni kontaktu wzdłuż kierunku uślizgu liścieni	[mm]
U - przemieszczenie wzdłuż kierunku uślizgu liścieni	[mm]
k_U - łuk powierzchni liścieni bez kontaktu z okrywą w trakcie uślizgu	[mm]
D_P - średnica nasion w deformacji modelowej o zarysie parabolicznym	[mm]
D_K - średnica nasion w deformacji modelowej o zarysie kulistym	[mm]
R - promień powierzchni bocznej deformacji o zarysie kulistym	[mm]
s' - odległość środka promienia powierzchni bocznej od osi obciążenia	[mm]
D_v - średnica nasion w kierunku obciążenia przed deformacją	[mm]
D_z - średnica nasion z okrywą - zewnętrzna okrywy	[mm]
D_w - średnica nasion bez okrywy - wewnętrzna okrywy	[mm]
D_o - średnica nasion prostopadła do kierunku obciążenia przed deformacją	[mm]
D_h - średnica nasion prostopadła do kierunku obciążenia po deformacji	[mm]
DD - przyrost średnicy w płaszczyźnie działania ekstensometru	[mm]
DD_h - przyrost średnicy w zakresie rozciągania okrywy nasiennej	[mm]
D_S - średnica suchej okrywy nasion o zarysie kulistym	[mm]
D_W - średnica wilgotnej okrywy nasion o zarysie kulistym	[mm]
r_w - promień nasion wewnątrz okrywy	[mm]
r_z - promień zewnętrzny nasion	[mm]
S_K - pole powierzchni nasion o zarysie kulistym	[mm^2]
V_K - objętość liścieni wewnątrz okrywy nasion o zarysie kulistym	[mm^3]
V_{Ks} - kulista objętość wewnętrzna okrywy suchej	[mm^3]
V_{Kw} - kulista objętość wewnętrzna okrywy wilgotnej	[mm^3]
S_{BK} - powierzchnia okrywy nasion w deformacji o zarysie kulistym	[mm^2]

S_{BP} - powierzchnia okrywy nasion w deformacji o zarysie parabolicznym	[mm^2]
F - siła rejestrowana w testach wytrzymałościowych	[N]
F_s - siła w zakresie deformacji sprężystej	[N]
F_h - siła w zakresie rozciągania okrywy	[N]
F_u - siła w zakresie deformacji powodującej uszkodzenie okrywy	[N]
F_p - siła uślizgu liścieni nasion wilgotnych	[N]
F_o - siła rozciągająca okrywę w trakcie uślizgu liścieni nasion wilgotnych	[N]
α - kąt zawarty pomiędzy płaszczyzną uślizgu liścieni a osią obciążenia	[^{0}]
β - kąt zawarty pomiędzy płytą podporową a płaszczyzną uślizgu liścieni	[^{0}]
ν - współczynnik Poissona	[-]
ε - odkształcenie	[-]
ε_1 - przewężenie lub spęczenie	[-]
σ - naprężenie	[MPa]
R_e - granica plastyczności	[MPa]
R_m - granica wytrzymałości na rozciąganie	[MPa]
k_r - naprężenie dopuszczalne na rozciąganie	[MPa]
σ_k - średnie naprężenie na powierzchni kontaktu	[MPa]
σ_u - naprężenie niszczące	[MPa]
σ_{cod} - naprężenie złomu rozdzielczego	[MPa]
A_{cod} - pole powierzchni złomu rozdzielczego	[mm^2]
τ - naprężenie styczne w ścinanym przekroju	[MPa]
A_s - pole przekroju ścinanej próbki okrywy	[mm^2]
V_p - prędkość deformacji udarowej w procesie połówkowania	[mm/min]
E - moduł sprężystości liścieni	[MPa]
E_{os} - moduł sprężystości (test ściskania całych nasion)	[MPa]
E_o - moduł sprężystości okrywy (test rozciągania okrywy)	[MPa]
E_{jp} - moduł sprężystości okrywy (test połówkowania nasion)	[MPa]
E_{om} - moduł sprężystości okrywy wyznaczony z wyliczeń modelowych	[MPa]
p_p - ciśnienie deformacji postaciowej	[MPa]
p_z - ciśnienie zewnętrzne	[MPa]
p_w - ciśnienie wewnętrzne	[MPa]
Dp_w - przyrost ciśnienia wewnętrznego	[MPa]
g - grubość okrywy nasiennej	[mm]
r_c - promień walca uchwytów	[mm]
σ_o - naprężenie obwodowe	[MPa]
σ_r - naprężenie promieniowe	[MPa]
l_o - długość początkowa rozciąganej okrywy w testach rozciągania	[mm]
w_o - szerokość paska rozciąganej okrywy	[mm]
A_o - pole przekroju próbki rozciąganej okrywy	[mm^2]
ε_o - odkształcenie obwodowe okrywy, wydłużenie	[-]
l_s - długość początkowa okrywy podlegająca skurczowi w trakcie suszenia	[mm]
ε_s - odkształcenie skurczu okrywy	[-]

σ_s - naprężenie skurczu suszonej okrywy	[MPa]
ω_w - współczynnik strefy kontaktu okrywy suszonych nasion w warstwie	[-]
ω_z - współczynnik strefy kontaktu okrywy suszonych nasion na warstwie	[-]
L - praca w zakresie deformacji niszczącej	[mJ]
L_{dp} - praca deformacji postaciowej czaszy liścienia	[mJ]
L_{cod} - praca deformacji złomu rozdzielczego	[mJ]
V_o - liniowa prędkość omłotowa	[m/s]
W - wilgotność (procentowa zawartość masy wody)	[%]

Oznaczenia dodatkowe stosowane na rysunkach:

- prędkość deformacji:

1 - 1	[mm/min]
5 - 5	[mm/min]
7 - 20	[mm/min]
8 - 50	[mm/min]
9 - 100	[mm/min]
2v - 200	[mm/min]
4v - 400	[mm/min]
6v - 600	[mm/min]
8v - 800	[mm/min]
0v - 1000	[mm/min]

- parametry wylotowe czynnika suszącego T_{fv} (temperatura; prędkość):

I, Iw - (22; 10.5)	[^{0}C; m/s]
II, IIw - (22; 15.6)	[^{0}C; m/s]
III, IIIw - (42; 4.3)	[^{0}C; m/s]
IV, IVw - (52; 10.5)	[^{0}C; m/s]
V, Vw - (62; 15.4)	[^{0}C; m/s]

- wilgotność nasion dosuszanych:

w - wilgotność nasion wyjściowa	[%]
w-2 - wilgotność obniżona o 2%	[%]
w-4 - wilgotność obniżona o 4%	[%]
w-6 - wilgotność obniżona o 6%	[%]
w-8 - wilgotność obniżona o 8%	[%]

- progowe wartości sił pomiaru deformacji sprężystej:

25 N - 25 N od początku narastania siły	[N]
50 N - 50 N od początku narastania siły	[N]
75 N - 75 N od początku narastania siły	[N]
100 N - 100 N od początku narastania siły	[N]

- Kody odmian nasion roślin strączkowych badanych gatunków:

bób:
BBBA - BARTOM
BBWB - WINDSOR BIAŁY

bobik:
BOBR - BRONTO
BODI - DINO
BOTI - TIBO
BOTO - TOM
BOSK - ród Sk 4539
BONA - NADWIŚLAŃSKI

groch:
GRAG - AGAT
GRDI - DIAMENT
GRMI - MIKO
GROP - OPAL
GRSZ - SZEŚCIOTYGODNIOWY
GRME - METEOR
GRPO - POLAR
GRAP - APATYT
GRFI - FIDELIA
GRGO - GOMIK
GRHE - HELIA

fasola:
FASA - SARA 5
FASE - SEGAL
FALA - LAURA
FATA - TARA
FA86 - ród M-86
FAPR - PROSNA
FAIG - IGOŁOMSKA
FALO - LONGINA
FAPO - POLANKA
FANI - NIDA
FAEU - EUREKA
FABL - BLANKA

soja:
SOPO - POLAN
SOPR - PROGRES
SONA - NAWIKO
SOAL - ALDANA

1. WSTĘP

Rośliny strączkowe uprawiane są od kilku tysięcy lat na różnych kontynentach kuli ziemskiej. Do najbardziej rozpowszechnionych należą: fasola (Phaseolus vulgaris), soja (Glycina max.), groch (Pisum sativum) i w mniejszym stopniu bób (Vicia faba), czy soczewica (Lens esculenta) [82, 142, 149]. W żywieniu ludności stosowane są potrawy z nasion świeżych jako warzywa bądź suchych poddanych obróbce termicznej. Spożycie potraw z roślin strączkowych w dużej mierze uzależnione jest od tradycji i zwyczajów żywieniowych. W Europie wysokie spożycie nasion roślin strączkowych obserwuje się wśród ludności krajów Bałkańskich, gdzie w Bułgarii kształtuje się na poziomie 5 kg rocznie na osobę, a w Turcji sięga nawet do 14 kg. W Polsce już w latach 1950-1960 spożycie roczne osiągało średnio wartości 3 do 4 kg rocznie na osobę [40].

Skład chemiczny nasion roślin uprawnych zależy od gatunku i odmiany jak też od warunków uprawy [80, 82, 142], stadium dojrzałości a także długości okresu wegetacyjnego. Wśród wszystkich roślin uprawnych najwięcej białka zawierają suche nasiona roślin strączkowych (fasola - 17÷32 %, groch - 20÷34 %, soja - 27÷40 %). Dla porównania nasiona zbóż zawierają od 9 do 18 % białka, a bulwy roślin okopowych zaledwie od 1 do 2 % białka. Wskaźniki wykorzystania białka netto (NPU białka) ulegają podwyższeniu po poddaniu nasion obróbce termicznej (NPU białka soi -70.5 %, NPU białka grochu żółtego - 61.9 %, NPU białka grochu zielonego 64.5 %, NPU białka fasoli - 56.2 %, NPU białka roślin zbożowych - 35.0÷40.0 %). W przetwórstwie spożywczym i w przemyśle farmaceutycznym znajdują zastosowanie określone formy preparatów białek roślinnych głównie soi w postaci mąki, kaszki, koncentratów i izolatów białkowych, białka uwłóknionego, ekstrudowanych wyrobów białkowych, analogów mięsa oraz preparatów dietetycznych. Soja dodatkowo zawiera około 20 % tłuszczu, stąd nasiona tej rośliny znalazły zastosowanie w produkcji tłuszczu jadalnego. Pozostałe nasiona roślin strączkowych zawierają niewielką ilość tłuszczu w zakresie 1.4÷1.6 %. Węglowodany nasion występują w trzech formach: skrobi i związków polisacharydowych, monosacharydów i oligasacharydów. Zawartość skrobi w ziarnach fasoli, grochu, bobu wynosi ok. 40 % podczas gdy w ziarnach soi nie ma skrobi. Nasiona roślin strączkowych są dobrym źródłem witamin z grupy B, jak witaminy B_1-tiaminy, witaminy B_2-ryboflawiny, witaminy B_6-pirodoksyny oraz niacyny. Świeże nasiona są również źródłem β-karotenów i witaminy C. Reasumując, nasiona roślin strączkowych takich jak: fasola, soja, groch, soczewica, bób, bobik, stanowią jedno z głównych źródeł białka roślinnego w żywieniu człowieka i zwierząt [40, 82, 142].

Wśród roślin warzywnych rośliny strączkowe zajmują ponad 1/3 ogólnej powierzchni upraw plantacji nasiennych w Polsce [6, 25, 149]. Produkcja nasion roślin strączkowych w coraz większym stopniu jest zmechanizowana. Stosowany dawniej zbiór wieloetapowy został prawie całkowicie zastąpiony w pełni zmechanizowanym zbiorem kombajnowym w większości upraw nasiennych. Coraz częściej stosowane są również kombajny specjalistyczne przeznaczone do zbioru nasion tylko jednego gatunku. Nasiona podczas zbioru i omłotu poddawane są obciążeniom mechanicznym, a przekroczenie deformacji krytycznej wywołuje często powstawanie naprężeń niszczących. Okrywa nasion roślin strączkowych ulega uszkodzeniu również podczas suszenia nasion w nieodpowiednich warunkach. W przypadku eksportu wysokie normy sięgające często zaledwie 2÷3 % uszkodzeń dyskwalifikują całkowicie olbrzymie partie cennych nasion. Procent

uszkodzonych nasion świadczy nie tylko o obniżeniu plonu globalnego i decyduje o klasyfikacji materiału nasiennego, ale również odpowiada za zdrowotność nasion a uszkodzenia okrywy nasiennej są główną przyczyną przedostawania i rozprzestrzeniania się chorób grzybowych [6, 65, 82, 97, 119, 149].

W trakcie zbioru nasiona poddawane są wielokrotnym obciążeniom, najczęściej podczas omłotu oraz przemieszczania w podajnikach ślimakowych [3, 42, 43, 53, 55, 56, 60, 64, 73, 119]. Nasiona roślin strączkowych narażone są na uszkodzenia; w szczególności na uszkodzenia okrywy, zarówno podczas zbioru [23-27, 29-32, 41-44, 121, 122, 133-137] jak również podczas ich suszenia [13, 37, 41-44, 74-76, 81, 113-115, 125-127]. Uszkodzenia powstają w wyniku naprężeń wywołanych mechanicznymi obciążeniami [72, 93-95, 120, 128, 129] lub zmianą wilgotności [7, 24, 37, 45, 49, 61, 79, 80, 91, 108, 150] czy temperatury [76, 90, 113, 127, 137, 138]. Overhults i inni [114] zaobserwowali, że głównym problemem podczas suszenia nasion soi jest występowanie nasion o pękniętej okrywie. Przyczyny powstawania pęknięć tłumaczą gwałtownymi spadkami wilgotności podczas suszenia powietrzem o wysokiej temperaturze. W dotychczasowych badaniach nasion roślin strączkowych oprócz autora, Liu i inni [98, 99], Mensah i inni [101], Misra i inni [107-109], Palusen i inni [117-119] oraz White i inni [146, 147] zajmowali się problemem uszkodzeń okrywy, lecz prace te prezentowane w czasopismach amerykańskich takich jak Transaction of the ASAE, dotyczyły głównie soi - rośliny ważnej dla rynku Ameryki.

Wcześniejsze prace [23, 30, 35, 72] dotyczące opisu zachowania nasion o kształcie kulistym, jakimi są nasiona grochu i rzepaku pozwoliły na wyznaczenie naprężeń powstających w okrywie podczas ściskania całych nasion. Zaobserwowano również, że zmiana kształtu nasion soi [44-46] może wywoływać naprężenia w okrywie, a wytrzymałość okrywy może istotnie wpływać na wytrzymałość całych nasion grochu [35]. Stworzyło to podstawę do opracowania metod określania przyczyn powstawania uszkodzeń nasion roślin strączkowych.

Prawidłowa ocena przyczyn powstawania uszkodzeń nasion roślin strączkowych wymaga poznania właściwości fizycznych nasion i ich okrywy w szerokim zakresie zmian wilgotności. W pierwszym rzędzie najistotniejsze wydaje się sprawdzenie zachowania się nasion w warunkach obciążeń mechanicznych dla odmian polskich będących w Rejestrze Odmian, tak aby uzyskane informacje mogły służyć hodowcom w doborze nowych odmian przydatnych do mechanicznego zbioru. Poznanie mechanizmów powstawania uszkodzeń nasion roślin strączkowych może poważnie ograniczyć straty materiału nasiennego, poprawić jego jakość, zależną często od metod zbioru i dalszej obróbki, co powinno wpłynąć na ich wartość handlową, a niejednokrotnie ratować cenne partie nasion przed ich dyskwalifikacją jako materiału siewnego.

2. CEL PRACY

Rośliny strączkowe uprawiane są na suche ziarno jako materiał konsumpcyjny lub siewny oraz w postaci świeżych nasion do bezpośredniego spożycia i przetwórstwa, a także na pasze i mieszanki przemysłowe. Tak szerokie przeznaczenie sprawia, że nasiona w trakcie wegetacji i obróbki pozbiorczej znajdują się w zmiennych warunkach zewnętrznych, a obciążenia mechaniczne i zmiany wilgotności w największym stopniu mogą wpływać na powstawanie uszkodzeń nasion i ich okrywy.

Wpływ wilgotności na zmianę właściwości mechanicznych nasion powoduje lokalne zróżnicowanie wytrzymałości mechanicznej liścieni i okrywy a zarazem niejednakową odporność na uszkodzenie. Dotychczas prowadzone w Instytucie Agrofizyki PAN badania właściwości mechanicznych nasion grochu, soi i rzepaku [18-49, 72, 140, 141] pozwoliły zaobserwować ich złożoną wytrzymałość, oraz wpływ okrywy nasiennej na całkowitą wytrzymałość mechaniczną nasion. Podobna budowa nasion wszystkich roślin strączkowych stwarza szansę opracowania jednolitej interpretacji wyników dla pozostałych gatunków roślin strączkowych, ocenę badanych odmian i wyróżnienie niektórych pod kątem ich wytrzymałości mechanicznej, a uzyskane wyniki mogą stanowić wskazówki dla hodowców oraz bazę danych zawierającą wielkości wytrzymałościowe, przydatne jako założenia konstrukcyjne parametrów pracy maszyn.

Głównym celem pracy było opracowanie metod oceny właściwości mechanicznych nasion roślin strączkowych oraz wyjaśnienie przyczyn powstawania uszkodzeń. Realizacja przyjętego celu wymagała sprawdzenia następujących hipotez roboczych:

- czy istnieją warunki, dla których w nieobciążonych nasionach występują naprężenia w okrywie, jeżeli tak to czy mogą powodować uszkodzenia,
- czy istnieją odkształcenia postaciowe wilgotnych lepko-sprężystych liścieni wywołujące naprężenia okrywy i w jakim zakresie są niszczące,
- w jakim zakresie odkształcenia suchych sprężystych nasion wywołują pęknięcie nasion lub okrywy.

Powyższe hipotezy sprawdzano realizując zadania badawcze, których celem było:

- Wyznaczenie zmian postaciowych i objętościowych nasion badanych gatunków w szerokim zakresie wilgotności.
- Badanie wpływu zakresu deformacji na powstawanie naprężeń i odkształceń niszczących w nasionach roślin strączkowych.
- Badanie wpływu zmian wilgotności nasion na skurcz i powstawanie naprężeń w okrywie nasiennej.
- Weryfikowanie uszkodzeń oparte o mikroskopową i fotograficzną ocenę budowy anatomicznej okrywy nasiennej oraz przełomu liścieni nasion roślin strączkowych.
- Sprawdzenie zakresu stosowalności podstawowych praw fizyki dotyczących ciał sprężystych dla nasion suchych i ich okrywy.
- Interpretowanie zjawiska połówkowania nasion w oparciu o wyznaczenie pracy deformacji w zakresie dużych prędkości przemieszczenia elementów zgniatających.

Wyjaśnienie przyczyn powstawania uszkodzeń podczas zbioru, omłotu, transportu, suszenia i przechowywania, może prowadzić do realizacji celu praktycznego czyli do ograniczenia strat i poprawy jakości w każdym etapie cyklu produkcyjnego nasion roślin strączkowych.

3. MATERIAŁ

Do badań wybrano nasiona pięciu gatunków roślin strączkowych: bobiku, bobu, fasoli, grochu i soi. Zalecone przez Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych w Słupii Wielkiej odmiany oraz rody, jako warte oceny pod kątem powstawania uszkodzeń okrywy nasiennej, posiadały nasiona zróżnicowane pod względem wielkości, kształtu i stopnia pomarszczenia okrywy. Zaproponowane przez COBORU nasiona odmian badanych gatunków otrzymywano w latach 1993÷96, a nasiona te w stopniu elity i superelity pochodziły z przedsiębiorstw oraz Stacji Hodowli Roślin Ogrodniczych odpowiedzialnych za reprodukcję nasion poszczególnych odmian. Do badań pobrano nasiona z klas najbardziej reprezentatywnych dla poszczególnych odmian, dla których oznaczono masę 1000 nasion (wartości średnie M_{1000} podano w nawiasach przy nazwie odmiany):

bobik: Bronto (465.6 g) , Dino (664.0 g), Nadwiślański (336.4 g), Tibo (497.2 g), Tom (546.0 g) oraz ród Sk 4539 (438.0 g)

bób: Bartom (1448.0 g) i Windsor Biały (2070.0 g)

groch siewny (na suche nasiona):

- odmiany jadalne: Agat (246.0 g), Diament (220.0 g), Miko (248.0 g) i Opal (274.0 g)
- odmiany pastewne: Fidelia (160.4 g), Gomik (240.4 g) i Helia (116.0 g)
- odmiany warzywne (łuskowe):
  - o nasionach gładkich: Sześciotygodniowy (220.0 g)
  - o nasionach pomarszczonych:
    - wczesne: Meteor (201.6 g) i Polar (166.8 g)
    - średniowczesne: Apatyt (126.8 g)

fasola zwyczajna:

- odmiany karłowe szparagowe:
  - zielonostrąkowe: Sara 5(151.2 g) i Segal (246.4 g)
  - żółtostrąkowe: Laura (180.4 g) i Tara (167.2 g) i ród M-86 (239.2 g)
- odmiany karłowe na suche nasiona:
  - o nasionach średnich: Prosna -RAH 489 (328.4 g)
  - o nasionach dużych: Igołomska (351.2 g), Longina (648.8 g) i Polanka (398.0 g)
    - o nasionach barwnych: Nida -RAH 389 (320.4 g)

fasola wielokwiatowa: Eureka (789.6 g) i Blanka -SzF 290 (729.6 g)

soja: Aldana (136.0 g), Nawiko (114.8 g), Polan (139.2 g) i Progres (158.0 g)

Nasiona wszystkich odmian przechowywano w tych samych warunkach w magazynie o wilgotności względnej powietrza poniżej 30 %, doprowadzając do wyrównania wilgotności równoważnej [65, 66, 97] nasion większości odmian do poziomu 8÷10 %, a nasion soi badanych odmian nawet do 7÷8 %. Nasiona przechowywane oraz dosuszane do niższych wartości określono jako suche, zaś nasiona o wilgotności powyżej 14 % oraz wtórnie nawilżone do wyższych poziomów określono jako wilgotne.

Wilgotność nasion W, określoną za Lityńskim [97] oraz Grzesiukiem i Kulką [65] jako procentową zawartość masy wody do całkowitej masy nasion, wprowadzono w całej pracy, stosując jednolite oznaczenie zgodne również z praktyką produkcji nasiennej.

We wszystkich testach dotyczących nasion, ich liścieni oraz wycinków okrywy przy wszystkich zastosowanych poziomach wilgotności, podstawową liczebnością każdej badanej cechy były 33 nasiona.

4. PROPONOWANE MODELE POWSTAWANIA NAPRĘŻEŃ NISZCZĄCYCH

Nasiona roślin strączkowych tak jak wielu innych gatunków roślin uprawnych przechodząc przez kolejne etapy produkcji poddawane są często obciążeniom mechanicznym [53, 60, 62, 71, 85, 89, 106, 121, 122, 133-136]. Palusen i inni [117-119] podają, że elementy robocze i podzespoły maszyn zbierających takie jak: podajniki ślimakowe czy młocarnia są przyczyną powstawania większości uszkodzeń. Uszkodzenie nasion pod wpływem deformacji powstaje gdy wartość naprężeń w materiale roślinnym przekroczy granicę wytrzymałości mechanicznej tkanki z jakiej są zbudowane nasiona, ich okrywa czy też liścienie. Poznanie wytrzymałości mechanicznej nasion, liścieni i okrywy nasiennej jest niezbędne przy określaniu przyczyn powstawania uszkodzeń. Bardzo zróżnicowana wilgotność w poszczególnych etapach produkcji, jest podstawowym czynnikiem wpływającym na zmiany wytrzymałości mechanicznej nasion, co uniemożliwia zastosowanie jednolitej interpretacji w całym zakresie spotykanej wilgotności. Dodatkowo, duże gradienty wilgotności wywołane zmianą warunków atmosferycznych [5, 18, 25, 37, 44, 63, 77, 128, 129, 148] oraz warunkami suszenia [54, 69, 75, 83, 101, 113, 115, 116, 125, 126, 145-147] i związana z tym deformacja postaciowa i objętościowa może prowadzić do powstawania naprężeń wstępnych, modyfikując wartości eksperymentalne uzyskiwane w testach wytrzymałościowych.

W zbadanych ponad 200 rodach fasoli Dorrel i Adams [51] zauważyli, że podatność nasion na uszkodzenia okrywy nasiennej wzrastała ze wzrostem ich wagi i wypełnienia. Siłę potrzebną do rozerwania okrywy nasion soi oraz odpowiadające jej odkształcenie w testach ściskania osiowego dla kilku poziomów wilgotności badał Palusen [117], i zauważył, że nasiona większe posiadają niższą odporność okrywy na uszkodzenie. Sugerować mogłoby to niejednorodny wzrost objętości liścieni i okrywy nasiennej dojrzewających nasion lub wstępne naprężenie okrywy spowodowane pęcznieniem poszczególnych nasion o wyższej wilgotności. Davison i inni [17] badali nasiona rzepaku w testach ściskania osiowego, jednak zgniatano nasiona tylko o wilgotności 7.2÷17.0 %, a nasiona te przyklejono do powierzchni oporowej, ograniczając swobodną deformację okrywy. Powierzchnię kontaktu wyznaczyli jednostronnie, podkładając kalkę pomiędzy płytką a nasieniem, a moduł sprężystości obliczano według Arnolda i Mohsenina [2].

Gustafson i Segerlind [67, 68] zaproponowali model składający się z gazu, ciała stałego i cieczy, który użyty w powiązaniu z metodą elementów skończonych opisuje rozkład naprężeń spowodowany zmianami ciśnienia wewnętrznego. Otrzymano zgodne wyniki metody numerycznej i eksperymentu, w którym deformacji poddano sferyczne ciało otoczone sprężystą powłoką o grubości 0.1524 cm imitujące owoc o średnicy 6.67 cm, jednak model ten nie został sprawdzony dla rzeczywistych owoców. Clevenger i Hamann [11] oceniali różne odmiany jabłek na podstawie pomiaru wytrzymałości skórki na rozrywanie. Volsy i Lyall [143] zaobserwowali, że wytrzymałość pomidorów na ściskanie zależna jest w głównej mierze od wytrzymałości skórki na rozerwanie i uznali, że test rozciągania polegający na pomiarze wytrzymałości paska skórki na rozciąganie pozwala dokładnie opisać rzeczywistą wytrzymałość skórki pomidora na rozciąganie. Skoncentrowali się na badaniu wytrzymałości skórki na rozciąganie za pomocą trzech metod. Zastosowali metodę membranową, test rozciągania i przekłuwania, polegający na pomiarze siły potrzebnej do przebicia skórki penetrometrem walcowym o średnicy 1.5

mm. Teoretyczny opis dotyczący procesu rozciągania membrany pod wpływem penetrometru opisali Haman i Burgess [70].

Davison i inni [15, 16] przedstawli również model nasienia rzepaku w teście ściskania osiowego pomiędzy równoległymi płytkami. Model ten bazował na następujących założeniach:

- okrywa nie jest porowata i jest powłoką sprężystą i izotropową, a ciśnienie wewnątrz okrywy przed obciążaniem jest zerowe,
- objętość liścieni otoczonych okrywą maleje podczas ściskania, liścienie wewnątrz okrywy traktowane są jako ciecz, a współczynnik ściśliwości jest stały
- okrywa rozciąga się na skutek zmiany kształtu kulistego (jednak dla ułatwienia obliczeń zachowano kształt kulisty przy zwiększającej się powierzchni),

Założenie to zawierało w sobie pewne sprzeczności, otóż przyjęto, że zmiana kształtu nasienia pociąga za sobą wzrost średnicy w płaszczyźnie prostopadłej do osi obciążenia co w efekcie powinno powodować wzrost powierzchni. Zachowanie kulistego kształtu wymagałoby wzrostu średnicy w kierunku osi obciążenia, a jest to sprzeczne z faktycznie rejestrowaną deformacją ujemną, dlatego też powierzchnia nie może wzrastać w takim stopniu jak przewiduje model.

Zróżnicowane zakresy malejącej wilgotności w kolejnych etapach produkcji oraz różne mechanizmy deformacji jakim podlegają nasiona roślin strączkowych, wymagają odrębnego podejścia w rozważaniach modelowych, dotyczących możliwych przyczyn powstawania uszkodzeń nasion. Dlatego w pierwszej kolejności rozważone zostaną dwa przypadki deformacji postaciowej nasion o dużej zawartości wody, dotyczące różnego ułożenia płaszczyzny podziału liścieni względem osi obciążenia:

- oś obciążenia zawiera się w płaszczyźnie podziału liścieni,
- oś obciążenia przecina płaszczyznę podziału liścieni.

4.1. Deformacja postaciowa nasion - model naprężeń rozciągających w okrywie

Wilgotność nasion jest podstawowym czynnikiem decydującym o charakterze deformacji jakiej podlegają nasiona pod wpływem obciążeń. Dobrzański i Szot [24, 31, 41] zaobserwowali, że nasiona grochu przy wzroście wilgotności stają się bardzo plastyczne i niewielkie nawet siły nie wywołujące ujemnych skutków biologicznych [28, 34, 148] mogą powodować znaczne odkształcenia postaciowe. Nasiona roślin strączkowych o dużej zawartości wody, tak jak niektóre owoce soczyste, poddawane naprężeniom ściskającym pod wpływem elementu obciążającego, deformują się wywołując naprężenia styczne rozciągające okrywę nasienną czy też skórkę owoców [1, 15, 24, 32, 72, 95, 99, 143]. Deformacja postaciowa nasion pod wpływem obciążeń mechanicznych prowadzi często do znacznych zmian kształtu [9, 92, 96, 99] skutkiem czego okrywa nasienna podlega rozciąganiu, lecz nie zawsze powoduje to jej rozerwanie [23, 30, 35]. Zależne jest to często od zakresu odkształcenia, wilgotności jak też ułożenia nasion względem elementu obciążającego.

4.1.1. Ułożenie równoległe osi obciążenia względem płaszczyzny podziału liścieni

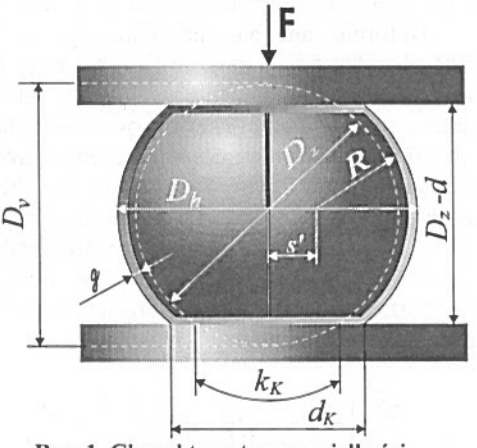
Opis odkształceń postaciowych oraz wyznaczenie deformacji w zakresie rozciągania okrywy nasiennej był głównym celem opracowanego przez autora modelu nasienia grochu

[35] oraz rzepaku [30]. Rozważając przypadek ściskania modelowego nasienia między równoległymi płytkami, Dobrzański [35] podobnie jak Davison i inni [15, 16] przyjął założenie, że nasienie jest kulą otoczoną powłoką, która jest sprężysta i nie jest porowata. Jednak liścienie w znacznym stopniu wypełnione wodą potraktował jako materiał nieściśliwy, a zatem przyjął V=const. Dodatkowo, przyjął, że na powierzchni kontaktu, w okrywie nie występują siły rozciągające oraz siły tarcia, a w niektórych obliczeniach geometrycznych, gdzie grubość okrywy w stosunku do średnicy nasienia jest niewielka, uznał, że można ją pominąć.

Podstawowym założeniem modelu ściskania pomiędzy równoległymi płytkami było przedstawienie nasienia jako kuli otoczonej powłoką, która odkształca się obustronnie przyjmując kształt beczki:

- o zarysie kołowym dla małych odkształceń,
- o zarysie parabolicznym dla dużych odkształceń.

Powyższe założenia, pozwoliły wyznaczyć zmiany pola powierzchni deformowanych nasion w trakcie ściskania pomiędzy równoległymi płytkami. Charakterystyczne wielkości geometryczne deformacji nasienia o zarysie kołowym przedstawiono na rysunku 1. Korzystając z elementarnych wzorów na objętość i pole powierzchni kuli można obliczyć wyjściową objętość V_K, jak również pole powierzchni okrywy S_K nasienia o średnicy D_z w stanie nienaprężonym to jest przed deformacją.



Rys. 1. Charakterystyczne wielkości geometryczne deformacji postaciowej nasion - ułożenie równoległe.

Odkształcenie okrywy można wyliczyć obliczając przyrost pola powierzchni w trakcie deformacji postaciowej nasienia o wielkość d. Problem sprowadzono do wyznaczenia pola powierzchni beczki S_{BK}, która powstała po ściśnięciu kuli pomiędzy równoległymi płytkami. Korzystając z założenia stałej objętości nieściśliwego nasienia, a zatem, że objętość niezdeformowanej kuli jest równa objętości beczki o zarysie kulistym czyli nasienia po deformacji, wyznaczono jej średnicę D_K jak też pole powierzchni S_{BK}. Sposób wyznaczenia tych wielkości dla deformacji o zarysie kołowym autor prezentował we wcześniejszych pracach [30, 35], jednak ujednolicenie oraz zastosowanie odmiennych oznaczeń w niniejszej pracy wymaga przedstawienia ostatecznej postaci pola powierzchni S_{BK}:

$$S_{BK} = 2\pi\left[\left(\frac{D_K}{2} - R\right)\arcsin\frac{D_z - d}{2R} + R(D_z - d) + \frac{1}{4}\left(2D_z d + \frac{1}{3}d^2\right)\right], \quad (1)$$

gdzie za R i D_K należy podstawić wyrażenia:

$$R=\frac{(D_z-d)^2}{4\left(D_z-\sqrt{2D_zd+\frac{1}{3}d^2}\right)}+\frac{D_z-\sqrt{2D_zd+\frac{1}{3}d^2}}{4}\,, \tag{2}$$

$$D_K=\sqrt{\frac{D_z^3}{D_z-d}-D_zd-\frac{1}{6}d^2}\,. \tag{3}$$

Łatwo zauważyć, że średnicę D_K, czyli największą średnicę zarysu kulistego w płaszczyźnie prostopadłej do osi obciążenia po deformacji można wyznaczyć znając średnicę nasienia przed deformacją D_z oraz osiową deformację postaciową d.

Deformowane nasiona o kulistym zarysie powierzchni bocznej, tylko w zakresie małych odkształceń poprawnie odzwierciedlają zmianę kształtu w trakcie ściskania. W zakresie dużych odkształceń, w miarę jak zdeformowane powierzchnie płaskie nasienia zbliżają się do siebie, kształt powierzchni bocznej przypominał raczej krzywiznę paraboli niż kuli, co wskazywało na konieczność uwzględnienia również deformacji postaciowej o zarysie parabolicznym. Pole powierzchni beczki o zarysie parabolicznym S_{BP} wyznaczono w analogiczny sposób [35], korzystając z tych samych założeń, a średnicę D_P wyznaczono w oparciu o założenie parabolicznego kształtu powierzchni bocznej.

Uwzględniając zastosowane w niniejszej pracy oznaczenia, przytoczono tylko ostateczną postać pola powierzchni S_{BP} dla deformacji o zarysie parabolicznym, która przedstawia się następująco:

$$S_{BP}=\frac{\pi Z^2}{8}\left[Q(D_z-d)\left(Q^2-\frac{1}{2Z^2}\right)-\frac{T}{2Z^2}\right]+\frac{\pi D_P|Z|}{2}[(D_z-d)Q+T]+\frac{\pi}{2}d_K^2\,, \tag{4}$$

gdzie za następujące wyrażenia wstawiono pomocnicze wielkości T, Z i Q :

$$T=\frac{\ln(D_z-d+Q)+\ln Z}{Z^2}, \tag{5}$$

$$Q=\sqrt{(D_z-d)^2+\frac{1}{2Z^2}}\,, \tag{6}$$

$$Z=2\frac{d_K-D_P}{(D_z-d)}\,, \tag{7}$$

a za d_K i D_P należy podstawić;

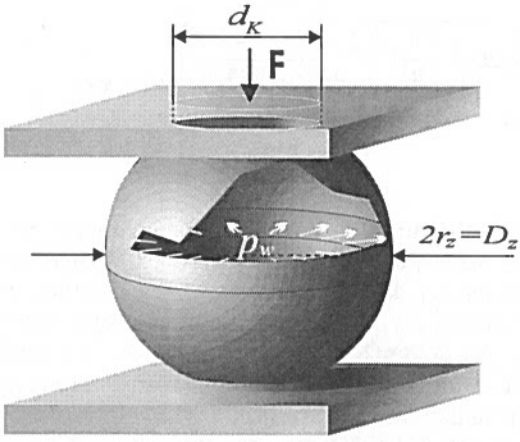
$$d_K = \sqrt{2D_z d + \frac{1}{3}d^2} \tag{8}$$

$$D_P = \frac{1}{4}\left(\sqrt{2D_z d + \frac{1}{3}d^2 + \frac{20D_z^3 + 6(D_z - d)\left(2D_z d + \frac{1}{3}d^2\right)}{D_z - d}} + \sqrt{2D_z d + \frac{1}{3}d^2}\right). \tag{9}$$

Podobnie jak dla deformacji o zarysie kulistym, tak i w tym przypadku znając tylko średnicę nasienia przed deformacją D_z oraz osiową deformację postaciową d, wyznaczono największą średnicę w płaszczyźnie prostopadłej do osi obciążenia, czyli średnicę dla zarysu parabolicznego D_P. Wyznaczenie średnicy D_P dla deformacji postaciowej o zarysie parabolicznym podobnie jak średnicy D_K dla deformacji o zarysie kulistym, umożliwia obliczenie odkształcenia okrywy nasiennej ε_o dla dowolnego przyrostu deformacji postaciowej d_p całego nasienia jak też zakresu deformacji niszczącej d_o.

Przedstawione w poprzednich pracach [30, 35] zależności powyższych wielkości w funkcji odkształcenia ε całego nasienia ściskanego pomiędzy równoległymi płytkami pozwoliły zaobserwować pewne zależności geometryczne dotyczące deformacji postaciowej. Średnica beczki o zarysie kulistym D_K oraz średnica beczki o zarysie parabolicznym D_P przyjmują zbliżone wartości w całym zakresie odkształceń. Średnica deformowanego nasienia o zarysie kulistym D_K równa średnicy początkowej nasienia D_z, oraz jej niewielki wzrost w początkowym zakresie odkształceń, świadczy o poprawniejszym w stosunku do deformacji o zarysie parabolicznym opisie zmiany kształtu w zakresie małych odkształceń, potwierdzając możliwość założenia niezmienności kształtu dla odkształceń $\varepsilon<0.2$. Równocześnie, brak przyrostu wartości D_K jak i D_P dla odkształceń nasienia $\varepsilon<0.3$ świadczy o tym, że okrywa nasienna nie jest rozciągana i w tym zakresie deformacji postaciowej nie można spodziewać się powstawania naprężeń rozciągających w okrywie. Dalsza zmiana kształtu nasienia w trakcie ściskania powoduje wzrost pola powierzchni S_{BK} i S_{BP} oraz powstawanie naprężeń rozciągających w otaczającej okrywie. Gwałtowny wzrost pola powierzchni okrywy w trakcie deformacji o zarysie kulistym S_{BK} i parabolicznym S_{BP} dla odkształcenia nasienia $\varepsilon>0.4$ świadczy o możliwości powstania naprężeń rozciągających w okrywie nasiennej [35]. Jednak należy oczekiwać, że przekroczenie granicy wytrzymałości okrywy na rozciąganie może wystąpić dopiero w zakresie odkształcenia $\varepsilon>0.5$ dla deformacji postaciowej o zarysie kulistym i dla deformacji postaciowej o zarysie parabolicznym, dla $\varepsilon>0.65$.

Prace, dotyczące badania okrywy nasiennej [13-17, 23, 25, 29, 30, 32, 35, 37, 38, 48, 51, 63, 72, 94, 96, 98-102, 109, 113, 140, 141, 143, 146] sugerują, że w nasionach roślin strączkowych, gdzie okrywa nie jest spójna z liścieniami, wytrzymałość okrywy może mieć wpływ na całkowitą wytrzymałość nasion, zwłaszcza przy dużych odkształceniach. Wyniki uzyskane przez Dobrzańskiego i Szota [24, 31, 41] pozwoliły zaobserwować wzrost wartości siły reprezentowany przez prostoliniowy odcinek zależności siła-przemieszczenie w zakresie dużej deformacji postaciowej nasion grochu, który świadczył o rozciąganiu okrywy nasiennej. Haman i inni [72] oraz autor [30] przedstawili sposób wyznaczania naprężeń rozciągających okrywę opasującą ściskane nasienie i korzystając z zależności Lamégo [144], dotyczącego naprężeń obwodowych σ_o, promieniowych σ_r i odkształcenia promieniowego Δr, w przekroju kołowym poddanym działaniu ciśnienia wewnętrznego p_w (rys. 2), wyznaczyli moduł sprężystości okrywy nasiennej. Przekształcenie zależności opisującej odkształcenie promieniowe Δr umożliwia wyznaczenie wartości modułu sprężystości okrywy E_{om}. Wyrażenie opisujące moduł sprężystości okrywy E_{om} przyjmuje następującą postać zgodnie z zastosowanym spisem oznaczeń przedstawionym w niniejszej pracy:



Rys. 2. Zamiana naprężń ściskających na ciśnienie wewnętrzne.

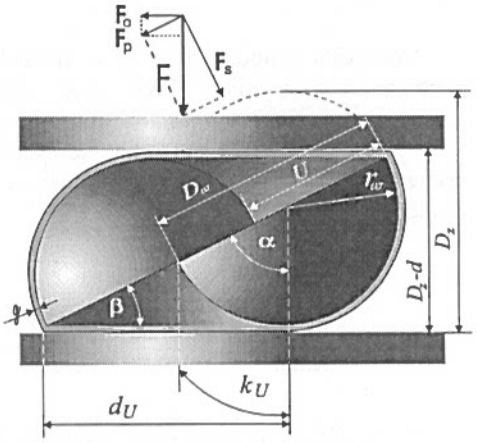
$$E_{om} = \frac{D_h \Delta p_w}{\Delta D_h}\left(\frac{(0.5D_h+g)^2+(0.5D_h)^2}{(0.5D_h+g)^2-(0.5D_h)^2}+\nu\right). \tag{10}$$

Oczywiście, w początkowym stadium ściskania nasion zachodziła tylko deformacja postaciowa lepkosprężystych liścieni, bez naprężania okrywy. Dopiero dalsza deformacja liścieni powodowała rozciąganie okrywy wywołując wzrost ciśnienia wewnętrznego. Przyjmując, że podczas rozciągania okrywy nasiennej ciśnienie p_p niezbędne do postaciowej deformacji liścieni jest stałe, można wyznaczyć przyrost ciśnienia wewnętrznego Δp_w wywołującego rozerwanie okrywy oraz odpowiadający przyrost średnicy deformowanego nasienia ΔD_h, lecz aby wyznaczyć moduł sprężystości okrywy E_{om} należy podstawić do wyrażenia (10) charakterystyczne wielkości zakresu rozciągania okrywy odczytane z wykresów siła-przemieszczenie, uzyskane w trakcie deformacji postaciowej nasion pomiędzy równoległymi płytkami. Powyższy sposób umożliwia interpretację wykresów siła-przemieszczenie w zakresie dużych odkształceń nasion wilgotnych, gdzie wytrzymałość mechaniczna dotyczy w większym stopniu wytrzymałości okrywy nasiennej na rozciąganie.

4.1.2. Ułożenie dowolne osi obciążenia względem płaszczyzny podziału liścieni

Deformacja postaciowa nasion wilgotnych pozwala wyznaczyć moduł sprężystości okrywy nasiennej, jednak tylko w zakresie dużych odkształceń niezbędnych do jej rozerwania. Brak przyrostu powierzchni opisującej zwartą bryłę, jaką tworzą przylegające liścienie dla odkształceń $\varepsilon<0.4$ świadczy o tym, że deformacja postaciowa nie może być przyczyną powstawania uszkodzeń okrywy nasiennej. Dlatego zostanie rozważony przypadek, w którym ułożenie płaszczyzny podziału liścieni wymusza ich wzajemny uślizg, prowadzący do deformacji, której efektem jest powstanie otoczonej okrywą bryły; zawierającej puste przestrzenie.

Ułożenie nasienia podczas deformacji tak aby oś obciążenia przecinała płaszczyznę podziału liścieni sprawia, że ściskając nasienie pomiędzy równoległymi płytkami siłą F jej składowa F_p powoduje uślizg liścieni. Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyczne wielkości geometryczne deformowanego nasienia w trakcie uślizgu liścieni. Największych odkształceń okrywy nasiennej można się spodziewać, gdy nasienie przed deformacją ułożone było płaszczyzną podziału liścieni prostopadle do osi obciążenia, jednak w układzie niezrównoważonym. W tym przypadku deformacja d spowoduje nachylenie płaszczyzny uślizgu liścieni o kąt β względem płaszczyzny obciążającej oraz wydłużenie okrywy, którego wielkość możemy wyznaczyć z prostych zależności geometrycznych. Długość obwodu deformowanego nasienia w przekroju przedstawionym na rysunku 3, po obu stronach płaszczyzny uślizgu jest równa, dlatego do wyznaczenia odkształcenia okrywy ε_o wystarczy rozważyć odkształcenie po jednej stronie płaszczyzny. Przed deformacją długość okrywy w płaszczyźnie przekroju równa była połowie obwodu nasienia, a po deformacji o wielkość d była równa sumie średnicy pola powierzchni kontaktu wzdłuż uślizgu liścieni d_U i połowie obwodu pomniejszonej o łuk k_U opisujący część liścienia nieprzylegającą do okrywy. Stąd odkształcenie okrywy nasiennej, czyli jej wydłużenie przedstawia następujące wyrażenie:



Rys. 3. Charakterystyczne wielkości geometryczne uślizgu liścieni w trakcie deformacji postaciowej nasion - ułożenie dowolne.

$$\varepsilon_o = \frac{\pi r_w - k_U + d_U}{\pi r_w}, \qquad (11)$$

w którym za wielkości k_U i d_U podstawiono:

$$k_U = \frac{\pi r_w}{180} \arccos \frac{D_z - 2d}{D_z}, \tag{12}$$

$$d_U = \sqrt{\left(\frac{D_z}{2} + U\right)^2 - \left(\frac{D_z}{2}\right)^2}, \tag{13}$$

gdzie przemieszczenie w kierunku uślizgu U wyznaczono z prostych zależności trygonometrycznych:

$$U = \frac{D_z d}{D_z - 2d}. \tag{14}$$

Niewielka grubość okrywy w stosunku do średnicy nasienia ($g \approx 0.01 D_z$) pozwala pominąć ten wymiar. Stąd przy opisie deformacji postaciowej i zależności geometrycznych uślizgu liścieni możemy przyjąć $r_w = 0.5 D_z$. Podstawiając do wyrażenia (11) zależności (12÷14) oraz korzystając z powyższego założenia, otrzymujemy ostateczną postać określającą wydłużenie względne okrywy nasiennej w kierunku jej uślizgu:

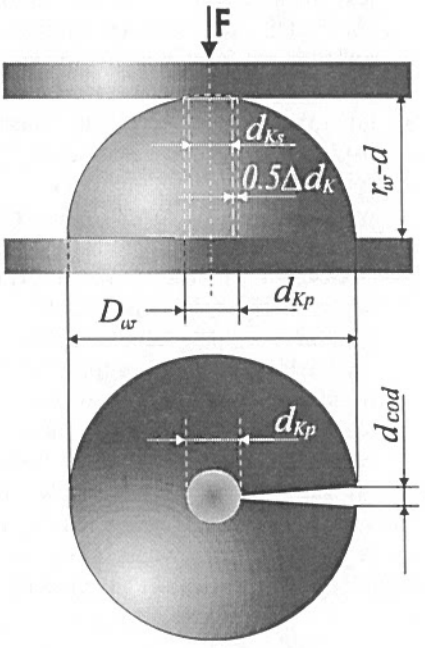
$$\varepsilon_o = 1 - \frac{1}{180} \arccos \frac{D_z - 2d}{D_z} + 2 \frac{\sqrt{\left(\frac{D_z}{2} + \frac{D_z d}{D_z}\right)^2 - \left(\frac{D_z}{2}\right)^2}}{\pi D_z} \tag{15}$$

Szczególnym przypadkiem ułożenia dowolnego nasienia podczas deformacji jest prostopadłe ułożenie płaszczyzny podziału liścieni do osi obciążenia jednak w układzie zrównoważonym, to jest gdy liścienie nie podlegają uślizgowi. W tym przypadku liścienie stanowią zwartą bryłę, a deformację postaciową nasienia opisują zależności przedstawione w rozdziale 4.1.1.

4.2. Deformacja sprężysta nasion - model uszkodzenia szczelinowego liścieni

Test ściskania osiowego pomiędzy równoległymi płytkami jest najczęściej stosowaną metodą badania wytrzymałości mechanicznej nasion przez wielu badaczy [1-4, 7-11, 15-19, 23-35, 38, 41-43, 46, 47, 49, 56-62, 93, 94, 110, 111]. Badania przeprowadzano ściskając często 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 poszczególnych odmian i gatunków, a także sposób podparcia i kształt płaszczyzny obciążającej.

Nasiona o dużej zawartości wody (W>14 %) podlegały głównie deformacji postaciowej i znacznym zmianom kształtu, co eliminowało wpływ nierównomierności kształtu przed deformacją. 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. Małe odkształcenie dla deformacji sprężystej nie może powodować znacznych zmian kształtu, a jak wykazano w poprzednim rozdziale niewielka zmiana kształtu nie może być przyczyną powstawania naprężeń rozciągających w okrywie.



Rys. 4. Uszkodzenie szczelinowe liścienia w deformacji osiowej.

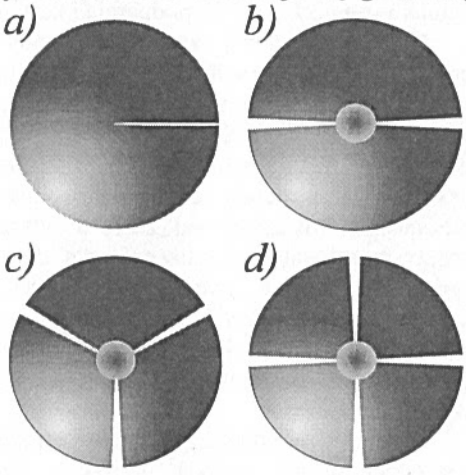
Należy przypuszczać, że przyczyny uszkodzeń nasion suchych w trakcie ściskania należy poszukiwać podczas deformacji liścieni, a nie rozciągania okrywy nasiennej, dlatego też wyznaczenie wytrzymałości mechanicznej liścieni oraz zakresu deformacji sprężystej może ułatwić wyjaśnienie mechanizmu powstawania uszkodzeń. W przypadku deformacji całych nasion często określany zostaje skutek zbiegu przypadkowych zdarzeń, co prowadzi do wyciągania fałszywych wniosków dotyczących wpływu wielu czynników agrotechnicznych i uprawowych na zmiany wytrzymałości mechanicznej nasion, wiązanej również wielokrotnie z cechami odmianowymi. Badanie deformacji liścieni nasion suchych; a właściwie ich połówek, podyktowane było chęcią wyeliminowania tych czynników, które miały wpływ na wartości pomiarowe uzyskiwane w trakcie ściskania całych nasion.

Ułożenie liścienia podczas ściskania tak, aby płaszczyzna podziału stanowiła płaszczyznę podparcia (rys. 4), powinno zapewnić 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 zwanego w technice złomem rozdzielczym [52]. Dyląg i inni [52] przewidują dwa przypadki powstawania złomu; gdy deformacja

sprężysta powoduje złom kruchy oraz gdy powstanie złomu poprzedza trwała deformacja postaciowa.

Zgodnie z powyższym zaproponowano rozważenie obu przypadków powstawania złomu rozdzielczego liścieni:

- gdy deformacja sprężysta ściskanego liścienia wywołuje naprężenie złomu rozdzielczego większe od wytrzymałości na rozciąganie ($\sigma_{cod} > R_m$). W tym przypadku pojawia się chwilowa szczelina, która po ustąpieniu naprężenia zanika, a liścień wraca do poprzedniego kształtu (rys. 5a). Promieniowa szczelina złomu jest często niewidoczna, mimo że na wykresie siła-przemieszczenie obserwuje się gwałtowny spadek siły. Jednak interpretacja naprężenia złomu rozdzielczego ze względu na brak trwałych przemieszczeń jest niemożliwa, a zakres deformacji sprężystej oraz średnie naprężenia na powierzchni kontaktu lub siłę niszczącą można wyznaczyć eksperymentalnie.
- gdy deformacja sprężysta ściskanego liścienia powoduje naprężenie złomu rozdzielczego mniejsze od wytrzymałości na rozciąganie ($\sigma_{cod} < R_m$). W tym przypadku dopiero dalszy wzrost obciążenia i trwałe spęczenie centralnej części liścienia powoduje utratę spójności materiału, czyli złom rozdzielczy. Sposób podparcia i kształt liścienia powinien zapewnić jego regurlarny podział płaszczyznami złomu co 180^0, 120^0, 90^0 (rys. 5b, c, d) lub 60^0.



Rys. 5. Przykłady złomu rozdzielczego ściskanych liścieni.

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

$$L_{dp} = \frac{(F - F_s)d_p}{2} \tag{16}$$

zostaje zamieniona na pracę L_{cod}, powodującą powstanie szczeliny (złom rozdzielczy):

$$L_{cod} = \frac{\sigma_{cod} A_{cod} d_{cod}}{2}. \tag{17}$$

Przyrównując wyrażenia (16) i (17) oraz przekształcając otrzymujemy zależność umożliwiającą wyznaczenie naprężenia złomu rozdzielczego σ_{cod}

$$\sigma_{cod} = \frac{(F - F_s)d_p}{A_{cod}d_{cod}}, \tag{18}$$

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}

$$A_{cod} = \left(\frac{\pi r_w^2}{4} - \frac{d_{Kp}r_w}{2}\right)n. \tag{19}$$

Podstawiając r_w=0.5D_w a za d_{Kp} wyrażenie określające średnicę podstawy czaszy deformacji:

$$d_{Kp} = 2\sqrt{d_p(D_w - d_p)} \tag{20}$$

oraz porządkując otrzymujemy pole powierzchni złomu rozdzielczego:

$$A_{cod} = \frac{nD_w}{4}\left(\frac{\pi D_w}{4} - 2\sqrt{d_p(D_w - d_p)}\right). \tag{21}$$

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

$$\frac{\pi D_w + d_{cod}}{D_w} = \frac{\pi(d_{Kp} + \Delta d_K)}{d_{Kp}} \tag{22}$$

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

$$d_{cod} = \pi D_w\left(\frac{d_{Kp} + \Delta d_K}{d_{Kp}} - 1\right) \tag{23}$$

Nieznany jest natomiast przyrost średnicy pola powierzchni kontaktu Δd_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:

$$V_{cz} = \frac{\pi}{2}\left(\frac{d_{Kp}}{2}\right)^2 d_p + \frac{\pi}{6}d_p^3 \tag{24}$$

oraz

$$V_{cod} = \pi\left(\frac{D_w}{2} - d_p\right)\left[\left(\frac{d_{Kp} + \Delta d_K}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{Kp}}{2}\right)^2\right]. \tag{25}$$

Przyrównując zależności (24) i (25) oraz przekształcając otrzymujemy wyrażenie przyrostu pola powierzchni kontaktu deformacji postaciowej Δd_K:

$$\Delta d_K = \sqrt{\frac{2d_p\left[\left(\frac{d_{Kp}}{2}\right)^2 + \frac{1}{3}d_p^2\right]}{\frac{D_w}{2} - d_p} + d_{Kp}^2} - d_{Kp} \tag{26}$$

Podstawiając do wyrażenia (26) zależność opisującą średnicę pola powierzchni kontaktu d_{Kp} (20) otrzymujemy ostateczną postać określającą przyrost średnicy spęczenia Δd_K zależną tylko od wielkości mierzonej deformacji osiowej d_p nasienia o średnicy D_w:

$$\Delta d_K = \sqrt{\frac{2d_p\left[(D_w - d_p)d_p + \frac{1}{3}d_p^2\right]}{0.5D_w - d_p} + 4(D_w - d_p)d_p} - 2\sqrt{(D_w - d_p)d_p}\,. \tag{27}$$

Uproszczając wyrażenie (23) otrzymujemy bardzo prostą zależność określającą wielkość szczeliny złomu d_{cod} dla deformacji postaciowej d_p:

$$d_{cod} = \pi D_w \frac{\Delta d_K}{d_{Kp}}, \tag{28}$$

w której za wielkości Δd_K i d_{Kp} należy podstawić wcześniej przedstawione zależności (26) i (20). Podstawiając zaś do wyrażenia (18) zależności (21) i (28) istnieje możliwość wyznaczenia naprężenia złomu rozdzielczego σ_{cod} dla deformacji postaciowej liścienia d_p nasienia o znanej średnicy D_w.

Najmniejsza deformacja postaciowa liścienia d_p prowadząca do złomu rozdzielczego i uszkodzenia, umożliwia również wyznaczenie jednostkowego spęczenia centralnej części deformowanego liścienia ε_1:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta d_K}{d_{Kp}} \tag{29}$$

oraz jednostkowego odkształcenia ε, a właściwie jego skrócenia:

$$\varepsilon = \frac{D_w - 2d_p}{D_w}, \tag{30}$$

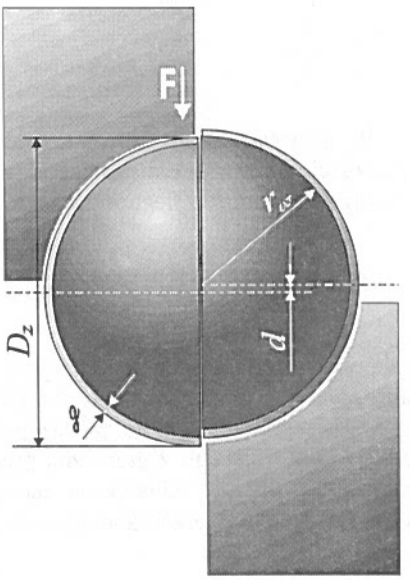
Dzieląc powyższe zależności (29) i (30) można określić wartość współczynnika Poissona ν:

$$\nu = \frac{\Delta d_K D_w}{d_{Kp}(D_w - 2d_p)}, \tag{31}$$

W powyższym wyrażeniu należy podstawić za Δd_K i d_{Kp} wcześniej przedstawione zależności (26) i (20). Wartość współczynnika Poissona ν wyliczona tym sposobem, zależna jest tylko od deformacji postaciowej liścienia d_p nasienia o znanej średnicy D_w, którą to wielkość wyznaczyć można eksperymentalnie.

4.3. Połówkowanie nasion - model naprężeń ścinających w okrywie

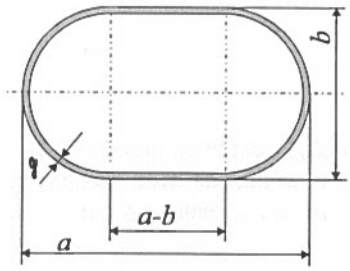
W poprzednich rozdziałach rozważano zarówno deformację postaciową nasion wilgotnych jak też suchych liścieni. W obu przypadkach deformacja postaciowa może prowadzić do uszkodzeń okrywy lub liścieni, jednak uszkodzenie poprzedza zazwyczaj trwała zmiana kształtu lub trwałe wgniecenie. Charakterystyczne dla nasion roślin strączkowych, a zarazem dwuliściennych jest powstawanie uszkodzeń okrywy na całym obwodzie płaszczyzny podziału liścieni bez zauważalnych trwałych deformacji i zmiany kształtu liścieni. W praktyce, zjawisko to nazywane jest połówkowaniem nasion. Skutkiem połówkowania jest oddzielenie się liścieni, przy czym zarodek pozostaje najczęściej przy jednym z nich, a okrywa nasienna przełamuje się zazwyczaj na dwie części. Obie połowy okrywy pozostają przy liścieniach; tak jak w przypadku nasion wielu odmian fasoli lub oddzielają się od liścieni; jak u nasion grochu siewnego czy też odmian warzywnych, łuskowych o nasionach gładkich.



Rys. 6. Ścinanie okrywy nasiennej.

Występowanie procesu połówkowania, w następstwie którego w materiale nasiennym pojawiają się liścienie, zmusza do rozpatrzenia przypadku obciążenia nasienia siłą w zakresie niewielkiej deformacji, która mogłaby spowodować powstawanie naprężeń ścinających w okrywie nasiennej. Przypadek taki przedstawia rysunek 6, na którym jeden z liścieni jest obciążany siłą F, a drugi podparto, tak aby tylko okrywa podlegała ścinaniu. Liścienie nasion roślin strączkowych przylegają płaszczyzną podziału, jednak związane są tylko przez zarodek. Niewielkie wymiary zarodka w stosunku do liścieni pozwalają jednak tą siłę związania pominąć przy wyznaczaniu naprężeń ścinających w okrywie, a pole powierzchni przekroju okrywy A_s podlegającej ścinaniu można wyznaczyć z prostych zależności geometrycznych (Rys. 7):

$$A_s = \pi(bg - g^2) + 2(a-b)g. \tag{32}$$



Rys. 7. Pole przekroju ścinanej okrywy.

Oczywiście wyrażenie to pozwala wyznaczyć pole powierzchni przekroju ścinanej okrywy przy założeniu kulistego kształtu powierzchni bocznych cylindrycznego walczaka opisującego powierzchnię zewnętrzną nasion podłużnych takich jakimi jest fasola. Natomiast dla nasion okrągłych odmian groch siewnego, polnego czy warzywnego o nasionach gładkich można przyjąć, że $a = b = D_z$, czyli pole powierzchni przekroju przedstawia wyrażenie:

$$A_s = \pi(D_z g - g^2). \tag{33}$$

Określenie pola powierzchni przekroju okrywy podlegającej ścinaniu pozwala wyznaczyć naprężenia w zakresie deformacji niszczącej:

$$\tau = \frac{F}{A_s}. \tag{34}$$

W procesie połówkowania istotne wydaje się wyznaczenie pracy deformacji niszczącej L, którą dla kruchego materiału jakim jest sucha okrywa nasienna, w przybliżeniu określa zależność:

$$L = \frac{Fd}{2}. \tag{35}$$

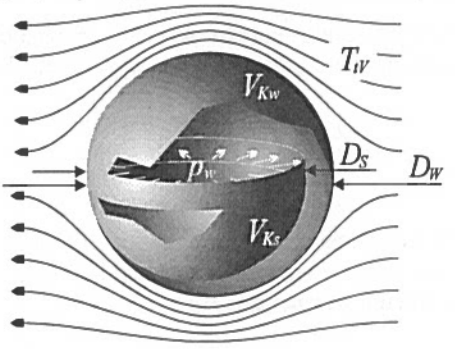
Obie wielkości występujące powyżej można wyznaczyć eksperymentalnie w układzie zaproponowanym na rysunku 6. Korzystając z zasady zachowania energii można wyznaczyć prędkość, która może spowodować uszkodzenie okrywy nasienia o znanej masie m uderzającego z graniczną prędkością V_p o stałą przeszkodę. Przyrównując obie energie tj.: energię kinetyczną nasienia i pracę deformacji niszczącej w procesie połówkowania oraz przekształcając otrzymujemy wyrażenie:

$$V_p = \sqrt{\frac{Fd}{m}}. \tag{36}$$

Podejście to, choć zawiera wiele uproszczeń, pozwala jednak w oparciu o wielkości eksperymentalne otrzymane w testach wytrzymałościowych quasi-statycznych na określenie granicznej prędkości, powyżej której nasienie uderzające o przeszkodę lub elementy robocze maszyn ulegnie uszkodzeniu w dynamicznym procesie połówkowania.

4.4. Suszenie nasion - model naprężeń skurczu okrywy

Dotychczasowe rozważania zostały skupione na kilku z możliwych mechanizmów powstawania uszkodzeń, które powodowane są obciążeniami mechanicznymi nasion oraz najczęściej ich deformacją postaciową. Znane są jednak w praktyce, a opisywane w literaturze [54, 76, 81, 98-101, 107-109, 113, 114, 125, 126, 139, 140] przypadki, gdy nieprawidłowe warunki suszenia powodują powstawanie uszkodzeń okrywy nasion roślin strączkowych. Prowadzone wcześniej badania [37, 45, 48] pozwoliły zaobserwować, że okrywa nasienna jak też liścienie powiększają swoje wymiary ze wzrostem wilgotności. Natomiast, w procesie suszenia zachodzi zjawisko odwrotne, w którym zarówno liścienie jak i okrywa zmniejszają swoje wymiary. Gdy proces ten zachodzi powoli (np.: naturalne wysychanie), okrywa i liścienie kurczą się jednocześnie i nie jest możliwe powstanie naprężeń w okrywie, które mogłyby spowodować jej rozerwanie.



Rys. 8. Skurcz okrywy nasiennej w strumieniu ogrzanego powietrza.

Na rysunku 8 przedstawiono nasienie o kształcie kulistym, które znajduje się w strumieniu ogrzanego powietrza o znanych parametrach przepływu tj.: temperaturze i prędkości T_{IV}. Nasienie wilgotne o średnicy D_W, wypełnione napęczniałymi liścieniami otacza okrywa o objętości V_{Kw}. Natomiast, po wysuszeniu, suche nasienie o mniejszej objętości V_{Ks} otoczone jest okrywą w postaci powłoki kulistej o średnicy D_S. Podczas suszenia gorącym powietrzem można spodziewać się szybszego wysychania zewnętrznej warstwy nasion; czyli okrywy, niż ich liścieni znajdujących się wewnątrz. Warunki, w których wilgotne nasienie posiada objętość V_{Kw}, a okrywa kurcząc się dąży do objętości V_{Ks}, powodują wzrost ciśnienia wewnętrznego p_w nieściśliwych liścieni; wypełnionych w dużym stopniu wodą, prowadząc do powstawania naprężeń rozciągających w okrywie nasiennej. Grubość okrywy g w przybliżeniu równa $0.01D_z$, a tym samym spełniony warunek $g<0.05D_z$, pozwala traktować nasienie otoczone okrywą jako cienkościenny zbiornik kulisty, mimo że w przypadku suszenia nasion, pojawienie się ciśnienia wewnętrznego p_w poprzedza skurcz okrywy ε_s, a dla zbiorników ciśnienie wewnętrzne prowadzi do naprężeń powłoki. W technice rozważany jest często cienkościenny kulisty zbiornik w celu określenia warunku bezpieczeństwa i wyznaczenia dopuszczalnej grubości ścianki. W rozpatrywanych zagadnieniach powłok obrotowych tworzących cienkościenne naczynia ciśnieniowe, stan naprężenia w dowolnym punkcie powłoki kulistego zbiornika określony jest jako stan płaski, dla którego naprężenia główne σ_s w obu prostopadłych kierunkach są równe [144], dlatego w dowolnym przekroju kołowym warunek bezpieczeństwa określa nierówność:

$$\sigma_s = \frac{D_z p_w}{4g} \leq k_r. \tag{37}$$

Uwzględniając, że naprężenie skurczu okrywy σ_s w trakcie suszenia zależne jest od wielkości potencjalnego odkształcenia skurczu ε_s i od modułu sprężystości suchej okrywy E_o, oraz przekształcając zależność (37) otrzymujemy wyrażenie określające ciśnienie wewnętrzne p_w wywołane skurczem okrywy:

$$p_w = \frac{4E_o \varepsilon_s g}{D_z} \quad . \tag{38}$$

Odkształcenie skurczu okrywy ε_s można określić znając jej wymiary dla średnicy nasienia wilgotnego D_W oraz po jego wysuszeniu D_S:

$$\varepsilon_s = \frac{D_W - D_S}{D_W} \quad . \tag{39}$$

Podstawiając za ε_s wyrażenie (39) oraz przyjmując, że w trakcie wysychania okrywy liścienie pozostają wilgotne; czyli $D_z=D_W$, otrzymujemy zależność pozwalającą wyznaczyć ciśnienie wewnętrzne p_w:

$$p_w = \frac{4E_o g(D_W - D_S)}{D_W^2} . \tag{40}$$

Szczególnie ważnym przypadkiem powstawania uszkodzeń nasion roślin strączkowych podczas suszenia jest pękanie okrywy nasion fasoli. Nasiona fasoli o wydłużonym kształcie podczas suszenia stanowią analogię do powłok walcowych; jakie reprezentują ciśnieniowe zbiorniki cylindryczne zwane potocznie walczakami [144], które narażone są na działanie ciśnienienia gazów (np.; kotły parowe lub butle gazowe). Rozważając zagadnienia wytrzymałościowe, zanajdujących szerokie zastosowanie w technice kotłów parowych wykazano, że naprężenia obwodowe są dwukrotnie większe od prostopadłych do nich naprężeń wzdłuż tworzących powierzchni walcowej [144]. Stąd, aby określić kryteria wytrzymałości okrywy nasion fasoli na rozerwanie podczas suszenia wystarczy wyznaczyć naprężenia obwodowe w przekroju części walcowej nasienia. Naprężenia obwodowe σ_o można określić korzystając z uproszczonej postaci Zagadnienia Lamégo dotyczącego cienkościennego przekroju kołowego rury poddanej działaniu ciśnienia wewnętrznego p_w:

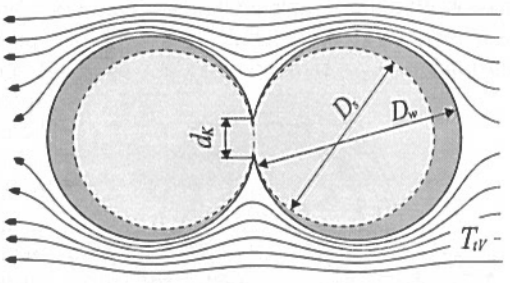
$$\sigma_o = \frac{p_w(0.5D_W^2 + D_W g + g^2)}{D_W g + g^2} . \tag{41}$$

Suszenie nasion fasoli powinno spełniać warunek bezpieczeństwa dla naprężeń obwodowych σ_o w przekroju części walcowej nasienia:

$$\sigma_o \leq k_r. \tag{42}$$

Warunek ten zależny jest od wielkości naprężeń skurczu okrywy nasiennej σ_s w trakcie suszenia, od odkształcenia skurczu ε_s oraz modułu sprężystości suchej okrywy E_o i aby sprawdzić zakres, w którym obowiązuje należy wyznaczyć wymienione wielkości eksperymentalnie.

Przypadek suszenia przedstawiony na rysunku 8 dotyczy nasienia znajdującego się w strumieniu ogrzanego powietrza zapewniającym równomierny dostęp czynnika suszącego do każdego punktu otaczającej okrywy. W rzeczywistych warunkach suszenia nasiona dotykają się utrudniając dostęp powietrza do strefy kontaktu, co powoduje zróżnicowanie wilgotności poszczególnych fragmentów okrywy. Okrywa nasienna nasion roślin strączkowych charakteryzuje się tym, że wraz ze wzrostem wilgotności maleje jej wytrzymłość na rozciąganie [29, 37, 48]. Stąd spodziewać się można, że ogrzane powietrze spowoduje skurcz tylko tej części okrywy, która jest suszona prowadząc do rozciągania fragmentów o wyższej wilgotności. Rysunek 9 przedstawia w przekroju parę nasion w strumieniu ogrzanego powietrza, na którym zaznaczono odcinek d_K nie podlegający suszeniu. Skurczowi $(D_W - D_S)$ podlega tylko część okrywy o średnicy D_W pomniejszona o odcinek d_K, która wysychając osiąga średnicę D_S. Pozwala to na wyznaczenie wielkości odkształcenia ε_s fragmentu suszonej okrywy:



Rys. 9. Skurcz dostępnych fragmentów okrywy nasion w strumieniu ogrzanego powietrza.

$$\varepsilon_s = \frac{\pi(D_W - D_S)}{\pi D_W - d_K}. \tag{43}$$

Suszenie wywołuje naprężenia obwodowe skurczu σ_s zależne od modułu sprężystości suchej okrywy E_{oS}, które równe jest:

$$\sigma_s = E_{oS}\varepsilon_s. \tag{44}$$

W tym samym czasie skurcz suszonej okrywy powoduje rozciąganie wilgotnej okrywy o module sprężystośći E_{oW}, w zakresie odkształcenia ε_o odcinka d_K. Wyznaczając eksperymentalnie odkształcenie niszczące ε_o wilgotnej okrywy oraz jej moduł sprężystości E_{oW}, można określić niszczące naprężenia rozciągające σ_u z poniższej zależności:

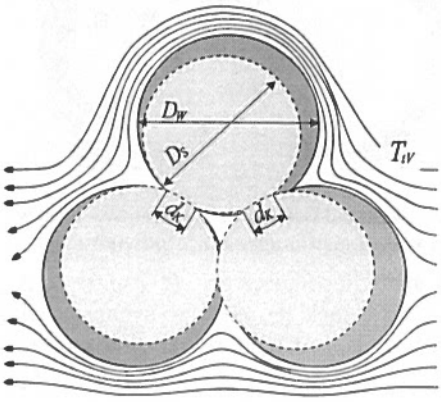
$$\sigma_u = E_{oW}\varepsilon_o. \tag{45}$$

Podczas suszenia nasion okrywa nasienna nie będzie ulegać uszkodzeniu gdy spełniony zostanie warunek:

$$\sigma_u > \sigma_s, \tag{46}$$

a wyznaczenie odkształcenia skurczu ε_s, wydłużenia niszczącego ε_o oraz modułu sprężystości okrywy E_o, w szerokim zakresie wilgotności może pozwolić na określenie bezpiecznych warunków suszenia.

W praktyce suszenie nasion odbywa się w warstwie, gdzie nasiona kontaktują się z innymi, a liczba kontaktów zależna jest między innymi od ich kształtu i wielkości. Dla nasion gładkich o jednakowej średnicy i wyrównanym kulistym kształcie nasiona utworzą warstwy, w których każde z nich będzie posiadało kontakt z sześcioma otaczającymi nasionami tego samego poziomu oraz z trzema nasionami z warstw sąsiednich. Tym sposobem każde z nasion kontaktować się będzie z 12 innymi, jednak w tej samej płaszczyźnie nie będzie więcej kontaktów niż 6. W tym przypadku część obwodu okrywy ulegająca skurczowi jest najmniejsza, a część okrywy wilgotna jest największa. Dlatego też, suszenie wewnątrz warstwy niezależnie od gradientów wilgotności nie powinno prowadzić do powstawania niebezpiecznych naprężeń skurczu. W gorszej sytuacji znajdują się nasiona o zróżnicowanej wielkości posiadające mniejszą liczbę kontaktów, a w szczególności leżące w warstwie wierzchniej, które podparte są w trzech punktach, z czego tylko dwie strefy kontaktu znajdą się w tej samej płaszczyźnie (Rys. 10). Położenie nasion w warstwie wierzchniej, a właściwie położenie poszczególnych nasion na warstwie, stwarza praktycznie najbardziej ekstremalne warunki skurczu okrywy w trakcie ich suszenia.



Rys. 10. Strefy kontaktu podczas suszenia nasion warstwy powierzchniowej.

Nierówność (46) przedstawia warunek, dla którego okrywa nasienna nie powinna ulegać uszkodzeniu podczas jej suszenia. Jednak określenie tego zakresu wymaga wyznaczenia zarówno modułu sprężystości jak i odkształcenia dla gradientu wilgotności w jakim się znajdą poszczególne fragmenty tego samego przekroju okrywy.

Suszone fragmenty okrywy o niższej wilgotności charakteryzują się wyższą wytrzymałością na rozciąganie; często nawet wielokrotnie, stąd można oczekiwać, że dla dużych gradientów wilgotności, wywołane suszeniem naprężenia skurczu σ_s zawsze osiągną wartości większe, niż niszczące naprężenia rozciągające wilgotnej okrywy σ_u. Dlatego wystarczy sprawdzić warunek konieczności uszkodzenia okrywy tzn.: przypadku, w którym wartość skurczu Δl_s (47) fragmentu okrywy podlegającego wysychaniu:

$$\Delta l_s = \pi D_W - 2d_K - (\pi D_S - 2d_K) \tag{47}$$

będzie większa od przyrostu długości $\Delta l_o = 2d_K\varepsilon_o$ dwóch wilgotnych odcinków d_K w trakcie ich rozciągania (przy wydłużeniu niszczącym ε_o). Warunek ten określa nierówność:

$$2d_K\varepsilon_o < \pi(D_W - D_S) \tag{48}$$

lub

$$2d_K\varepsilon_o < (\pi D_W - 2d_K)\varepsilon_s \tag{49}$$

Przekształcając powyższą nierówność (49) otrzymujemy warunek dopuszczalnego odkształcenia skurczu ε_s, którego graniczną wartość wyznaczyć można określając w testach rozciągania zakres odkształcenia niszczącego ε_o okrywy o wilgotności W z nasienia o średnicy D_W dla strefy kontaktu $2d_K$:

$$\varepsilon_s > \frac{2d_K\varepsilon_o}{\pi D_W - 2d_K} \tag{50}$$

Pomiary ekstensometryczne skurczu okrywy nasiennej dla określonego ujemnego gradientu wilgotności pozwalają wyznaczyć bezpośrednio wartość odkształcenia ε_s umożliwiając określenie zakresu, w którym powyższa nierówność będzie spełniona; czyli gdy skurcz wywołany suszeniem okrywy spowoduje jej uszkodzenie.

5. METODY EKSPERYMENTALNE

Wartości rejestrowane w testach ściskania nasion często odzwierciedlają złożoną wytrzymałość konstrukcji jaką jest składające się ze ściskanych liścieni nasienie otoczone rozciąganą okrywą, a wpływ wilgotności na zmianę właściwości mechanicznych poszczególnych elementów składowych tej konstrukcji zwykle ma decydujący wpływ na wytrzymałość mechaniczną całych nasion oraz ich odporność na uszkodzenie. Uzyskane wyniki w prowadzonych dotychczas badaniach własnych, dotyczących właściwości mechanicznych nasion grochu i rzepaku [18-41, 72, 140, 141], pozwoliły zaobserwować wpływ okrywy nasiennej na całkowitą wytrzymałość mechaniczną nasion w zakresie dużych deformacji, jednak nie pozwoliły wyjaśnić wielu przyczyn powstawania uszkodzeń często spotykanych podczas zbioru, omłotu i suszenia nasion.

Podobna budowa nasion wszystkich roślin strączkowych dała podstawę do wspólnego podejścia w rozważaniach modelowych, a proponowane w poprzednim rozdziale mechanizmy powstawania uszkodzeń mogą być powodowane:

- naprężeniami rozciągającymi w okrywie podczas deformacji postaciowej nasion,
- naprężeniami złomu rozdzielczego dla deformacji sprężystej i postaciowej liścieni,
- naprężeniami ścinającymi w okrywie podczas połówkowania nasion

oraz

- naprężeniami skurczu okrywy w trakcie suszenia nasion.

Lokalne zróżnicowanie właściwości mechanicznych nasion, a zarazem ich niejednakowa odporność na uszkodzenie w różnych zakresach wilgotności zmusiła do opracowania wielu nowych metod odrębnych dla liścieni, okrywy nasiennej i całych nasion, tak aby obejmowały swym zakresem następujące grupy badań:

- Badania wpływu wilgotności na zmiany objętościowe nasion
  - pomiary geometryczne pęczniejących i suszonych nasion
  - ekstensometryczne pomiary deformacji skurczu okrywy
- Określanie wpływu okrywy na przebieg suszenia nasion
- Badania właściwości mechanicznych liścieni
  - test ściskania pojedynczych liścieni
  - makro- i mikroskopowa weryfikacja uszkodzeń liścieni
- Badanie właściwości mechanicznych okrywy nasiennej
  - test rozciągania okrywy
  - statyczny pomiar naprężenia skurczu suszonej okrywy
  - mikroskopowa ocena budowy okrywy
- Badanie właściwości mechanicznych nasion
  - test połówkowania nasion (interpretacja mechanizmu ścinania okrywy)
  - test ściskania nasion (interpretacja mechanizmu rozciągania okrywy)

Wszystkie zastosowane metody eksperymentalne zostały opracowane w ramach realizacji niniejszej pracy oraz niektórych wcześniejszych prac autorskich [30, 35, 37, 45, 49] i współautorskich [32, 48, 72] w celu weryfikacji zaproponowanych rozważań modelowych oraz wyjaśnienia przyczyn powstawania uszkodzeń.

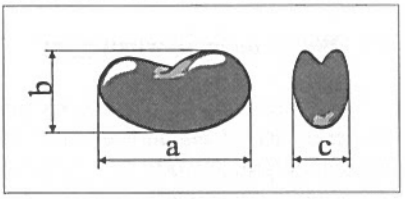
5.1. Metody oceny wpływu wilgotności na deformację objętościową nasion

Nasiona roślin strączkowych pod wpływem zmian wilgotności podlegają deformacji, której najbardziej widocznym efektem jest zmiana objętości [103, 105], a w konsekwencji ich wymiarów geometrycznych [45, 104]. Postanowiono sprawdzić przyrosty objętości nasion roślin strączkowych powodowane wzrostem wilgotności oraz charakter przebiegu tych zmian w funkcji czasu i wilgotności dla poszczególnych gatunków i odmian. Sprawdzono również zmiany geometryczne we wszystkich kierunkach pęcznienia oraz odwracalność tego procesu; to jest kurczenia się nasion w trakcie suszenia. Do tego celu użyto elektronicznej suwmiarki.

Postanowiono wyznaczyć zmiany geometryczne skurczu okrywy podczas jej suszenia, tak aby sprawdzić czy zmiana pola powierzchni okrywy otaczającej liścienie pęczniejących nasion powodowane są przyrostem objętości liścieni czy też zmianami geometrycznymi zależnymi bezpośrednio od zmian wilgotności. Wymagało to jednak opracowania metody pomiarowej i oddzielnego stanowiska wyposażonego w ekstensometryczny układ pomiarowy.

5.1.1. Pomiary geometryczne pęczniejących i suszonych nasion

Ocenę geometrycznych zmian nawilżanych nasion roślin strączkowych wykonano za pomocą elektronicznej suwmiarki VIS model MAUaE 150 mierząc ich wymiary z dokładnością do 0.01 mm. Nasiona mierzono w trzech płaszczyznach przyjmując jako wymiary wartości rejestrowane pomiędzy płaszczyznami pomiarowymi (Rys. 11). Pomiary przeprowadzano co osiem godzin, aż do maksymalnego przyrostu objętości nasion w okresie pęcznienia; zgodnie z metodyką przedstawioną we wcześniejszych pracach [45, 50]. Następnie nasiona suszono i po każdej kolejnej utracie 10% wilgotności mierzono wymiary nasion w tych samych trzech płaszczyznach, aż do osiągnięcia stałej masy nasion.

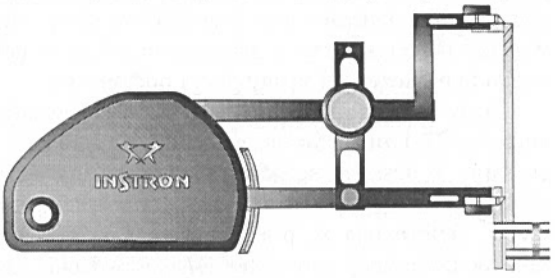


Rys. 11 . Mierzone wymiary nasion.

5.1.2. Ekstensometryczny pomiar skurczu okrywy

Stanowisko do pomiaru odkształcenia skurczu okrywy podczas jej suszenia i nawilżania składa się z układu suszącego i układu pomiarowego.

Układ pomiarowy wyposażono w ekstensometr firmy Instron model 2630-107 o maksymalnym zakresie pracy do +25 mm (±2.5 mm). Pomiar skurczu okrywy wymagał wykonania specjalnych uchwytów rewersyjnych (rys. 12) umożliwiających pomiar odkształcenia w kierunku przeciwnym do kierunku pracy ekstensometru. Pomiar ten był możliwy dzięki zastosowaniu sposobu wycinania pasków okrywy używanego w opracowanej przez autora metodzie badania wytrzymałości okrywy na rozciąganie [25]. Maksymalnie nawilżone paski okrywy zakładano na równoległe walce mocowane do ramion ekstensometru, które odległe były o długość równą najdłuższemu wymiarowi paska okrywy nasiennej przed suszeniem. Ekstensometr podłączony do wytrzymałościowej maszyny tej samej firmy umożliwiał rejestrację odkształcenia w funkcji czasu (malejącej wilgotności w trakcie suszenia).



Rys.12. Uchwyt rewersyjny ekstensometru 2630-107.

W celu sprawdzenia zachowania się okrywy w różnych warunkach suszenia zastosowano układ suszący [37, 50] składający się z suszarki o skokowo regulowanej prędkości obrotowej wirnika; wyposażony w trzy elektryczne elementy grzejne. Zapewniało to uzyskanie następujących, zróżnicowanych kombinacji parametrów wylotowych czynnika suszącego (temperatura i prędkości przepływu):

- 22^0 C; 10.5 m/s,
- 22^0 C; 15.6 m/s,
- 42^0 C; 4.3 m/s,
- 52^0 C; 10.5 m/s,
- 62^0 C; 15.4 m/s.

Wilgotne paski okrywy zamocowane w walcowych uchwytach ramion ekstensometru suszono powietrzem rejestrując skurcz okrywy w czasie 2 minut. Czas ten zapewniał ubytek wilgotności sięgający 60 %, a w przypadku suszenia ogrzanym powietrzem wystarczał na całkowite wysuszenie okrywy nasiennej.

5.2. Określenie wpływu okrywy na przebieg suszenia nasion

Badanie wpływu okrywy na przebieg suszenia nasion zostało przeprowadzone jako uzupełniające, a celem jego było stwierdzenie czy i w jakim stopniu okrywa nasienna utrudnia migrację wody z liścieni oraz czy gwałtowne zmiany wilgotności okrywy podczas jej suszenia związane są z parametrami czynnika suszącego. W tym celu nasiona suszono wagosuszarką WPE 30 S przeprowadzając pomiary dla trzech sposobów przygotowania próbek nasion:

- nasiona całe otoczone okrywą nasienną,
- nasiona pozbawione okrywy nasiennej,
- nasiona rozdrobnione.

Przebieg ubytku wody z suszonych nasion dla trzech sposobów przygotowania próbek rejestrowano aż do uzyskania stałej masy.

5.3. Badanie właściwości mechanicznych liścieni

Do pomiaru wytrzymałości mechanicznej liścieni zastosowano test ściskania osiowego między równoległymi płytkami. Liścienie ściskano osiowo w kierunku prostopadłym do płaszczyznay podziału, a drobne nierówności powierzchni szlifowano na płycie traserskiej stosując papier ścierny o ziarnistości 1000, w celu wyeliminowania nierównomierności rozkładu naprężeń od strony płytki podporowej.

Testy ściskania przeprowadzono wykorzystując maszynę wytrzymałościową Instron model 6022 i zastosowano następujące prędkości przesuwu głowicy: 1, 5, 20, 50 i 100 mm/min. W testach ściskania liścieni nasion wszystkich badanych odmian rejestrowano następujące wielkości mechaniczne odpowiadające deformacji powodującej uszkodzenie: siła F, deformacja d, praca deformacji L oraz wyznaczono moduł sprężystości E w zakresie deformacji sprężystej. Dla sprawdzenia zakresu sprężystości nasion o wilgotności poniżej 8 %, szlifowane liścienie (połówki nasion) dosuszano i po każdej utracie 2 % wilgotności wykonywano testy wytrzymałościowe. Deformację liścieni badanych odmian rejestrowano dla następujących poziomów obciążeń: 25, 50, 75 i 100 N stosując wcześniej wymienione prędkości przesuwu głowicy.

5.4. Makro- i mikroskopowa weryfikacja uszkodzeń

Przeprowadzone badania na liścieniach nasion roślin strączkowych w celu poznania wpływu wilgotności oraz prędkości deformacji na ich wytrzymałość mechaniczną pozwoliły zaobserwować charakterystyczne przykłady uszkodzeń szczelinowych, czyli złom rozdzielczy; będący przyczyną powstawania uszkodzeń. Makro- i mikroskopowa weryfikacja uszkodzeń stwarzała możliwość łatwiejszego obserwowania zmian strukturalnych tkanki uszkodzonych liścieni.

Weryfikację fotograficzną uszkodzeń prowadzono dla wszystkich stosowanych wilgotności oraz prędkości deformacji w celu sprawdzenia jej wpływu na charakter powstawania złomu rozdzielczego. W celu sprawdzenia wpływu suszenia na strukturę komórkową deformowanej tkanki, liścienie dosuszano przed deformacją co 2 % do wilgotności w-x %, stosując wymienione w poprzednim rozdziale prędkości.

Do oceny struktury tkankowej preparaty okrywy oraz liścieni nasion roślin strączkowych utrwalano zgodnie z procedurą opisaną przez Fornala i innych [53-55] oraz Kim i Hung [84], a analizę mikroskopową wykonano po ich wysuszeniu w punkcie krytycznym (Blazers Union) i napylaniu węglem i złotem (JEOL JEE 4X) w skaningowym mikroskopie elektronowym JEOL JSM 5200 przy napięciu przyspieszającym 10 keV.[1]

Do weryfikacji fotograficznej uszkodzeń, oznaczania pola powierzchni kontaktu, charakteru przełomu liścieni stosowano ośmio cyfrowo-literowe oznaczenia kodowe, których cztery pierwsze litery oznaczały gatunek i odmianę zgodnie z wykazem (spis oznaczeń), dwie cyfry następne oznaczały wilgotność, siódmy znak P oznaczał test ściskania liścieni (połówki nasion) a ostatnia cyfra oznaczała kod prędkości deformacji.

5.5. Badanie właściwości mechanicznych okrywy nasiennej

Wytrzymałość okrywy tak jak innych materiałów roślinnych w największym stopniu warunkowana jest wilgotnością. Z jednej strony, zmiana wilgotności może pociągać za sobą zmianę wytrzymałości na rozciąganie okrywy nasion, a z drugiej strony, spodziewać się można zmian objętościowych; a zarazem zmiany wymiarów geometrycznych i skurczu okrywy, który powodować może powstawanie naprężeń w trakcie suszenia. Stąd też, badanie wytrzymałości mechanicznej okrywy wymagało przeprowadzenia dwóch oddzielnych testów:

- rozciągania okrywy w celu wyznaczenia charakterystyk wytrzymałościowych w funkcji wilgotności
- pomiaru siły skurczu powodowanego suszeniem.

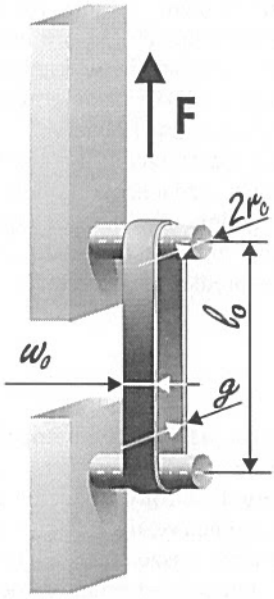
W obu testach wykorzystano układy pomiarowe stosowane w testach rozciągania, gdzie wyniki można interpretować w oparciu o prawo Hooke'a. Testy te wymagają wycięcia próbek o stałym polu powierzchni przekroju, zapewniającym prawidłową interpretację zgodną z najprostszymi prawami fizyki. W obu tych testach zastosowano metodę pomiaru wytrzymałości na rozciąganie okrywy nasion roślin strączkowych oraz metodę preparacji wycinków okrywy opracowane przez autora [25, 37]. Zgodnie z wcześniejszymi badaniami, nasiona nawilżane już do wilgotności 35÷45 % dały się łatwo przecinać i wycięte paski okrywy miały jednakową szerokość. Dla każdej z badanych odmian wycięto do testów rozciągania po 33 próbki (paski okrywy). Zastosowana metoda pozwala ominąć konieczność mocowania próbki w uchwytach ściskających.

---

[1] Metody eksperymentalne dotyczące obciążeń mechanicznych liścieni i suszenia nasion oraz makroskopową dokumentację fotograficzną prowadzono w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie, a w Oddziale Nauki o Żywności Instytutu Rozrodu Zwierząt i Badań Żywności PAN w Olsztynie wykonano dokumentację fotograficzną mikroskopii skaningowej oraz dokonano analizy strukturalnej uszkodzonych nasion.

5.5.1. Test rozciągania okrywy

Testy rozciągania przeprowadzono wykorzystując maszynę wytrzymałościową Instron model 6022 stosując prędkość przesuwu głowicy 5 mm/min. Test wymagał wyposażenia głowicy oraz stolika oporowego maszyny Instron w specjalne uchwyty umożliwiające założenie pasków okrywy na walce o średnicy $2r_c$ (rys. 13). Pole przekroju próbki określano znając szerokość paska w_o równą odległości pomiędzy ostrzami tnącymi oraz grubość g okrywy wyznaczoną dla wszystkich badanych gatunków i odmian. Wyznaczenie powyższych wielkości pozwala na obliczenie wytrzymałości na rozciąganie oraz modułu sprężystości okrywy nasiennej. W testach rozciągania okrywy nasiennej wszystkich badanych odmian rejestrowano następujące wielkości mechaniczne odpowiadające deformacji powodującej uszkodzenie: siłę F, deformację d i pracę deformacji L oraz wyznaczono moduł sprężystości E_o w zakresie deformacji sprężystych. Deformację wydłużenia okrywy w zakresie odkształceń sprężystych rejestrowano dla następujących poziomów obciążeń: 0.2, 0.4, 0.6 i 0.8 N.



Rys. 13. Pasek okrywy w uchwytach walcowych.

Niewielka masa pasków okrywy (1.8÷28.4 mg) i łatwość wysychania nie pozwalała na przygotowanie próbek o żądanej i określonej wilgotności metodami wcześniej stosowanymi, w których do próbki o znanej masie dodaje się określoną ilość wody. Dlatego opracowano metodę [37, 50], w której każdy z nawilżonych pasków okrywy był podsuszany w czasie zapewniającym przybliżoną żądaną wilgotność. Następnie wycinek okrywy ważony był przed i po rozerwaniu za pomocą wagi WPS 72 o dokładności 0.2 mg. Ważenie przed i po rozerwaniu próbki jak też po całkowitym wysuszeniu zapewniało precyzyjne określenie poziomu wilgotności okrywy, jaki posiadała w trakcie rozciągania.

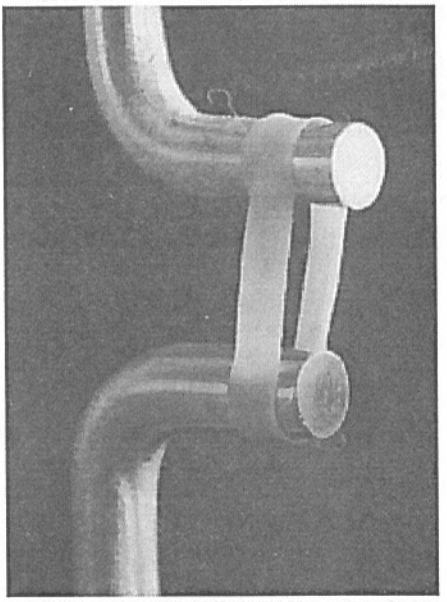
5.5.2. Statyczny pomiar naprężenia skurczu okrywy

Testy pomiaru siły skurczu okrywy przeprowadzono wykorzystując maszynę wytrzymałościową Instron model 6022 wyposażoną w uchwyty głowicy i stolika oporowego opracowane dla przeprowadzania testów rozciągania. Wycinki okrywy preparowano zgodnie z wcześniej opisaną procedurą dla testu rozciągania.

Pomiar polegał na statycznym pomiarze narastającej siły paska okrywy podlegającej skurczowi w trakcie suszenia próbki. Wilgotne paski okrywy zakładano na równoległe walcowe uchwyty mocowane do stolika oporowego i głowicy. Następnie rozciągano pasek okrywy do momentu pojawienia się naprężenia rozciągającego, tak aby był wyprostowany do najdłuższego jego wymiaru. Wartość progowa siły równa 0.1 N powodowała wyłączenie mechanizmu przesuwu głowicy umożliwiając rejestrację siły powstającej w trakcie suszenia w funkcji czasu (malejącej wilgotności). Do wywołania sił skurczu okrywy podczas jej suszenia wykorzystano układ suszący [50], zastosowany również podczas ekstensometrycznych pomiarów deformacji skurczu (rozdz. 5.1.2.).

W celu sprawdzenia zachowania się okrywy w różnych warunkach suszenia zastosowano takie same kombinacje parametrów wylotowych czynnika suszącego jak przedstawione w rozdziale 5.1.2.

Wilgotne paski okrywy założone na walcowe uchwyty (rys. 14) suszono powietrzem rejestrując siłę skurczu okrywy w czasie 5 minut. Czas ten zapewniał ubytek wilgotności sięgający 60 %, a w przypadku suszenia ogrzanym powietrzem wystarczał na całkowite wysuszenie okrywy nasiennej. W trakcie suszenia nie ma możliwości określenia zmian wilgotności, jednak ważenie próbek przed i po suszeniu zapewnia określenie gradientu wilgotności i odpowiadającego przyrostu siły skurczu oraz rejestrację charakteru przebiegu tej siły w czasie.



Rys. 14. Statyczny pomiar siły skurczu.

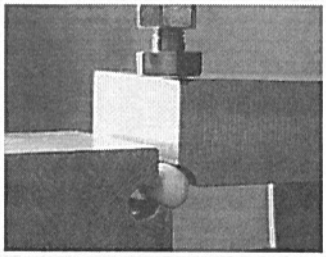
Znając pole przekroju suszonej suszonej okrywy w płaszczyźnie przekroju poprzecznego podwójnego paska okrywy wyznaczyć można maksymalne naprężenia skurczu dla różnych parametrów czynnika suszącego. Symulowano także spotykane często w praktyce warunki, gdzie w trakcie suszenia ogrzanym powietrzem dochodzi do wyłączenia grzałek i temperatura gwałtownie spada do temperatury otoczenia lub ponownie wzrasta po włączeniu grzałek.

5.6. Właściwości mechaniczne nasion

Zaobserwowany, już we wcześniejszych pracach [38, 41, 49, 50] mechanizm uszkodzenia nasion suchych i wilgotnych jest całkowicie różny. Dla nasion o wilgotności powyżej 12 % wnętrze ich jest deformowane, a uszkodzeniu ulega jego okrywa. Natomiast nasiona o wilgotności równoważnej do 8 %, uszkodzone zostają przy niewielkim odkształceniu na skutek pęknięcia liścieni i w tym zakresie okrywa nasienna nie podlega rozciąganiu podczas odkształcenia nasion, co potwierdzono we wstępnych badaniach oraz wyliczeniach modelowych [35]. Stosowanie teorii Hertz'a pozwala na poprawną interpretację wykresów siła-przemieszczenie dla nasion nie nawilżanych o najbardziej zbliżonych właściwościach do sprężystych, jednak dla bardzo małych odkształceń dokładniejszą metodą opisującą właściwości mechaniczne było stosowanie testu ściskania dla szlifowanych liścieni (rozdział 5.3). Dla większych odkształceń, jak również w przypadku nasion o wyższej wilgotności konieczna jest zupełnie odmienna od teorii Hertz'a interpretacja procesu ściskania nasion. Dlatego też postanowiono badać całe nasiona w testach ściskania osiowego dla wilgotności powyżej 10 %.

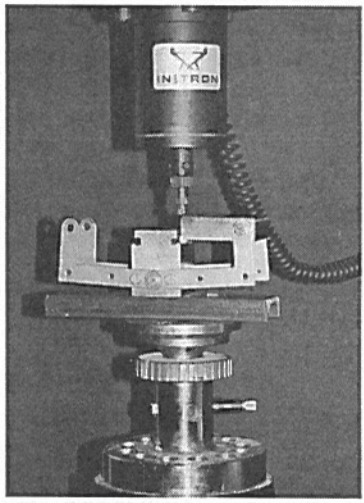
5.6.1. Test połówkowania nasion

Metoda pomiaru wytrzymałości mechanicznej pojedynczych nasion w teście połówkowania polega na zastosowaniu mechanizmu wymuszającego ścinananie nasion położonych równolegle płaszczyzną podziału liścieni do kierunku działania obciążenia (rys. 15). Test ten miał na celu sprawdzenie przyczyny i mechanizmu powstawania uszkodzeń nasion suchych, najbardziej podatnych na połówkowanie, w zakresie dużych prędkości przemieszczania i deformacji. Do tego celu wyposażono maszynę wytrzymałościową Instron model 6022 w mechaniczny układ ścinający (rys. 16), który zapewnia odpowiednią odległość między elementami roboczymi mechanizmu, dla nasion poszczególnych gatunków i odmian.



Rys. 15. Mechanizm ścinający.

Testy wytrzymałościowe odpowiadające mechanizmowi "połówkowania" suchych nasion roślin strączkowych przeprowadzono w celu znalezienia bezpiecznych zakresów odkształceń nieniszczących dla różnych prędkości deformacji. Z wykresów odczytywano następujące wielkości mechaniczne odpowiadające deformacji powodującej uszkodzenie: siła F, deformacja d, umożliwiające obliczenie pracy powodującej uszkodzenie okrywy nasion L oraz wyznaczono moduł sprężystości okrywy E_{jp}. Testy przeprowadzono stosując następujące prędkości deformacji oznaczone kodami:



Rys. 16. Układ pomiarowy testu połówkowania.

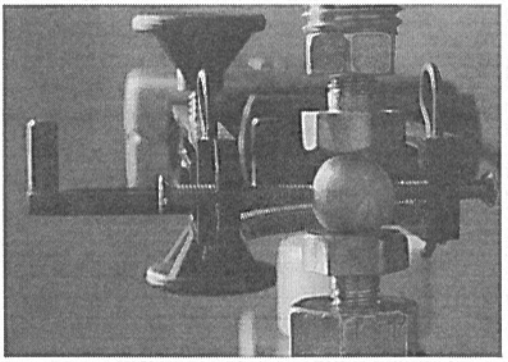
- **1** - 1 mm/min
- **5** - 5 mm/min
- **7** - 20 mm/min
- **8** - 50 mm/min
- **9** - 100 mm/min
- **2v** - 200 mm/min
- **4v** - 400 mm/min
- **6v** - 600 mm/min
- **8v** - 800 mm/min
- **0v** - 1000 mm/min

Deformację liścieni badanych odmian rejestrowano dla następujących poziomów obciążeń: 25, 50, 75 i 100 N oraz wyżej wymienionych prędkości przesuwu głowicy.

5.6.2. Test ściskania nasion

Metoda pomiaru wytrzymałości mechanicznej pojedynczych nasion polega na zastosowaniu testu ściskania osiowego całych nasion między równoległymi płytkami. Nasiona o wilgotności powyżej 10 %, czyli wilgotności jaką najczęściej posiadają podczas

zbioru, stają się bardziej plastyczne odkształcając się w dużym zakresie powodując rozciąganie okrywy nasiennej, aż do jej uszkodzenia. Stopień wypełnienia okrywy przez pęczniejące liścienie jest bardzo zróżnicowany i deformacja postaciowa wywołuje uszkodzenie okrywy przy różnych odkształceniach ściskanych nasion. Przedstawione rozważania modelowe [35] pozwoliły na wyznaczenie niektórych wielkości geometrycznych opisujących deformację postaciową wilgotnych nasion o kształcie kulistym. Dlatego weryfikujące badania ściskania nasion przeprowadzono tylko na nasionach gładkich o kształcie kulistym dla odmian grochu: Diament, Opal i Sześciotygodniowy.



Rys. 17. Ekstensometryczny pomiar przyrostu średnicy dla deformacji postaciowej nasienia grochu.

Eksperymentalne potwierdzenie poprawności rozważań modelowych możliwe było dopiero w niniejszej pracy dzięki opracowaniu stanowiska (rys. 17) umożliwiającego pomiar odkształcenia w płaszczyźnie prostopadłej do osi obciążenia. Testy ściskania całych nasion wykonano przy następujących poziomach wilgotności: 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 30, 40 i 50 %; rejestrując przebieg zmian siły obciążającej w funkcji przemieszczenia. Do tego celu użyto maszynę wytrzymałościową Instron model 6022 wyposażoną w ekstensometry: 2630-107 i 2640-008 tej samej firmy.

W trakcie ściskania nasion rejestrowano równocześnie wielkości z dwóch układów pomiarowych tj.: układu ekstensometrycznego umożliwiającego pomiar odkształcenia w płaszczyźnie poziomej prostopadłej do kierunku siły oraz układu siła-przemieszczenie. Dane te umożliwiły wyznaczenie następujących wartości pośrednich oraz w oparciu o rozważania modelowe wartości zależnych opisujących deformację postaciową nasion i ich okrywy:

Wielkości mierzone i wyznaczone w układzie siła-przemieszczenie:

ε - odkształcenie w kierunku ściskania,
D_v - średnica nasion w kierunku obciążenia przed deformacją,
d - deformacja rejestrowana w testach wytrzymałościowych,
d_s - deformacja sprężysta nasion,
d_p - deformacja postaciowa nasion bez naprężania okrywy,
d_u - deformacja postaciowa nasion do rozerwania okrywy,
F - siła rejestrowana w testach wytrzymałościowych,
F_s - przyrost siły w zakresie deformacji sprężystej,
F_h - przyrost siły w zakresie rozciągania okrywy,
F_u - siła w zakresie deformacji powodującej uszkodzenie okrywy,
L - praca w zakresie deformacji niszczącej,
E_{os} - moduł sprężystości.

Wielkości mierzone i wyznaczone w układzie ekstensometrycznym:

D_o - średnica nasion prostopadła do kierunku obciążenia przed deformacją,
D_h - średnica nasion prostopadła do kierunku obciążenia po deformacji,
ΔD - przyrost średnicy w kierunku działania ekstensometru,
DD_h - przyrost średnicy w zakresie rozciągania okrywy nasiennej,
ε_o - odkształcenie obwodowe okrywy.

Wielkości wyznaczone w oparciu o zależności modelowe:

d_K - średnica pola powierzchni kontaktu,
A_K - pole powierzchni kontaktu,
k_K - łuk czaszy deformacji postaciowej nasion wilgotnych,
E_{om} - moduł sprężystości okrywy wyznaczony z wyliczeń modelowych,
p_w - ciśnienie wewnętrzne,
Δp_w - przyrost ciśnienia wewnętrznego,
p_p - ciśnienie deformacji postaciowej,
σ_k - średnie naprężenie na powierzchni kontaktu,
D_K - średnica nasion w deformacji modelowej o zarysie kulistym,
D_P - średnica nasion w deformacji modelowej o zarysie parabolicznym,
S_{BK} - powierzchnia okrywy nasion w deformacji o zarysie kulistym,
S_{BP} - powierzchnia okrywy nasion w deformacji o zarysie parabolicznym.

Pomiary ekstensometryczne miały na celu weryfikację pewnych rozważań modelowych opisujących odkształcenia postaciowe nasion i wyjaśnienie powstawania uszkodzeń okrywy w zakresie dużej deformacji postaciowej wilgotnych nasion.

6. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

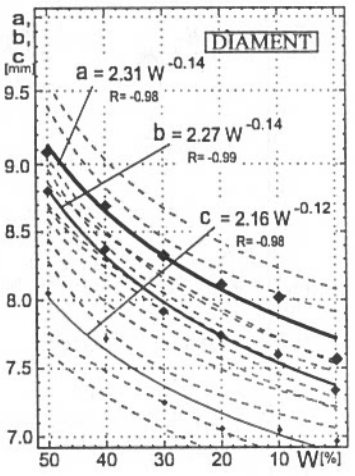
W pracy przedstawiono wyniki badań uzyskane za pomocą metod pomiarowych opracowanych odrębnie dla liścieni, okrywy nasiennej oraz całych nasion. Zastosowane metody pozwoliły scharakteryzować badany materiał, określając zmienność obserwowanej cechy; ułatwiając wyjaśnienie mechanizmu powodującego uszkodzenie w poszczególnych zakresach wilgotności.

Przedstawione wyniki badań dotyczące poszczególnych testów oparte są tylko na tych odmianach, które w charakterystyczny sposób wyróżniały pod względem właściwości mechanicznych nasiona lub ich okrywę spośród nasion danego gatunku, czy też charakteryzowały badaną cechę lub pozwalały wyjaśnić mechanizm uszkodzenia. Rezultaty eksperymentów wykonanych dla nasion roślin strączkowych wszystkich odmian w ramach badanych gatunków objętych wykazem wcześniej przedstawionym (rozdział 3) zamieszczono w sprawozdaniu merytorycznym z realizacji projektu badawczego [50].[2]

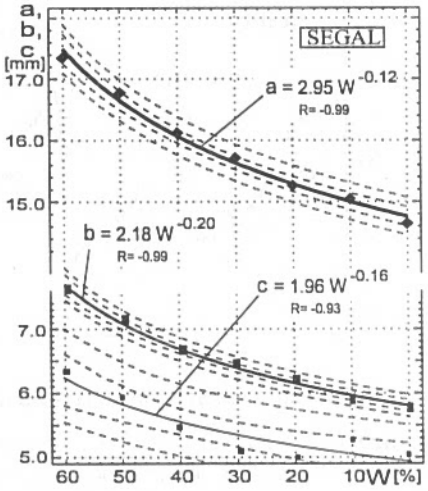
[2] Sprawozdanie merytoryczne z grantu KBN nr 5 S306 010 06, w ramach którego wykonywano niniejszą pracę, obejmuje wyniki badań uzyskane dla nasion wszystkich badanych odmian roślin strączkowych.

6.1. Zmiany geometryczne w trakcie nawilżania i suszenia nasion

Pomiary zmian geometrycznych nawilżanych nasion przeprowadzono dla wszystkich badanych odmian nasion roślin strączkowych. Suche nasiona grochu badanych odmian o wszystkich wymiarach zbliżonych i kształcie kulistym pęczniały jednorodnie we wszystkich kierunkach pomiaru (rys. 20). Przykładowo średnie wartości wymiarów *a*, *b* i *c* dla odmiany Sześciotygodniowy przed nawilżaniem wynosiły odpowiednio 7.29, 6.83 i 6.55 mm, a po całkowitym nawilżeniu wzrosły do: 10.13, 9.93 i 8.81 mm. Proces ten był prawie całkowicie odwrotny i podczas suszenia nasiona zmniejszały wszystkie wymiary osiągając następujące wartości: 8.61, 7.31 i 7.39 mm. Podobnie zachowywały się pozostałe nasiona odmian jadalnych grochu siewnego uprawianych na suche nasiona takich jak Diament i Agat oraz pastewnej odmiany Fidelia o nasionach gładkich i okrągłych a także nasiona drobne odmiany o nasionach pomarszczonych Apatyt. Nasiona grochu odmiany Diament charakteryzowały się podczas suszenia prawie idealnie kulistym kształtem. Zmiany wszystkich wymiarów nasion dla malejącej wilgotności najdokładniej opisuje funkcja potęgowa, a zbliżone współczynniki równań oraz wysokie współczynniki korelacji potwierdzają ich regularny kształt (rys. 18). Najmniej regularne kształty prezentowała odmiana warzywna Meteor o nasionach pomarszczonych (rys. 20), której przyrosty wymiarów były niejednorodne i tak średnie wartości wymiarów *a*, *b* i *c* przed nawilżeniem wynosiły odpowiednio 6.46, 7.19 i 6.26 mm, a po całkowitym nawilżeniu wzrosły do: 10.65, 9.82 i 9.69 mm. Po wysuszeniu wymiary nasion malały osiągając wartość 8.45 mm, choć dla wymiaru *a* proces ten był zaledwie w 50 % odwracalny.

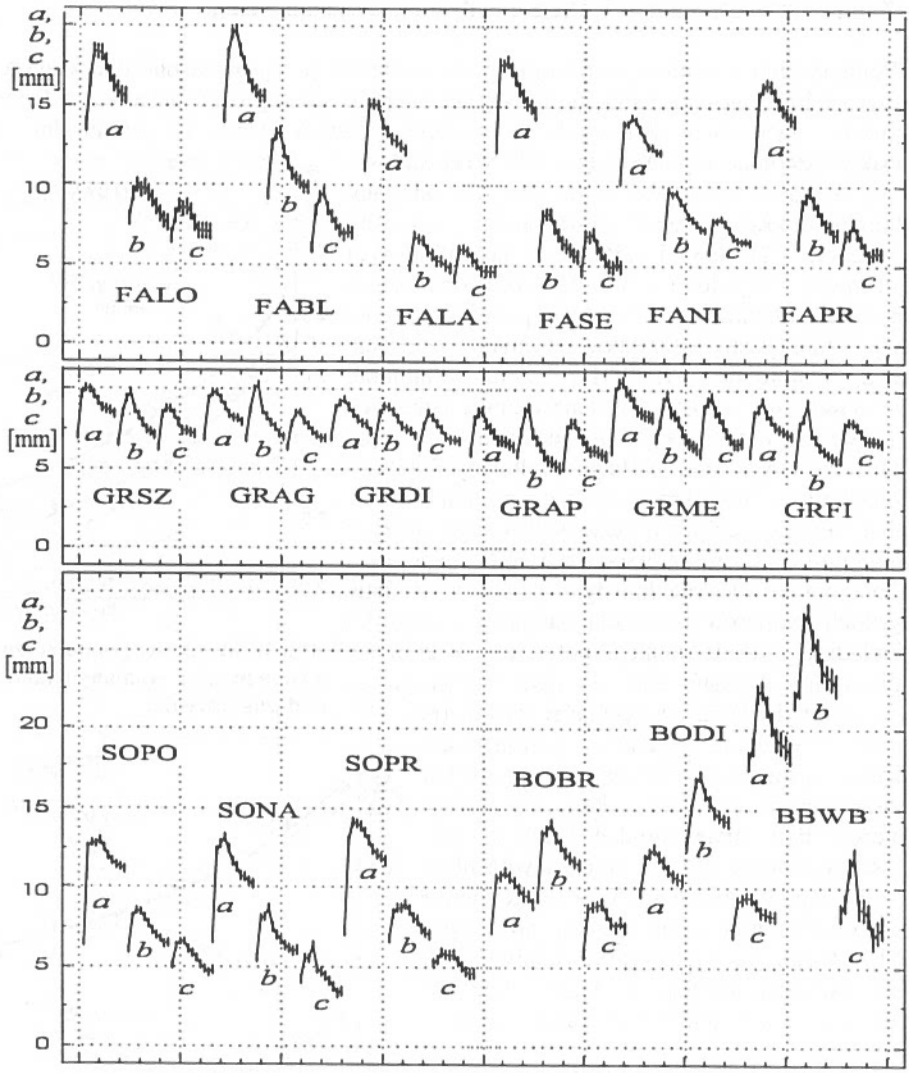


Rys. 18. Wielkości geometryczne nasion grochu odmiany Diament podczas suszenia.



Rys. 19. Wielkości geometryczne nasion fasoli odmiany Segal podczas suszenia.

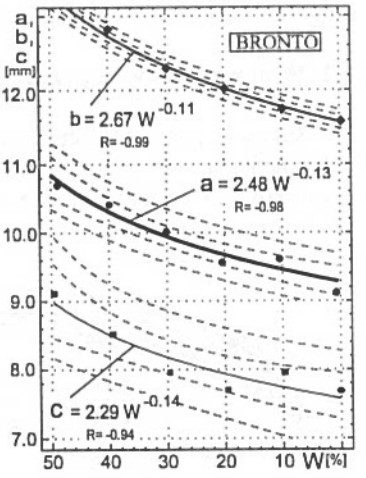
Nasiona fasoli wszystkich badanych odmian posiadały prawie idealny kształt walczaka; charakteryzujący się wydłużonym kształtem o przekroju kołowym. Na przykładzie nasion fasoli odmiany Segal przedstawiono kształt oraz zmiany wszystkich wymiarów nasion podczas suszenia, które to również najdokładniej opisuje funkcja potęgowa (rys. 19). Nasiona fasoli wszystkich badanych odmian (rys. 20) charakteryzowały się tym, że wymiar *a* okazał się dwukrotnie a w przypadku nasion odmiany Longina trzykrotnie większy od pozostałych, osiągając 14.98 mm i dla *b* i *c* odpowiednio 8.49 i 7.26 mm. Nasiona tej odmiany po



Rys. 20. Zmiany geometryczne podczas nawilżania i suszenia nasion.

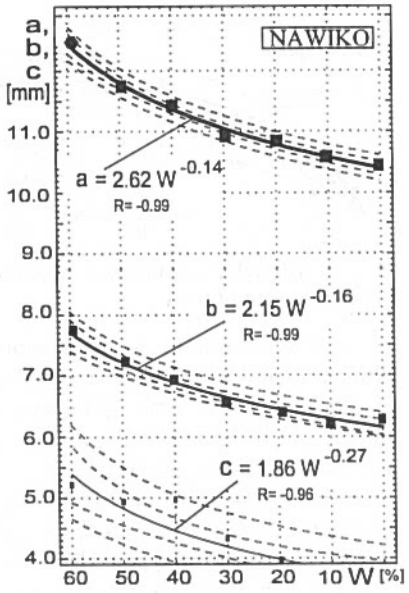
nawilżeniu posiadały wymiary osiągające wartości: 20.06, 10.75 i 9.34 mm. Dla większości odmian fasoli podczas suszenia nasiona kurczyły się osiągając wymiary zbliżone do wymiarów nasion przed ich nawilżeniem, za wyjątkiem wymiaru *a*, który również malał ale w mniejszym stopniu. Dla odmian Laura, Segal, Nida, Prosna, Blanka i Longina wymiar *a* po suszeniu osiągał odpowiednio większe wartości: (11.35 < 12.35 mm), (12.58 < 14.64 mm), (10.45 < 12.24 mm), (11.77 < 14.18 mm), (15.51 < 16.96 mm) i (14.98 < 16.93 mm) niż przed nawilżaniem.

Nasiona bobiku odmian Bronto i Dino pęczniały we wszystkich kierunkach równocześnie, a największe przyrosty zaobserwowano dla wymiaru *b*. W przypadku odmiany Bronto (rys. 21) funkcja potęgowa również najdokładniej opisuje skurcz nasion oraz zmiany wymiarów nasion podczas ich suszenia. Duże różnice pomiędzy wartościami dla poszczególnych wymiarów świadczą o nieregularnym kształcie nasion. Mimo, że podczas suszenia nasiona kurczyły się we wszystkich kierunkach, jednak ich wymiary nie przyjmowały wartości początkowych rejestrowanych przed nawilżaniem (rys. 20). Nasiona bobu pęczniały podobnie do nasion bobiku, lecz charakteryzowały się bardziej płaskim kształtem. Płaski kształt nasion bobu odmiany Windsor Biały potwierdza średnia wartość wymiaru c równa 7.17 mm, rosnąca wraz ze wzrostem wilgotności do 12.52 mm. Największe wartości zanotowano dla wymiaru b, który zawierał się w przedziale od 22.96 mm do 28.72 mm.



Rys. 21 . Wymiary nasion bobiku odmiany Bronto podczas suszenia.

Nasiona soi pęcznieją we wszystkich kierunkach osiągając przyrosty powyżej 90 % co świadczy o dużych zmianach objętościowych liścieni. Zjawisko to może powodować naprężenia okrywy nasiennej, jednak aby sprawdzić czy naprężenia te mogą być niszczące należało wyznaczyć zmiany geometryczne samej okrywy w funkcji wilgotności. Zmiany geometryczne nawilżanych i suszonych nasion odmian Nawiko, Polan i Progres przedstawiono również na rysunku 20. Suche nasiona badanych odmian o wszystkich wymiarach zbliżonych i kształcie prawie kulistym pęczniały niejednorodnie we wszystkich kierunkach pomiaru. Największy przyrost: 94.1, 51.7 i 44.4 % odpowiednio we wszystkich płaszczyznach *a*, *b* i *c* zaobserwowano dla odmiany Nawiko oraz odmiany Polan (91.0, 38.7 i 9.4 %). Najmniejsze przyrosty zaobserwowano dla odmiany Aldana (70.6, 29.0 i 9.8 %). Nasiona soi po nawilżeniu stają się podobne swym kształtem do nasion fasoli, a napęczniałe liścienie wykazują największe przyrosty wzdłuż płaszczyzny podziału i równolegle do zarodka. Zaobserwowane zmiany wymiaru *a*, sięgające prawie 100 % świadczyły o dużych przyrostach objętościowych liścieni. Podczas suszenia zaobserwowano kurczenie się nasion we wszystkich kierunkach pomiaru dla badanych odmian, jednak proces ten był całkowicie odwracalny tylko dla wymiarów *b* i *c*. Wymiar *a*, który najbardziej przyrastał podczas pęcznienia, w procesie suszenia nie przyjmował poprzednich wartości. Zjawisko

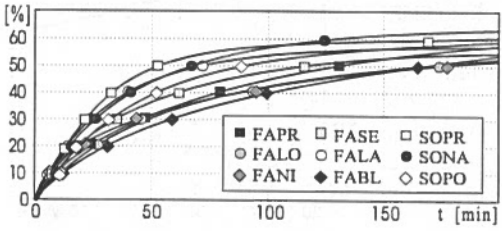


Rys. 22 . Wymiary nasion soi odmiany Nawiko podczas suszenia.

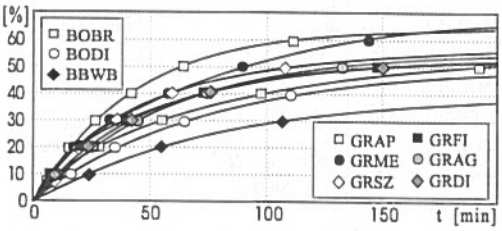
to może być jedną z przyczyn powstawania naprężeń w okrywie nasiennej podczas suszenia. Wymaga to jednak pełnego rozpoznania zachowania okrywy podczas zmian wilgotności oraz właściwości mechanicznych nasion.

6.2. Wpływ okrywy na przebieg suszenia nasion

Suszenie jest zabiegiem technologicznym, którego skutkiem jest zamierzony spadek wilgotności nasion. Tempo zmian zawartości wody w nasionach zależne jest od wielu czynników takich jak: technika suszenia, parametry pracy urządzeń suszących, parametry czynnika suszącego oraz właściwości cieplne suszonego materiału jakim w tym przypadku są nasiona roślin strączkowych. Ponieważ warunki suszenia oraz cechy materiałowe nie były obiektem badań niniejszej pracy, dlatego określono tylko zakresy czasowe przebiegów suszenia nasion, tak aby ustalić czy zmiany wilgotności liścieni mogą pokrywać się z gwałtownymi zmiany wilgotności okrywy nasiennej a także czy okrywa może utrudniać migrację wody z nasion.



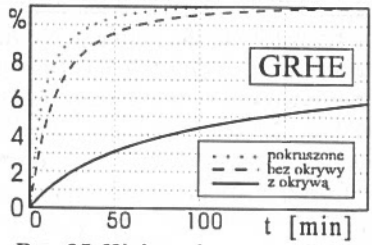
Rys. 23. Ubytek masy podczas suszenia nasion fasoli i soi.



Rys. 24. Ubytek masy podczas suszenia nasion grochu, bobu i bobiku.

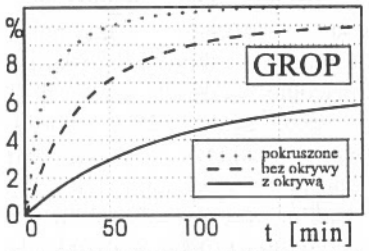
Na rysunku 23 przedstawiono przebiegi suszenia nasion 6 odmian fasoli oraz 3 odmian soi. Wszystkie nasiona badanych odmian soi wysychały w zbliżonym czasie, znacznie szybciej niż nasiona fasoli. Dla badanych nasion fasoli zaobserwowano, że wielkość nasion miała decydujący wpływ na czas suszenia. Podobny procent ubytku wody z nasion dużych notowano często po dwukrotnie dłuższym czasie. Najmniejsze ubytki wody (rys. 24) zaobserwowano dla nasion bobu odmiany Windsor Biały oraz nasion bobiku odmian Bronto i Dino, co można łączyć również z wielkością nasion oraz grubością okrywy. Wśród odmian nasion grochu najszybciej wysychały drobne nasiona odmiany Apatyt (rys. 24).

Wpływ okrywy na ubytek masy w trakcie suszenia nasion grochu przedstawiono na przykładzie nasion odmiany pastewnej Helia (rys. 25). Podobny przebieg krzywych dla grochu odmian warzywnych: Apatyt, Meteor i Polar o nasionach pomarszczonych oraz pozostałych odmian pastewnych: Fidelia i Gomik sugeruje, że okrywa wyraźnie utrudnia migrację wody z nasion i jest w zasadzie główną przeszkodą w wydobywaniu się wody. Odmiany jadalne uprawiane na suche nasiona: Agat, Diament i Opal podobnie jak warzywna (łuskowa) odmiana Sześciotygodniowy o nasionach gładkich charakteryzowały



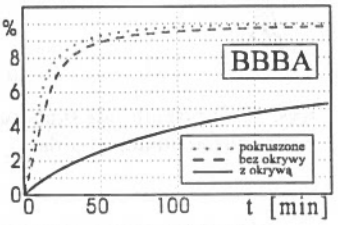
Rys. 25. Wpływ okrywy na ubytek masy suszonych nasion grochu odmiany Helia.

się bardziej przepuszczalną okrywą nasienną, a na ubytek masy w trakcie suszenia ma również wpływ pokruszenie nasion. Na rysunku 26 przedstawiono na przykładzie odmiany Opal wpływ okrywy na przebieg suszenia nasion wymienionych odmian jadalnych grochu.

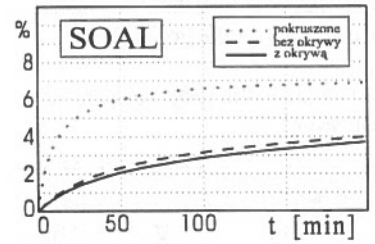


Rys. 26. Wpływ okrywy na ubytek masy suszonych nasion grochu odmiany Opal.

Wśród wszystkich badanych 10 odmian fasoli tylko barwna okrywa nasion odmiany Nida utrudnia migrację wody w nieco większym stopniu od pozostałych. Przebiegi dla innych odmian [50] są zbliżone i różnice zaobserwowane dla odmiany Longina potwierdzają raczej wpływ wielkości nasion a nie stopnia rozdrobnienia. Podobny wpływ można zaobserwować dla odmian bobiku Nadwiślański i Tom oraz bobu odmiany Windsor Biały i Bartom (rys. 27), lecz okrywa wszystkich odmian bobiku i bobu zdecydowanie utrudnia wysychanie nasion.



Rys. 27. Wpływ okrywy na ubytek masy suszonych nasion bobu odmiany Bartom.



Rys. 28. Wpływ okrywy na ubytek masy suszonych nasion soi odmiany Aldana.

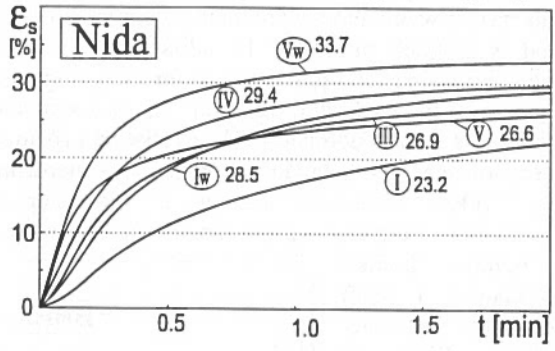
W najmniejszym stopniu okrywa nasion soi wszystkich badanych odmian wpływa na przebieg suszenia, a dla odmiany Aldana jej wpływ jest niezauważalny (rys. 28).

Przebiegi zmian wilgotności oraz zaobserwowany wpływ okrywy nasiennej na ubytek masy podczas suszenia nasion roślin strączkowych potwierdzają, że nie są możliwe gwałtowne zmiany wilgotności liścieni. Świadczy to również o tym, że objętość liścieni nie będzie malała w krótkim czasie. Wcześniejsze badania autora [23, 37, 138] dowiodły, że okrywa nasienna podlega bardzo szybkim zmianom wilgotności, których skutkiem jest znaczny skurcz sięgający nawet u niektórych odmian 35 %. Spodziewać się można, że skurcz okrywy w krótkim czasie przy stałej objętości liścieni w trakcie suszenia wywoła naprężenia rozciągające w okrywie nasiennej, a nawet niewielka deformacja postaciowa nasion spowoduje jej uszkodzenie.

6.3. Skurcz i naprężenia suszonej okrywy

Postanowiono sprawdzić wilekość skurczu dla różnych warunków suszenia oraz określić czas, po którym okrywa wysycha wywołując skurcz. Zastosowany ekstensometr firmy Instron model 2630-107 wyposażony w uchwyty rewersyjne umożliwiał rejestrację odkształcenia skurczu w funkcji czasu powodowanego suszeniem okrywy. Nawilżone paski okrywy założone na równoległe walce ramion ekstensometru wysychały w różnym czasie w zależności od parametrów wylotowych czynnika suszącego (temperatura i prędkość przepływu). Największy skurcz powodowało suszenie powietrzem ogrzanym o najwyższej temperaturze $52 \div 62^0$ C. Okrywa nasion fasoli Prosna i Segal i Longina maksymalnie kurczyła się dla poszczególnych odmian o 28.5, 33.3 i 27.5 %. Największe

wartości odkształcenia skurczu paska okrywy (33.7 %) zanotowano dla nasion fasoli odmiany Nida suszonego wzdłuż najdłuższego wymiaru a (rys. 29).



Rys. 29. Odkształcenie skurczu suszonej okrywy nasion fasoli odmiany Nida.

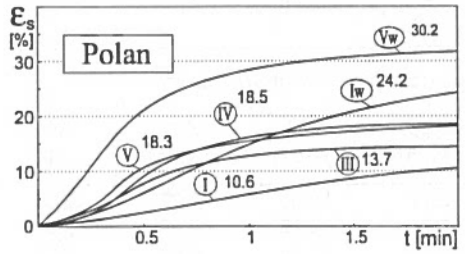
Dla odmian grochu Apatyt, Agat, Diament, Sześciotygodniowy, Fidelia i Meteor maksymalne odkształcenie skurczu osiągało odpowiednio wartości: 24.8, 28.2, 26.1, 26.8, 26.4 i 26.4 (tab. 1). Suszenie zimnym powietrzem powodowało znacznie mniejszy skurcz, który często zawierał się dla okrywy nasion grochu w przedziale 18÷20 %, a dla nasion fasoli w zakresie 20÷24 %. Okrywa nasion bobiku kurczyła się osiągając w zależności od warunków suszenia wartości od 11.9 % do 25.2 %.

Tabela. 1. Maksymalne odkształcenie skurczu ε_s (%) okrywy nasion roślin strączkowych suszonych przy różnych parametrach czynnika suszącego T_{fv}.

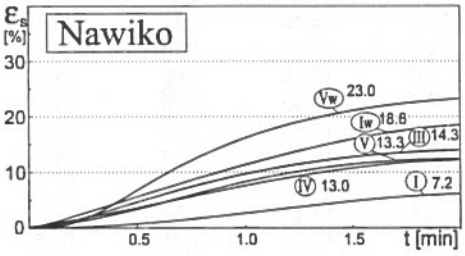
	Parametry czynnika suszącego						
Odmiany	I	Iw	II	III	IV	V	Vw
Bartom	6.5	-	-	21.5	-	24.2	-
Windsor	2.5	-	-	-	-	13.1	-
Bronto	14.5	17.9	-	21.1	18.8	25.2	24.2
Dino	12.2	11.9	-	20.6	24.5	24.6	19.8
Blanka	18.3	-	-	23.1	23.8	24.2	-
Nida	23.2	28.5	-	26.9	29.4	26.6	33.7
Prosna	20.3	22.6	-	24.2	28.5	27.3	27.3
Segal	24.1	-	-	27.4	33.3	28.4	27.5
Longina	17.0	20.8	-	21.6	21.0	21.3	27.5
Agat	20.8	-	-	23.5	28.2	23.2	-
Apatyt	22.3	-	16.5	20.4	24.8	21.3	-
Diament	17.5	-	13.8	25.7	26.1	25.3	-
Fidelia	17.3	-	16.8	26.4	24.4	24.1	-
Meteor	18.1	-	17.7	23.4	26.4	22.4	-
Sześciotygodniowy	18.3	-	19.2	25.7	26.8	26.3	-
Nawiko	7.2	18.6	-	14.3	13.0	13.3	23.0
Polan	10.6	24.2	-	13.7	18.5	18.3	30.2

Dla nasion bobu odmiany Bartom suszenie gorącym powietrzem powodowało skurcz wynoszący 24.2 %, a suszenie zimnym powietrzem powodowało skurcz poniżej 6.5 %, zaś dla nasion bobu odmiany Windsor Biały, a właściwie ich okrywy wartości te odpowiednio wynosiły 13.1 % i 2.5 % dla zimnego powietrza.

Najbardziej interesujące wydawało się sprawdzenie skurczu okrywy nasion soi, które pęczniały niejednorodnie w różnych kierunkach. Skurcz okrywy wzdłuż najdłuższego wymiaru *a* był prawie dwa razy większy niż w kierunku poprzecznym, osiągając wartości 30.2 % dla odmiany Polan (rys. 30) i 23.0 % dla odmiany Nawiko (rys. 31).



Rys. 30. Odkształcenie skurczu suszonej okrywy nasion soi odmiany Polan.

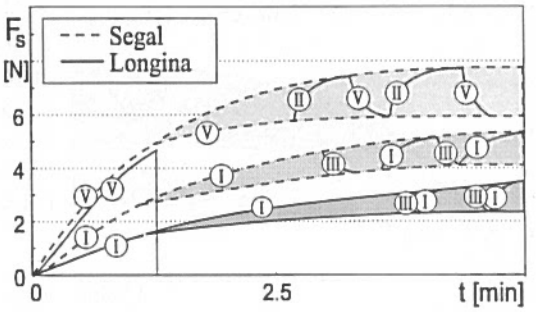


Rys. 31. Odkształcenie skurczu suszonej okrywy nasion soi odmiany Nawiko.

Dla tych samych odmian skurcz poprzeczny przyjmował odpowiednio wartości poniżej 18.5 % i 14.3 %. Wilgotne paski okrywy zamocowane w walcowych uchwytach ramion ekstensometru suszono powietrzem rejestrując skurcz okrywy w czasie 2 minut. Czas ten zapewniał ubytek wilgotności sięgający 60 %, a w przypadku suszenia ogrzanym powietrzem wystarczał na całkowite wysuszenie okrywy nasiennej często już po jednej minucie. Czas po którym okrywa wysycha i przestaje się kurczyć zawierał się w zakresie od 0.5 min do 2.5 min dla różnych warunków suszenia.

Dla ekstremalnych warunków suszenia stosowanych w badaniach już po 5÷10 s zaobserwowano skurcz okrywy nawet o 20 %. Niezależnie od badań skurczu okrywy podczas suszenia sprawdzono czy zachodzi zjawisko odwrotne i zaobserwowano, że ponowne nawilżanie okrywy powoduje jej wydłużenie.

Zaobserwowane tak duże odkształcenie okrywy powodowane zmianą jej wilgotności było powodem wyznaczenia naprężeń występujących w okrywie i siły powodującej jej skurcz. Nawilżone paski okrywy założono na równoległe walce w maszynie wytrzymałościowej Instron rejestrując przebieg siły podczas suszenia. Naprężenia powstające w suszonej okrywie zależnie od temperatury i prędkości czynnika suszącego osiągały wartości 5.5÷31.4 MPa. Najwyższe wartości siły skurczu otrzymano dla nasion o grubej okrywie takich jak odmiany bobu Bartom (14.3 N) i Windsor Biały (17.6 N) oraz odmian bobiku Bronto (13.4 N) i Dino (11.4 N). Uwzględniając jednak pole przekroju paska okrywy otrzymano następujące wartości naprężeń dla powyższych odmian: 12.8 MPa i 13.8 MPa, oraz 18.6 MPa i 12.9 MPa. Na rysunku 32 przedstawiono przebiegi wartości siły skurczu okrywy nasion fasoli odmian Segal i Longina. Siła skurczu



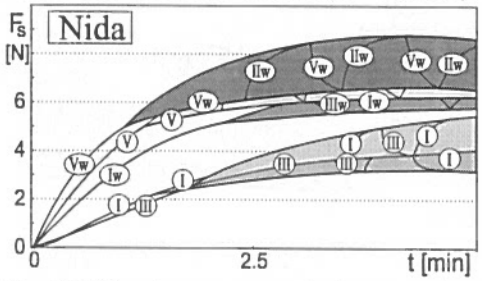
Rys. 32. Siła skurczu suszonej okrywy nasion fasoli odmian Segal i Longina.

F_s okrywy nasion fasoli osiągała wartości w zakresie 7.7÷8.8 N dla wszystkich badanych odmian, za wyjątkiem odmian o dużych nasionach Longina (3.4 N) i Blanka (4.3 N).

Tabela. 2. Wartości siły F_s i naprężenia skurczu σ_s okrywy nasion roślin strączkowych suszonych ogrzanym a następnie zimnym powietrzem.

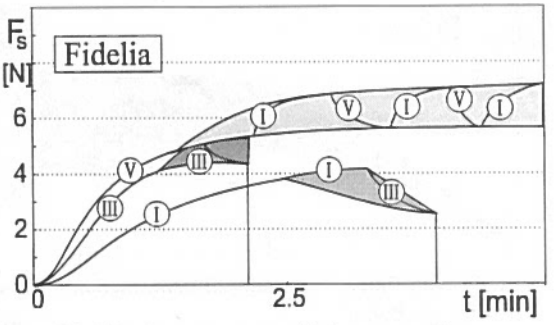
	Wielkości charakterystyczne skurczu okrywy						
Odmiany	$F_{s\,max}$ [N]	$F_{s\,min}$ [N]	ΔF_s [N]	$\sigma_{s\,max}$ [MPa]	$\sigma_{s\,min}$ [MPa]	$\Delta\sigma_s$ [MPa]	$\Delta\sigma_s$ [%]
Bartom	14.3	11.2	3.1	12.77	10.00	2.77	21.7
Windsor	17.6	12.9	4.7	13.75	10.08	3.67	26.7
Bronto	13.4	8.6	4.8	18.61	11.94	6.67	35.8
Dino	11.4	9.6	1.8	12.95	10.91	2.04	15.8
Blanka	4.3	3.2	1.1	8.96	6.67	2.29	26.6
Nida	8.8	6.4	2.4	31.43	22.86	8.57	27.3
Prosna	8.5	6.6	1.9	21.25	16.50	4.75	22.4
Segal	7.7	5.8	1.9	19.25	14.50	4.75	24.7
Laura	8.4	6.0	2.4	21.00	15.00	6.00	28.6
Longina	3.4	2.4	1.0	7.73	5.45	2.28	29.5
Agat	8.2	5.1	3.1	20.50	12.75	7.75	37.8
Apatyt	8.3	6.2	2.1	20.75	15.50	5.25	25.3
Diament	8.3	5.9	2.4	20.75	14.75	6.00	28.9
Fidelia	7.1	5.8	1.3	13.65	11.15	2.50	18.3
Meteor	6.6	5.3	1.3	15.00	12.05	2.95	19.7
Sześciotyg.	8.3	6.1	2.1	17.29	12.71	4.58	26.5
Nawiko	4.7	3.0	1.7	19.58	12.50	7.08	36.2
Polan	6.4	4.6	1.8	20.00	14.38	5.62	28.1

Maksymalne wartości naprężeń rejestrowane dla poszczególnych odmian różnicowały je w większym stopniu (tab. 2), co potwierdzają osiągnięte wartości: 21.0 MPa (Laura), 8.96 MPa (Blanka), 31.43 MPa (Nida), 21.25 MPa (Prosna), 19.25 MPa (Segal) i 7.73 MPa (Longina). Największe wartości siły skurczu F_s równą 8.8 N zaobserwowano dla okrywy nasion barwnych fasoli odmiany Nida (rys.33), dla której zanotowano najwyższy wzrost naprężeń osiągający 31.43 MPa. Podobne do fasoli maksymalne wartości sił, powyżej 8 N, otrzymano dla badanych odmian grochu za wyjątkiem odmiany Meteor o nasionach pomarszczonych (6.6 N) i odmiany pastewnej Fidelia (7.1 N). Wyznaczone maksymalne naprężenia dla skurczu okrywy nasion grochu poszczególnych odmian przyjmowały następujące wartości: 20.5 MPa (Agat), 20.75 MPa (Apatyt), 20.75 MPa (Diament), 13.65 MPa (Fidelia), 15.0 MPa (Meteor) i 17.29 MPa (Sześciotygodniowy).

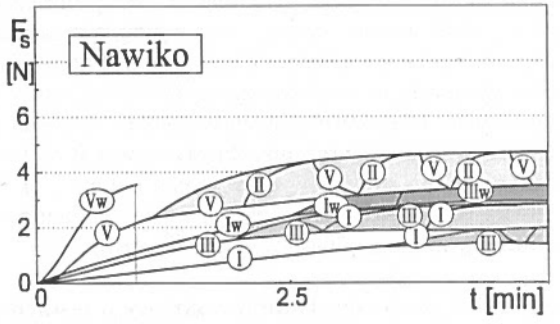


Rys. 33. Siła skurczu suszonej okrywy nasion fasoli odmiany Nida.

Suszenie zimnym powietrzem powodowało również skurcz i wzrost naprężeń rozciągających w okrywie wszystkich badanych odmian i gatunków nasion roślin strączkowych, lecz wartości te nieprzekraczały 12 MPa, a dla większości z nich osiągały zaledwie 5÷8 MPa. Najmniejsze naprężenia podczas suszenia zimnym powietrzem zaobserwowano dla okrywy nasion grochu odmiany Apatyt (5 N), natomiast odmiany jadalne Agat i Diament kurczyły się podczas suszenia podobnie, niezależnie od temperatury i prędkości przepływu czynnika suszącego, powodując naprężenia na poziomie 14÷20 MPa. Wzrost naprężeń podczas suszenia w okrywie nasion grochu odmiany Meteor o nasionach pomarszczonych powyżej granicy wytrzymałości na rozciąganie był powodem powstawania uszkodzeń i świadczył o podatności tej odmiany na pękanie okrywy. Podobnie wzrost naprężeń skurczu powyżej wytrzymałości okrywy na rozciąganie w skrajnych warunkach suszenia powodował uszkodzenie okrywy nasion grochu odmiany pastewnej Fidelia (rys. 34). Najbardziej drastyczne, spośród stosowanych w badaniach warunki suszenia (62^0 C, 15.4 m/s), powodowały gwałtowny wzrost naprężeń w okrywie nasion wszystkich badanych gatunków i odmian, jednak tylko okrywa nasion fasoli odmian Prosna i Longina, soi odmiany Nawiko wzdłuż największego wymiaru *a* (rys. 35) oraz bobiku odmiany Dino, oprócz wymienionej wcześniej odmiany grochu Meteor i Fidelia ulegały uszkodzeniu. Suszenie zimnym powietrzem powodowało łagodniejszy wzrost naprężeń do 14.8 MPa wywołując skurcz okrywy bez jej uszkodzenia.



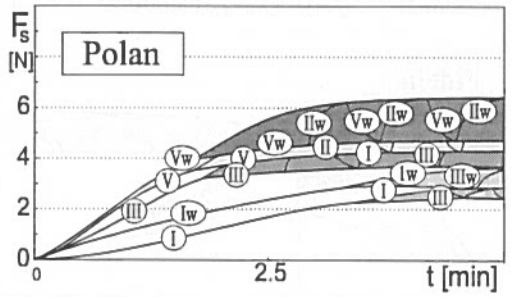
Rys. 34. Siła skurczu suszonej okrywy nasion grochu odmiany Fidelia.



Rys. 35. Siła skurczu suszonej okrywy nasion soi odmiany Nawiko.

Bardzo ciekawe zjawisko wzrostu naprężeń w okrywie zaobserwowano podczas zmiany warunków suszenia. Zjawisko to zauważono przypadkowo, gdy starano się wyeliminować drobne nieregularności przebiegu siły skurczu w funkcji czasu. W pierwszym rzędzie sprawdzono wpływ kąta i prędkości przepływu strumienia powietrza względem próbki oraz sprawdzono czy ciśnienie przepływającego powietrza nie działa na układ tensometryczny głowicy pomiarowej. Dopiero wyłączenie układu grzałek suszarki spowodowało wygładzenie charakteru przebiegu siły i dodatkowo zaobserwowano gwałtowny wzrost naprężeń w okrywie sięgający u niektórych odmian nawet powyżej 7 MPa. Najwyższy przyrost wartości siły skurczu spowodowany spadkiem temperatury o 40^0 C zaobserwowano dla okrywy nasion bobiku odmiany Bronto (4.8 N) oraz nasion bobu odmiany Windsor Biały (4.7 N). Dla okrywy nasion bobiku odmiany Bronto był to

przyrost naprężenia o 6.7 MPa stanowiąc 35.8 %, a dla odmiany bobu Windsor Biały przyrost naprężenia 4.2 MPa stanowił 30.4 %. Dla odmiany bobiku Dino zmiana warunków suszenia często powodowała uszkodzenie okrywy, która wytrzymywała wzrost naprężeń sięgający zaledwie 2.0 MPa (15.8 %). Największy wzrost naprężeń spowodowany spadkiem temperatury czynnika suszącego zaobserwowano dla okrywy nasion fasoli odmian: Nida - 8.6 MPa (27.3 %), Laura - 6.0 MPa (28.6 %) i Prosna - 4.7 MPa (22.4 %), nasion grochu odmian: Agat - 7.7 MPa (37.8 %) i Diament - 6.0 MPa (29.0 %) oraz nasion soi odmian: Nawiko - 7.1 MPa (36.1 %) i Polan - 5.6 (28.1 %).



Rys. 36. Siła skurczu suszonej okrywy nasion soi odmiany Polan.

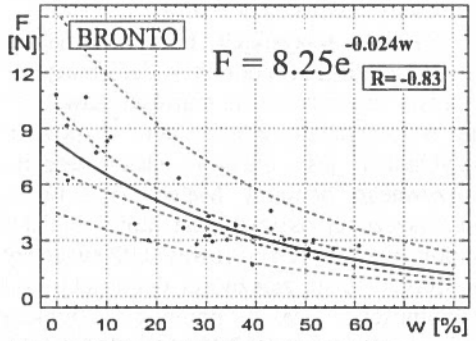
Mniejszy przyrost procentowy naprężeń skurczu okrywy nasion soi odmiany Polan (rys. 36 i tab. 2) przy podobnych wartościach naprężeń maksymalnych w porównaniu do odmiany Nawiko może być przyczyną uszkodzeń podczas suszenia okrywy nasion soi odmiany Nawiko wzdłuż największego wymiaru (rys. 35) oraz przyrostu objętości liścieni w tym kierunku.

Można przypuszczać, że podczas suszenia nasion mogą wystąpić skrajne warunki gdzie nasiona jeszcze wilgotne o dużej objętości otoczone są okrywą, która zbyt gwałtownie suszona skurczy się i wystąpią naprężenia powodujące jej pęknięcie. Wzrost naprężeń skurczu suszonej okrywy uzależniony jest od parametrów czynnika suszącego i czas w którym okrywa kurczy się jest tym krótszy im wyższa jest temperatura i prędkość przepływu. Dla ekstremalnych warunków suszenia stosowanych w badaniach już po 10 s zaobserwowano skurczenie okrywy nawet o 15 %. Okrywa nasion wszystkich badanych odmian roślin strączkowych wysycha już po 2 minutach, a wzrost naprężeń o dodatkowe 20÷40 % spowodowany wyłączeniem elementów grzejnych w suszarniach może być główną przyczyną powstawania uszkodzeń.

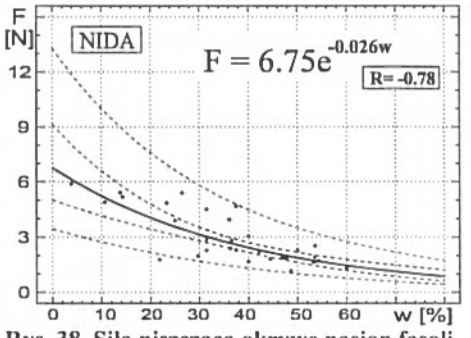
6.4. Właściwości mechaniczne okrywy w testach rozciągania

Test rozciągania zastosowany do oceny właściwości mechanicznych okrywy nasion roślin strączkowych był niezwykle trudny do wykonania, nie z racji wymagań sprzętowych czy wyposażenia stanowiska badawczego, lecz wymagał niezwykle starannego przygotowania próbek (pasków okrywy). Spotykane w literaturze prace opisują właściwości okrywy niektórych nasion opierając interpretację na wynikach rozciągania dla kilku suchych próbek klejonych do uchwytów (Davison i inni, 1980). Opracowana przez autora (Dobrzański, 1994) metoda preparacji okrywy w kształcie obrączki umożliwiła badanie wytrzymałości na rozciąganie okrywy o różnej wilgotności oraz wyeliminowała dyskusyjną kwestię stosowania uchwytów szczękowych dla materiałów roślinnych (niszczenie tkanki w uchwycie przy mocnym ścisku lub wyślizgiwanie się próbki przy słabym). Jednak trudności w przygotowaniu próbek o żądanym poziomie wilgotności (mimo ważenia próbek przed i po suszeniu oraz 33 powtórzeń dla każdej z odmian)

sprawiły, że wyniki uzyskane w tym teście należy traktować jako graniczne wartości wytrzymałości dla poszczególnych odmian.

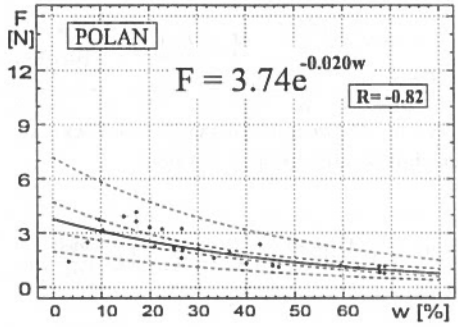


Rys. 37. Siła niszcząca okrywę nasion bobiku odmiany Bronto.



Rys. 38. Siła niszcząca okrywę nasion fasoli odmiany Nida.

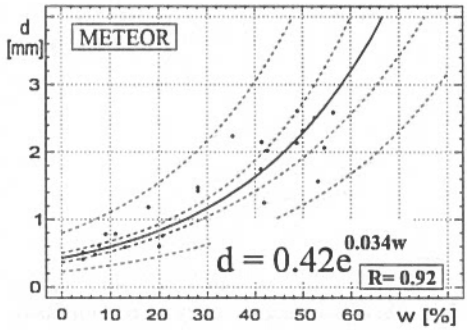
Zaobserwowano, że siła niszcząca rejestrowana w testach rozciągania okrywy wilgotnej dla nasion badanych odmian przyjmowała znacznie mniejsze wartości niż dla suchej i dla wszystkich odmian wraz ze spadkiem wilgotności wytrzymałość okrywy nasiennej wzrastała. Dla nasion bobiku odmiany Bronto (rys. 37) siła niszcząca suchej okrywy osiągała wartość 11.0 N, a dla większości pasków okrywy o wilgotności w zakresie 30÷60 % siła zawierała się w granicach 2÷3 N. Wartość siły niszczącej w funkcji wilgotności dla wszystkich badanych odmian opisuje regresja wykładnicza. Podobne parametry równania zależności wykładniczej oraz współczynniki ujemnej regresji zanotowano dla okrywy nasion fasoli odmiany Nida (rys. 38), co świadczyło o zbliżonej wytrzymałości, jednak maksymalne wartości siły były prawie dwukrotnie mniejsze i nie przekraczały 6 N. Wytrzymałość okrywy pozostałych odmian fasoli kształtowała się na tym samym poziomie 6.5÷7.5 N, a zbliżone parametry równań regresji wykładniczej potwierdzają podobne zachowanie się okrywy w testach rozciągania dla całego zakresu zmian wilgotności. Maksymalne wartości sił zanotowane dla poszczególnych odmian grochu Fidelia, Meteor, Sześciotygodniowy, i Diament przyjmowały odpowiednio wartości: 7.0, 7.5, 9.5 i 6.5 N, a regresja wykładnicza dobrze opisywała przebiegi sił w funkcji wilgotności. Najniższą wytrzymałością na rozciąganie cechowała się okrywa nasion soi odmiany Polan (rys. 39), dla której odnotowano maksymalną siłę niszczącą równą zaledwie 4.5 N.



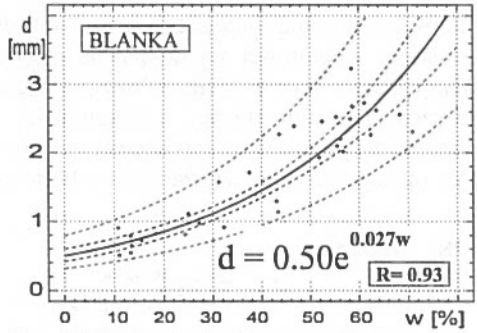
Rys. 39. Siła niszcząca okrywę nasion soi odmiany Polan.

Maksymalne wydłużenie wycinka okrywy; czyli deformacja niszcząca, dla większości odmian przyjmowała wartości w zakresie od 1.7 mm do 3.7 mm i choć zależna była od wielkości nasion to jednak w największym stopniu zaobserwowano wpływ ich wilgotności. Zależność deformacji niszczącej od wilgotności również opisano regresją

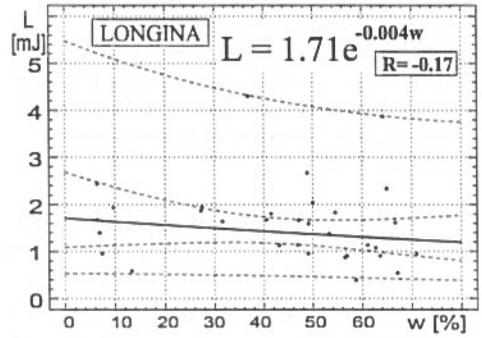
krzywoliniową, dla której najwyższe współczynniki korelacji otrzymano w przypadku funkcji wykładniczej. Dla regresji wykładniczej współczynniki korelacji (z wyjątkiem okrywy nasion soi odmiany Polan) przyjmują wartości w zakresie 0.79÷0.93.



Rys. 40. Deformacja niszcząca okrywę nasion grochu odmiany Meteor.



Rys. 41. Deformacja niszcząca okrywę nasion fasoli odmiany Blanka.



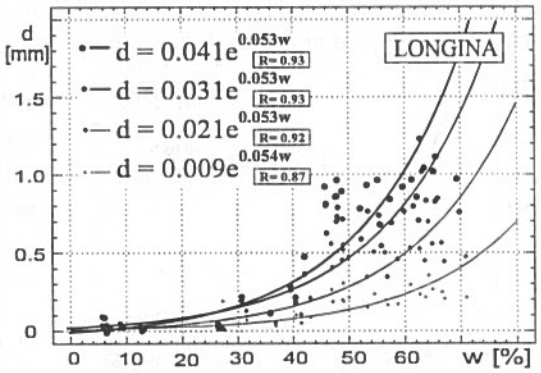
Rys. 42. Praca zniszczenia paska okrywy nasion fasoli odmiany Longina.

Okrywa wszystkich badanych nasion grochu podlegała podobnej deformacji w zakresie zniszczenia, a wartości zawierały się w przedziale 2.0÷2.7 mm. Typowym przykładem jest okrywa nasion grochu warzywnego odmiany Meteor (rys. 40) o pomarszczonej okrywie, dla której dodatni współczynnik korelacji równy 0.92 świadczy o dobrym opisie zależności deformacji od wilgotności za pomocą funkcji wykładniczej. Podobne zależności obserwowano dla okrywy nasion badanych odmian fasoli. Na rysunku 41 przedstawiono zmiany deformacji niszczącej w funkcji wilgotności okrywy nasion fasoli wielokwiatowej odmiany Blanka. Okrywa nasion wilgotnych ulega uszkodzeniu przy deformacji sięgającej 2.7 mm. Największą deformację (3.7 mm) zaobserwowano dla okrywy fasoli odmiany Longina o nasionach dużych.

Praca deformacji zależna jest od odkształcenia oraz siły powodującej uszkodzenie, jednak wielkości te odpowiadały rozerwaniu podwójnego paska okrywy w przypadku rozciągania okrywy o stałej grubości lub pojedynczego paska rozciąganego znacznie poza zakres sprężystości, gdzie okrywa o niejednakowej grubości podlegała w swym najcieńszym przekroju dodatkowemu przewężeniu. Stąd nie należało się spodziewać wysokich współczynników korelacji. I rzeczywiście, wszystkie współczynniki zawierały się w przedziale -0.36÷0.50, świadcząc o słabej zależności pracy niszczącej od wilgotnosci. Często współczynniki korelacji były bliskie zera potwierdzając brak wpływu wilgotnosci na wartość pracy niszczącej. Typowym przykładem może być okrywa nasion fasoli odmiany Longina (rys. 42), dla której współczynnik korelacji (-0.17) potwierdza brak wpływu wilgotności na wartość pracy niszczącej. Tłumaczyć to można tym, że dla niskiej wilgotności duża wartość siły

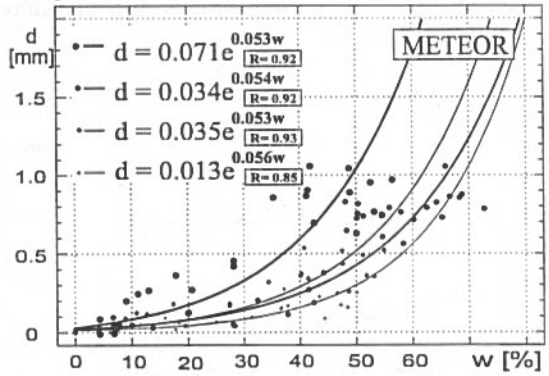
niszczącej była rejestrowana przy niewielkiej deformacji i odwrotnie, dla okryw o wysokiej zawartości wody, zanotowano małe siły przy znacznej deformacji.

Dlatego też wszelkie pomiary wykonane dla małych deformacji umożliwiają pomiar właściwości mechanicznych podwójnego paska okrywy w zakresie jej sprężystych odkształceń i gwarantują wyniki zależne od właściwości mechanicznych okrywy a nie od pola przekroju próbki. Potwierdzają to wartości deformacji uzyskane w tym zakresie dla progowych poziomów wartości sił obciążających (0.2, 0.4, 0.6 i 0.8 N). Deformacja rozciąganej okrywy nasion fasoli odmiany Longina (rys. 43) wyznaczona dla powyższych wartości progowych siły wskazuje silną dodatnią korelację z wilgotnością. Rosnące wartości współczynników korelacji od R=0.87 dla 0.2 N do R=0.93 dla 0.8 N świadczą o wstępnym układaniu się i prostowaniu paska okrywy w uchwytach dla mniejszych wartości progowych sił. Podobne współczynniki korelacji otrzymano dla pozostałych odmian fasoli.



Rys. 43. Deformacja okrywy nasion fasoli odmiany Longina w zakresie odkształceń sprężystych.

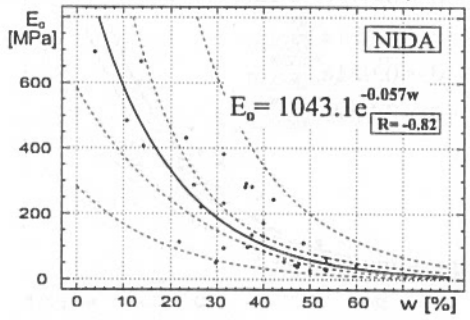
Okrywa nasion grochu dobrze przylega już dla wartości progowej siły równej 0.4 N, co potwierdzają najwyższe współczynniki korelacji uzyskane przy tym poziomie obciążeń, uzyskując zbliżone wartości dla dalszych progów obciążeń. Deformację paska okrywy wyznaczoną dla kolejnych wartości progowych w zależności od wilgotności opisuje również funkcja wykładnicza. Na rysunnku 44 na przykładzie odmiany grochu Meteor przedstawiono wartości deformacji wyznaczone dla zastosowanych obciążeń progowych w zakresie odkształceń sprężystych.



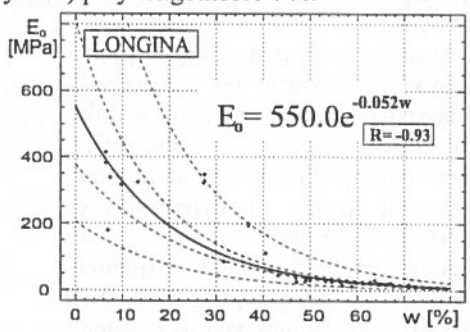
Rys. 44. Deformacja okrywy nasion grochu odmiany Meteor w zakresie odkształceń sprężystych.

Korzystając z prostych zależności oraz prawa Hooke'a rejestrowane wartości deformacji oraz siły w zakresie odkształceń sprężystych rozciąganej okrywy pozwalają wyznaczyć jej moduł sprężystości. W tym przypadku, w zakresie niewielkich odkształceń, rozciąganiu podlegały obie strony paska okrywy; stąd można było oczekiwać prawidłowej interpretacji wyników, co potwierdzają wysokie wartości bezwzględne współczynników korelacji. Wyznaczone tym sposobem wartości modułu sprężystości suchej okrywy większości badanych odmian zawierały się w przedziale od 210÷420 MPa. Wilgotna okrywa nasienna wszystkich badanych odmian charakteryzowała się niską wytrzymałością na rozciąganie; stąd i wartości modułu sprężystości spadały często poniżej 25 MPa.

Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem wilgotności spadek wartości modułu sprężystości wzdłużnej okrywy nasiennej badanych odmian roślin strączkowych opisuje również funkcja wykładnicza. Najwyższe wartości modułu sprężystości (698 MPa) otrzymano dla barwnej okrywy nasion fasoli odmiany Nida (rys. 45) przy wilgotności 4 %.

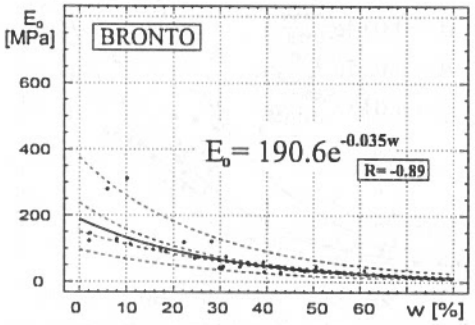


Rys. 45. Moduł sprężystości okrywy nasion fasoli odmiany Nida.

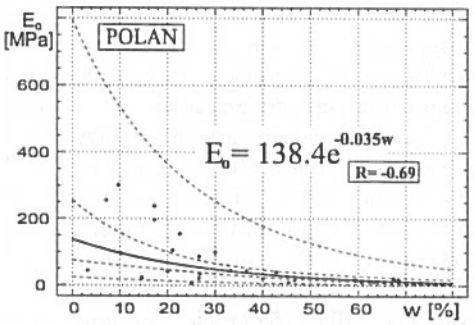


Rys. 46. Moduł sprężystości okrywy nasion fasoli odmiany Longina.

Pozostałe odmiany fasoli charakteryzowały się okrywą nasienną o niższych wartościach modułu sprężystości; zazwyczaj poniżej 240 MPa. Wyjątek stanowiła okrywa nasion fasoli odmiany Longina (rys. 46), dla której zanotowano wartości 392÷411 MPa przy wilgotności 6 %.



Rys. 47. Moduł sprężystości okrywy nasion bobiku odmiany Bronto.



Rys. 48. Moduł sprężystości okrywy nasion soi odmiany Polan.

Największe wartości siły zarejestrowane podczas rozerwania paska okrywy nasion bobiku badanych odmian w testach rozciągania mogły sugerować ich najwyższe cechy wytrzymałościowe. Jednak uwzględnienie odkształcenia (wydłużenia) oraz wymiarów pola przekroju rozciąganej próbki ukazało ich prawdziwe cechy materiałowe charakteryzowane niższymi wartościami modułu sprężystości. Na rysunku 47 przedstwiono na przykładzie odmiany Bronto zależność wykładniczą modułu sprężystości w funkcji rosnącej wilgotności. Podobne wartości modułu sprężystości okrywy zanotowano dla nasion soi odmiany Polan (rys. 48), która ulegała uszkodzeniu przy maksymalnej sile rozciągającej równej 4.5 N; czyli ponad dwukrotnie mniejszej niż siła niszcząca notowana dla badanych odmian bobiku. Wartości te były proporcjonalne do grubości okrywy, co świadczyło o podobnym wydłużeniu badanych wycinków pasków okrywy w testach rozciągania.

Wyznaczenie modułu sprężystości charakteryzuje najlepiej właściwości mechaniczne okrywy nasiennej, uwzględniając wydłużenie próbki i pole przekroju, lecz równie ważne dla rozpatrzenia możliwości wystąpienia naprężeń niszczących w trakcie suszenia nasion jest podanie maksymalnej i minimalnej deformacji oraz naprężeń (tab. 3) występujących podczas rozciągania dla różnych poziomów wilgotności.

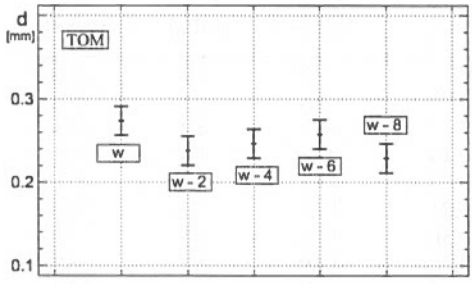
Tabela. 3. Porównawcze wartości charakterystyk właściwości mechanicznych okrywy nasion roślin strączkowych uzyskane w badanym zakresie wilgotności.

	Właściwości mechaniczne okrywy						
Odmiany	$F_{u\,max}$ [N]	d_{max} [mm]	$F_{u\,min}$ [N]	d_{min} [mm]	$\sigma_{u\,max}$ [MPa]	$\sigma_{u\,min}$ [MPa]	$E_{o\,max}$ [MPa]
Bronto	11.0	2.5	1.8	0.27	9.8	1.6	326
Dino	12.0	2.6	1.3	0.19	9.4	1.0	216
Blanka	8.9	2.7	1.1	0.42	18.5	2.3	224
Nida	6.0	1.7	1.2	0.24	21.4	4.3	698
Longina	6.5	3.7	1.0	0.33	14.8	2.3	411
Prosna	7.0	2.5	1.1	0.21	17.5	2.7	224
Fidelia	7.0	2.5	1.3	0.36	13.5	2.5	371
Meteor	7.5	2.6	1.0	0.20	17.0	2.3	368
Sześciotyg.	9.5	2.6	1.1	0.24	19.8	2.3	228
Diament	6.5	2.0	1.9	0.21	16.3	4.8	341
Polan	4.5	2.7	0.9	0.93	14.1	2.8	302
Nawiko	6.0	1.8	0.8	0.26	25.0	3.3	532

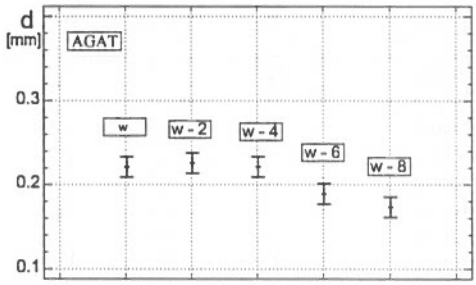
Porównując wartości maksymalnych naprężeń (przeważnie dla okryw wysuszonych) wyznaczonych w testach rozciągania zaobserwowano, że dla niektórych odmian wartości naprężeń skurczu (tab. 2) przedstawione w poprzednim rozdziale są mniejsze. Natomiast okrywa nasion bobiku odmian Dino i Bronto, oraz o podobnym kolorze okrywa nasion fasoli odmiany Nida podlega większym naprężeniom skurczu podczas suszenia niż ich wytrzymałość na rozciąganie. Większe wartości naprężeń skurczu zanotowano również dla okrywy nasion fasoli odmiany Prosna, grochu odmiany jadalnej Diament oraz soi odmiany Polan, dla których naprężenia skurczu są również większe od ich wytrzymałości na rozciąganie. Przyglądając się wartościom minimalnym, zwykle otrzymanych dla wyższych wilgotności, można zaobserwować, że naprężenia skurczu przewyższają je dla niektórych odmian nawet wielokrotnie. Maksymalne wartości naprężeń odnotowane w testach rozciągania niższe od minimalnych naprężeń dla wymienionych wcześniej odmian bobiku Dino i Bronto oraz odmiany fasoli Nida (wszystkie o zabarwieniu brązowym) rejestrowanych podczas pomiaru skurczu suszonej okrywy, świadczą o możliwości przekroczenia granicy wytrzymałości na rozciąganie okrywy podczas jej suszenia. Jest to jak dotąd pierwszy potwierdzony eksperymentalnie dowód (znany autorowi) wskazujący na możliwość powstawania pęknięć spowodowanych skurczem okrywy w trakcie suszenia.

6.5. Właściwości mechaniczne liścieni

Zaobserwowano, że mechanizm uszkodzenia nasion suchych i wilgotnych jest całkowicie różny. Dla nasion bardzo wilgotnych powyżej 20 % wnętrze ich jest deformowane, a uszkodzeniu ulega jego okrywa. Natomiast nasiona o wilgotności równoważnej do 8 %, uszkodzone zostają przy niewielkim odkształceniu na skutek pęknięcia liścieni. Dlatego też, aby wyeliminować wpływ złożonej budowy nasion składających się z liścieni i okrywy badaniom poddano tylko liścienie. Celem wyznaczenia właściwości mechanicznych oraz sprawdzenia zakresów deformacji sprężystych nasion badanych gatunków i odmian, nasiona dosuszano do całkowitego wysuszenia i co 2 % utraty masy przeprowadzano testy mechaniczne.

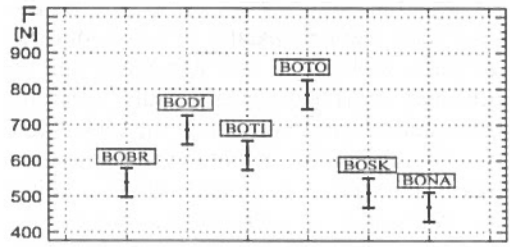


Rys. 49. Deformacja niszcząca liścienie suszonych nasion bobiku odmiany Tom.



Rys. 50. Deformacja niszcząca liścienie suszonych nasion grochu odmiany Agat.

Dla wszystkich badanych odmian bobiku zaobserwowano, że uszkodzenie liścieni nasion rejestrowano przy deformacji 0.2÷0.3 mm, i różnice pomiędzy wartościami uzyskanymi dla większości poziomów wilgotności były nieistotne statystycznie, a na rozrzut uzyskanych wyników wpływała w większym stopniu nieregularność kształtu nasion. Największe przedziały ufności dla wartości deformacji zanotowano u odmian bobiku Tom (rys. 49), Dino i Bronto. Deformacja niszcząca liścieni nasion okrągłych takich odmian jak: Fidelia, Agat (Rys. 50), Diament czy Sześciotygodniowy przyjmowała wartości zbliżone dla wszystkich poziomów wilgotności w badanym zakresie 4÷8 %. Dopiero dalsze suszenie powodujące całkowitą utratę wody powodowało, że liścienie stawały się bardziej kruche i podlegały uszkodzeniu przy mniejszej deformacji.

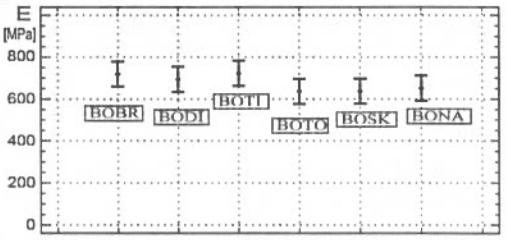


Rys. 51. Siła rejestrowana w testach ściskania liścieni nasion bobiku badanych odmian.

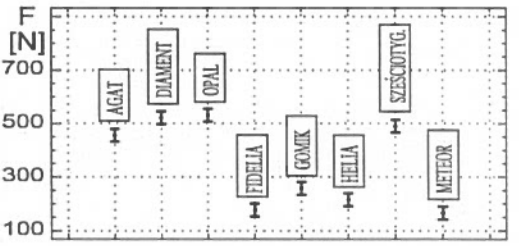
Największe wartości średnie siły podczas uszkodzenia liścieni rejestrowano dla nasion dużych takich jak nasiona bobiku (rys. 51) o nieregularnym kształcie czy podłużnych nasion fasoli. Średnie wartości dla liścieni nasion bobiku zawierały się w granicach 460÷780 N, dla nasion grochu w przedziale 160÷530 N, a dla nasion soi wartości te nie przekraczały 140 N. Przedziały ufności wskazywałyby na bardzo duże zróżnicowanie wytrzymałości mechanicznej nasion poszczególnych nasion dla badanych

odmian i gatunków. Średnia wartość siły powodującej uszkodzenie dla odmiany Tom (784.0 N) była prawie dwukrotnie większa niż dla odmiany Nadwiślański (470.4 N), podobnie deformacja, której wartości dla tych odmian przyjmowały odpowiednio wartości 0.31 mm i 0.19 mm. W efekcie praca uszkodzenia liścieni dla odmiany Tom była już ponad dwa razy większa osiągając wartość 106.7 mJ, gdzie dla odmiany Nadwiślański sięgała zaledwie wartości 44 mJ.

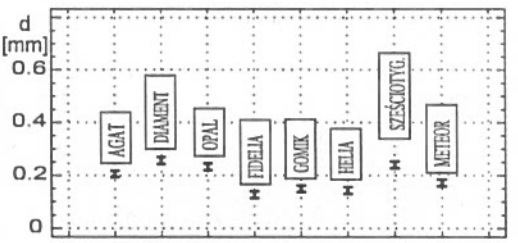
Jednak wartości modułu sprężystości wyznaczone w zakresie deformacji sprężystej wykazały, że faktyczne właściwości wytrzymałościowe nasion bobiku poszczególnych odmian są bardziej zbliżone i nie zanotowano statystycznie istotnych różnic (rys. 52). W zakresie niewielkich odkształceń dla odmian: Bronto, Dino, Tibo, Tom i Nadwiślański oraz rodu Sk 4539 otrzymano następujące średnie wartości modułu sprężystości: 717.9, 692.8, 741.1, 635.4, 650.3 i 636.0 MPa, co daje zupełnie inny obraz oceny odmian, świadcząc o zbliżonych właściwościach mechanicznych liścieni badanych odmian bobiku, czyli o ich podobnych cechach materiałowych. Natomiast, zanotowane różnice siły i deformacji niszczącej świadczące o zmienności odmianowej, w większym stopniu związane są z wymiarami nasion, nieregularnością kształtu oraz ich złożoną budową. Podobnie dla nasion grochu zaobserwowano, że w ramach homogenicznych grup wartości siły (rys. 53) i deformacji (rys. 54) nie różnią się statystycznie dla większości odmian. Zdecydowanie wyróżnić można grupę odmian pastewnych Fidelia, Helia i Gomik o podobnej budowie zewnętrznej, ciemnych małych nasionach o okrągłym kształcie, jak też odmiany jadalne Agat, Diament i Opal uprawiane na suche nasiona o jasnej żółtej barwie i półprzeźroczystej okrywie, dobrze wypełnionej kulistymi liścieniami. Podobne w swym kształcie do nich nasiona warzywnej odmiany Sześciotygodniowy różniące się tylko jasnym zielonym kolorem nie różnią się właściwościami mechanicznymi. Średnie wartości siły (176.8, 257.7, i 215.5 N) oraz deformacji (0.13, 0.14 i 0.14 mm) otrzymano dla odmian pastewnych Fidelia, Gomik i Helia. Natomiast wartości siły (456.2, 521.6, 532.2 i 490.4 N) oraz deformacji (0.21, 0.25, 0.23 i 0.24 mm) otrzymano dla odmian jadalnych



Rys. 52. Moduł sprężystości liścieni nasion bobiku badanych odmian.

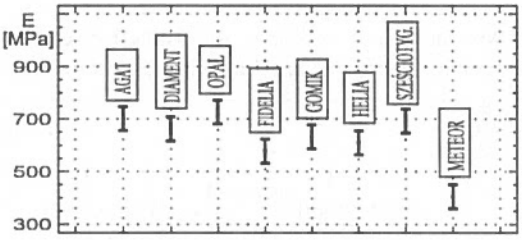


Rys. 53. Siła rejestrowana w testach ściskania liścieni nasion grochu badanych odmian.



Rys. 54. Deformacja rejestrowana w testach ściskania liścieni nasion grochu badanych odmian.

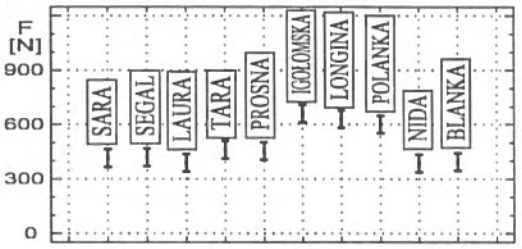
Agat, Diament, Opal i odmiany warzywnej Sześciotygodniowy. Zdecydowanie odbiegają wartości rejestrowane dla odmiany warzywnej Meteor o nasionach pomarszczonych, dla której zanotowano najniższe wartości właściwości mechaniczne. Deformacja tych nasion przyjmuje podobne do innych odmian warzywnych wartości, jednak uszkodzenie liścienia o nieregularnym kształcie; a zarazem małym polu kontaktu, wywołane jest mniejszą siłą.



Rys. 55. Moduł sprężystości liścieni nasion grochu badanych odmian.

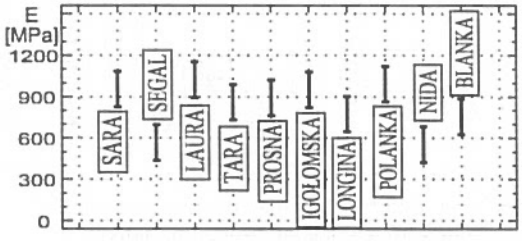
Stąd i wartości modułu sprężystości wyznaczone dla tej odmiany odbiegają od pozostałych i budzą wątpliwości interpretacyjne. Pozostałe odmiany grochu (rys. 55) charakteryzują się zbliżonymi wartosciami modułu sprężystości liścieni, przy czym dla odmian pastewnych wartości te są są niższe, lecz istotnie tylko dla odmiany Fidelia.

Wśród odmian fasoli można również wyodrębnić grupy wyróżniające się wytrzymałością na ściskanie (rys. 56), co związane było w głównej mierze z ich wielkością. Największe wartości siły zanotowano dla liścieni fasoli karłowatych odmian o nasionach dużych: Igołomska, Longina i Polanka. Natomiast fasole szparagowe: Sara 5, Segal i Laura o nasionach drobnych, odmiana Prosna o nasionach średnich oraz odmiana wielokiatowa Blanka, a także odmiana Nida o nasionach barwnych stanowiły drugą grupę, dla której średnie wartości siły niszczącej liścienie, istotnie mniejsze niż dla nasion dużych, nie różniły się statystycznie (przy 95 % przedziałach ufności) między sobą.



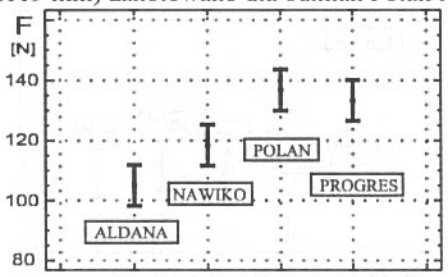
Rys. 56. Siła rejestrowana w testach ściskania liścieni nasion fasoli badanych odmian.

Podobnie dla nasion fasoli, wartości modułu sprężystości (rys. 57) wskazują, że liścienie traktowane jako „materiał konstrukcyjny" wykazują zbliżone właściwości, niezależnie od wielkości nasion. Tylko liścienie nasion odmiany szparagowej Segal i nasion barwnych odmiany karłowej Nida wykazują nieco słabsze właściwości mechaniczne, przyjmując wartości niższe od pozostałych odmian, lecz na podobnym poziomie jak liścienie nasion grochu odmian pastwenych. Większe zakresy 95 % przedziałów ufności uzyskane dla nasion fasoli, świadczą o wpływie ich nieregularności kształtu na wartości uzyskiwane w testach ściskania. Potwierdza to, że okrągłe nasiona zapewniają symetryczny rozkład naprężeń względem osi obciążeń, gwarantując poprawniejszą interpretację wyników dla gładkich nasion grochu w stosunku do nasion o nieregularnym kształcie innych gatunków.

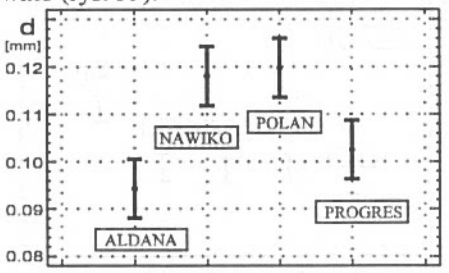


Rys. 57. Moduł sprężystości liścieni nasion fasoli badanych odmian.

Średnie wartości sił rejestrowane podczas powstawania uszkodzeń mechanicznych liścieni nasion soi wynosiły: 105.0, 118.4, 136.7 i 133.3 N odpowiednio dla odmian: Aldana, Nawiko, Polan i Progres (rys. 58), co wskazuje, że nasiona dwóch ostatnich odmian były odporniejsze na uszkodzenia. Nasiona soi zawierając więcej tłuszczu podlegają deformacji postaciowej, dla której największe wartości (odpowiednio 0.118 i 0.119 mm) zanotowano dla odmian Polan i Nawiko (rys. 59).

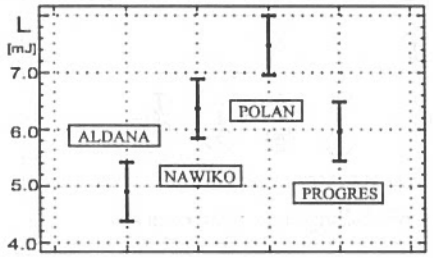


Rys. 58. Siła rejestrowana w testach ściskania liścieni nasion soi badanych odmian.

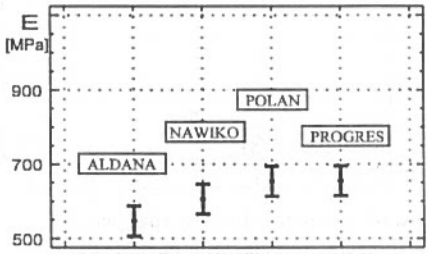


Rys. 59. Deformacja rejestrowana w testach ściskania liścieni nasion soi badanych odmian.

Cecha ta może świadczyć o ich większej odporności na zgniatanie np.: w podajnikach ślimakowych. Wartości obu tych wielkości wpływają na następną cechę odpowiadającą za wytrzymałość mechaniczną; pracę deformacji *L*. Wartość pracy, czyli energia uszkodzenia w przypadku dużych prędkości deformacji, zależna jest od masy i prędkości deformacji. W przypadku, gdy masa obciążająca jest stała, a tak jest w przypadku już istniejących maszyn rolniczych, energia zależna jest tylko od prędkośći i to na dodatek w funkcji kwadratowej. Stąd energia a właściwie praca deformacji w przypadku obciążeń quasi-statycznych może służyć jako wskaźnik oceny odporności mechanicznej i przydatności odmian do mechanicznego zbioru czy też omłotu.



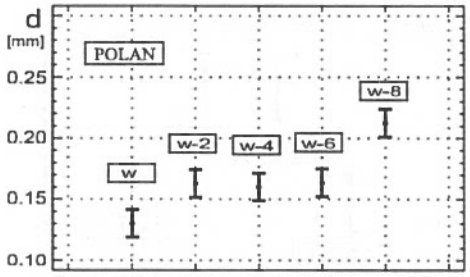
Rys. 60. Praca deformacji niszczącej liścieni nasion soi badanych odmian.



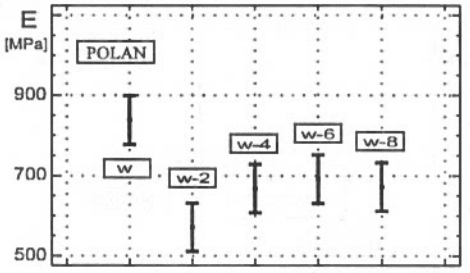
Rys. 61. Moduł sprężystości liścieni nasion soi badanych odmian.

Z badanych odmian najwyższą średnią wartość pracy (7.4 mJ) otrzymano dla odmiany Polan (rys. 60). Wszystkie te właściwości pozwalają wyróżnić odmianę Polan jako najbardziej wytrzymałą na obciążenia powodujące uszkodzenia mechaniczne, mimo podobnych właściwości w zakresie odkształceń sprężystych, dla których wyznaczono moduł sprężystości *E* (rys. 61). Jedynie odmiana Aldana wykazuje istotnie statystyczne (przy 95 % przedziałach ufności) niższe wartości modułu sprężystości (546.7 MPa) od odmian Polan (653.5 MPa) i Progres (654.7 MPa).

Na rysunkach 49 i 50 przedstawiono zmiany właściwości mechanicznych liścieni nasion bobiku Tom i grochu odmiany Agat w warunkach dosuszania. Dosuszanie nasion większości gatunków nie powodowało zmian sprężystości, a liścienie nasion podlegały podobnym deformacjom dla większości badnych poziomów wilgotności, co potwierdzały również zbliżone wartości modułu sprężystości.

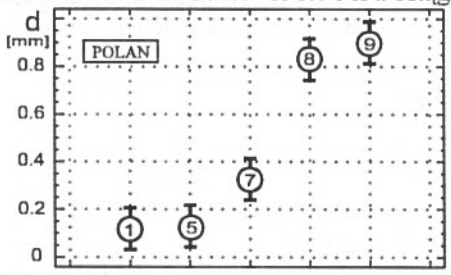


Rys. 62. Deformacja niszcząca liścienie suszonych nasion soi odmiany Polan.

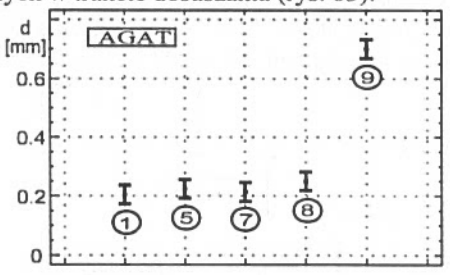


Rys. 63. Moduł sprężystości suszonych liścieni nasion soi odmiany Polan.

Natomiast suszenie nasion soi i utrata masy (wody) powodowało względny wzrost zawartości tłuszczu w stosunku do całej masy nasienia przed suszeniem. Stąd liścienie nasion soi stawały się bardziej plastyczne i dla wszystkich badanych poziomów wilgotności podlegały większej deformacji. Nawet nasiona odmiany Polan jako odmiany wykazującej najwyższą odporność mechaniczną wśród badanych odmian soi podlegały dalszej deformacji po suszeniu (rys. 62). Spadek sprężystości nasion powodowany utratą wody wywołał obniżenie średnich wartości modułu sprężystości E z 838.4 MPa do wartości z zakresu 570.8÷691.0 MPa osiągniętych w trakcie dosuszania (rys. 63).



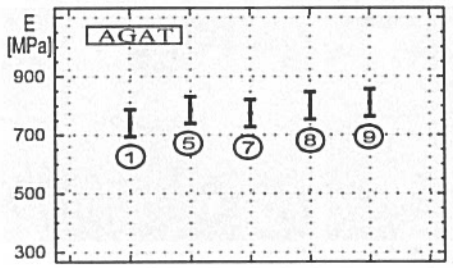
Rys. 64. Deformacja przy różnych prędkościach obciążenia nasion soi odmiany Polan.



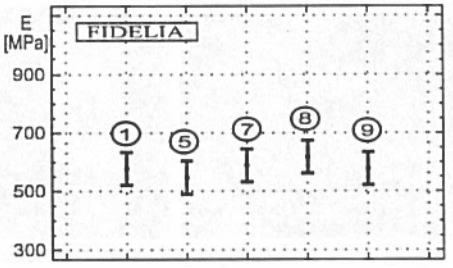
Rys. 65. Deformacja przy różnych prędkościach obciążenia nasion grochu odmiany Agat.

Na rysunku 64 przedstawiono deformację nasion soi odmiany Polan poddanych obciążeniom przy różnych prędkościach deformacji. Nasiona tej odmiany podobnie jak pozostałych odmian soi podlegały większym deformacjom przy prędkościach powyżej 20 mm/min. Dla prędkości 50 i 100 mm/min deformacja niszcząca wzrastała nawet czterokrotnie, co świadczy o niższej sprężystości nasion tego gatunku, powodowanej prawdopodobnie zawartością tłuszczu. Nasiona pozostałych gatunków badanych roślin strączkowych nie zawierały tłuszczu i właściwości sprężyste i zaobserwowano deformację na podobnym poziomie dla prędkości deformacji do 50 mm/min (odmiana Agat - rys. 65).

Moduł sprężystości wyznaczony dla tej odmiany przyjmował wartości na podobnym poziomie, niezależnie od prędkości deformacji (rys. 66). Podobnie, dla pozostałych odmian badanych nasion grochu zaobserwowano, że prędkość deformacji nie wpływa na wartości modułu sprężystości wyznaczone przy tym zakresie prędkości. Na przykładzie odmiany pastewnej Fidelia (rys. 67) przedstawiono, że moduł sprężystości niższy niż dla odmian jadalnych grochu, przyjmuje również wartości, dla których nie zaobserwowano statystycznie istotnych różnic dla 95 % przedziałów ufności.

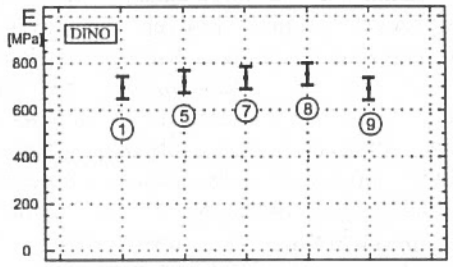


Rys. 66. Moduł sprężystości liścieni nasion grochu odmiany Agat wyznaczony dla różnych prędkości deformacji.

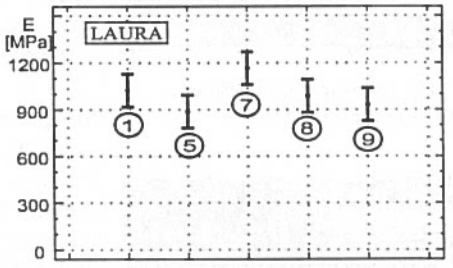


Rys. 67. Moduł sprężystości liścieni nasion grochu odmiany Fidelia wyznaczony dla różnych prędkości deformacji.

Również, dla liścieni nasion bobiku odmiany Dino (rys. 68) wyznaczone wartości modułu sprężystości przy różnych prędkościach deformacji zawierały się w zakresie zbliżonym do nasion grochu odmiany Agat, świadcząc o zbliżonych właściwościach materiałowych. Wyższą wytrzymałością liścieni charakteryzują się nasiona fasoli odmiany Prosna czy też nasiona fasoli żółtostrąkowej odmiany szparagowej Laura (rys. 69).



Rys. 68. Moduł sprężystości liścieni nasion bobiku odmiany Dino wyznaczony dla różnych prędkości deformacji.

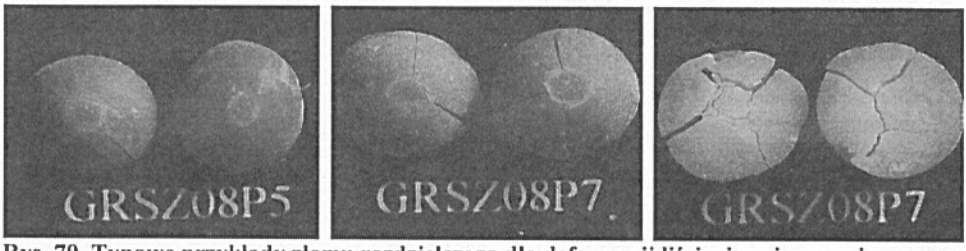


Rys. 69. Moduł sprężystości liścieni nasion fasoli odmiany Laura wyznaczony dla różnych prędkości deformacji.

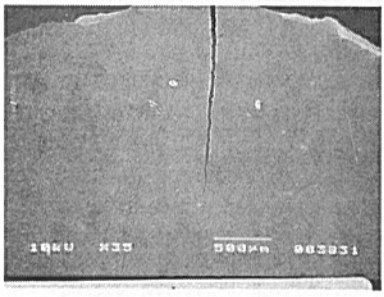
Wszystkie testy ściskania liscieni nasion prowadzone były, aż do wystąpienia złomu rozdzielczego. Niższe wartości modułu sprężystości wyznaczone w testach ściskania liścieni dla wszystkich badanych poziomów wilgotności mogą świadczyć o utracie właściwości sprężystych nasion suszonych. Rejestrowane wyższe wartości deformacji dla większych prędkości powodowane mogą być bezwładnością układu pomiarowego maszyny wytrzymałościowej, choć w niektórych przypadkach deformacja przy większych prędkościach może prowadzić do wcześniejszego występowania uszkodzeń struktury komórkowej. Pomocna w tym przypadku, może okazać się, fotograficzna klasyfikacja uszkodzeń oraz ich mikroskopowa weryfikacja.

6.6. Makro- i mikroskopowa ocena przyczyn powstawania uszkodzeń

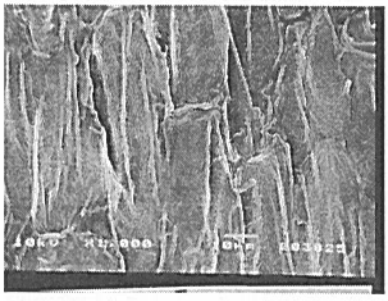
Zaobserwowano, że mechanizm powstawania uszkodzenia nasion, a właściwie ich liścieni, podczas obciążania osiowego prostopadle do płaszczyzny kontaktu związany jest z powstawaniem złomu rozdzielczego. Wzrost naprężeń rozrywających pomiędzy komórkami w płaszczyźnie przekroju poprzecznego powodowany jest spęczeniem promieniowym centralnej części liścienia.



Rys. 70. Typowe przykłady złomu rozdzielczego dla deformacji liścieni nasion grochu.



Rys. 71. Szczelina złomu liścienia nasion soi odmiany Aldana.

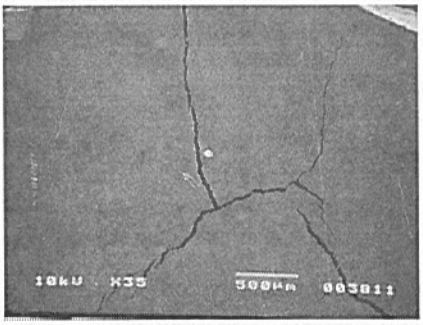


Rys. 72. Powierzchnia złomu liścienia nasion soi odmiany Polan.

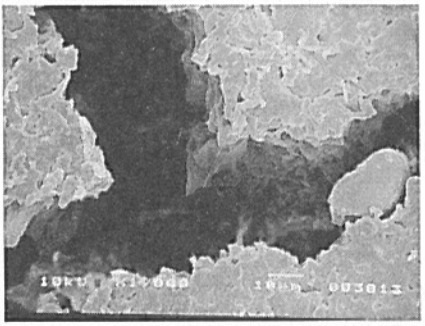
Dzięki wykorzystaniu próbek o szlifowanej powierzchni podstawy i zapewnieniu przez to symetrycznego rozkładu naprężeń podporowych, możliwe było zaobserwowanie regularnych płaszczyzn złomu, które pokrywały się linią przecięcia z osią obciążenia. Dla mniejszych prędkości deformacji zaobserwowano pojedyncze szczeliny, rozchodzące się promieniście oraz trzy typy symetrycznych pęknięć, których płaszczyzny przechodziły przez oś obciążeń, a liścienie dzielone były na dwie, trzy lub cztery części (rys. 70). Przyglądając się powierzchni kontaktu, zaobserwować można obszar spęczenia tkanki liścienia, który powoduje powstawanie naprężeń złomu rozdzielczego. Świadczy to o trwałej deformacji postaciowej, co uwidacznia się pojawieniem stałego pola powierzchni kontaktu z płytką obciążającą.

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. Potwierdza to fotografia (rys. 71), gdzie dla liścienia nasienia soi odmiany Aldana zaobserwować można promieniste uszkodzenie szczelinowe liścienia nie większe niż 50 μm. Powierzchnię złomu powstałego dla deformacji sprężystej charakteryzuje gładka mało chropowata struktura (rys. 72). Fotograficzna oraz mikroskopowa weryfikacja pozwala zaobserwować

niezniszczone ściany komórkowe, nadające gładki charakter powierzchni złomu, na przykładzie złomu liścienia soi odmiany Polan (rys. 71) przedstawiono w 1000 krotnym powiększeniu.

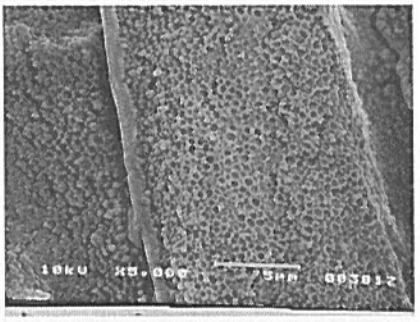


Rys. 72. Szczelinowe uszkodzenia liścieni suszonych nasion soi odmiany Polan .



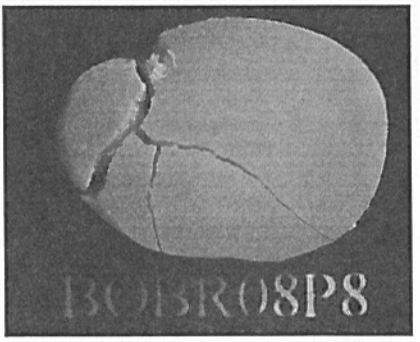
Rys. 73. Nieregularny złom liścienia suszonych nasion soi odmiany Polan .

Inny charakter powstawania uszkodzeń zaobserwowano dla suszonych nasion soi tej odmiany, a przedstawione na zdjęciach w powiększeniu 35 krotnym (rys. 72) i 1000 krotnym (rys. 73) szczeliny powstające w kilku miejscach liścienia i świadczą o kruchych właściwościach liścienia. Zanotowane mniejsze wartości modułu sprężystości dla dosuszanych nasion soi, przedstwione w poprzednim rozdziale, świadczą o niższej spójności tkanki liścieni suchych w trakcie ich deformacji, a zaobserwowane uszkodzenie ścian komórkowych ukazuje w 5000 krotnym powiększeniu (rys. 74) puste przestrzenie po kroplach tłuszczu tłumacząc bardziej chropowatą powierzchnię złomu.



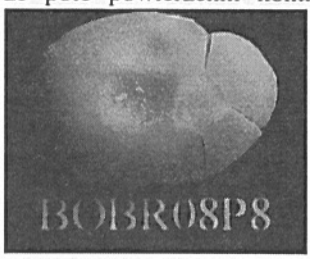
Rys. 74. Powierzchnia złomu liścienia suszonych nasion soi odmiany Polan.

Decydujący wpływ na charakter pęknięć miał kształt obciążanej próbki. Liścienie nasion bobiku odmiany Bronto o nieregularnym kształcie (rys. 75) obciążane z prędkością deformacji 50 mm/min mimo szlifowanej podstawy pękały niecentralnie. Niecentralny rozkład złomu podczas testów ściskania utrudniał prawidłową interpretację właściwości mechanicznych nasion o nieregularnym kształcie. Uszkodzenie pojawiało się w miejscu przyłożenia siły i sformowania powierzchni kontaktu. Tylko preparowane liścienie bez okrywy nasiennej pozwalają zaobserwować nieregularności kształtu i prawdziwą przyczynę pojawienia się niecentralnych pęknięć. Prowadzona dokumentacja fotograficzna deformacji oraz

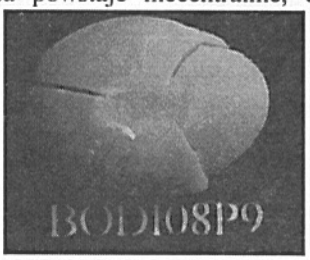


Rys. 75. Niecentralny złom liścienia nasienia bobiku odmiany Bronto.

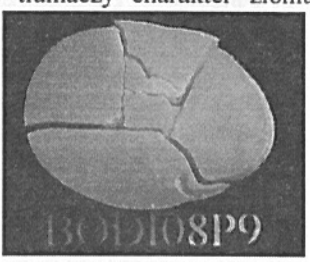
uszkodzeń liścieni pozwoliła zaobserwować pewne prawidłowości oraz przyczyny powstawania złomu. Umiejscowienie oraz wielkość pola powierzchni kontaktu określał kształt wypukłej części liścienia, który wpływał na charakter złomu i określał zakres deformacji i zagęszczenia tkanki liścienia. Fotografia nasion bobiku odmiany Bronto (rys. 77) przedstawia wypukłą część liścienia, a zagłębienie w środkowej części sprawia, że pole powierzchni kontaktu powstaje niecentralnie, co tłumaczy charakter złomu



Rys. 77. Niecentralny obszar deformacji postaciowej.

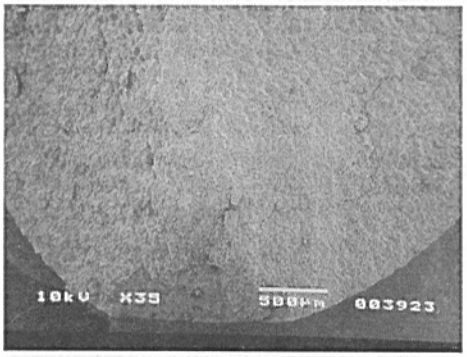


Rys. 78. Centralny obszar deformacji postaciowej.

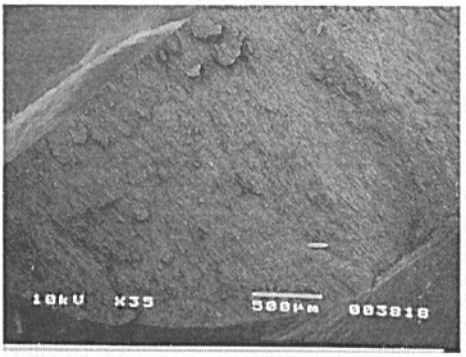


Rys. 79. Centralny obszar spęczenia liścienia .

przedstawiony na rysunku 76. W przypadku deformacji nasion odmiany Dino bardziej symetrycznym kształcie (rys. 78), mimo większej prędkości deformacji (50 mm/min), obserwowano zagęszczenie tkanki w całym przekroju liścienia, aż do jego podstawy, a złom spowodowany był spęczeniem centralnej części liścienia (rys. 79).



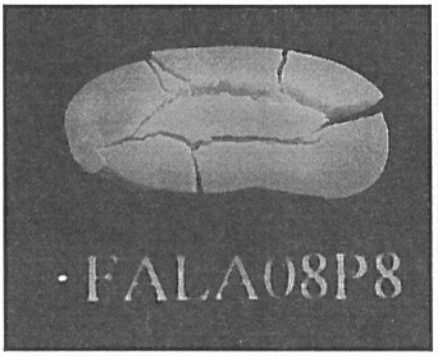
Rys. 80. Centralny obszar spęczenia liścienia nasion grochu odmiany Sześćotygodniowy.



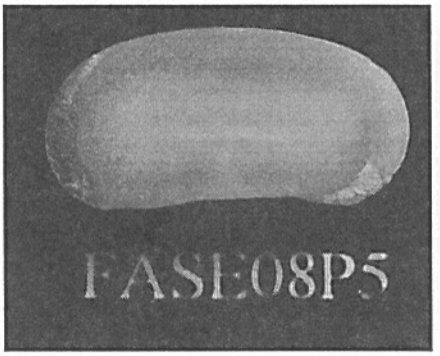
Rys. 81. Centralny obszar spęczenia liścienia nasion soi odmiany Polan.

Widoczne centralne zagęszczenie tkanki obciążanych liścieni zaobserwowano dla okrągłych o bardzo regularnym kształcie nasion grochu odmiany Sześciotygodniowy (rys. 80) dla złomu liścienia przy prędkości deformacji 20 mm/min. Obszar zagęszczenia tkanki liścienia określa granica lewej krawędzi ciemniejszej płaszczyzny złomu ćwiartki liścienia oraz mniej widoczna krawędź symetrycznie usytuowana do osi obciążenia. Bardziej chrakterystyczne granice obszaru spęczenia tkanki liścienia zaobserwowano dla nasion soi odmiany Polan (rys. 81), mimo że przy mniejszej prędkości deformacji (5 mm/min) zachodzi mniejsza deformacja postaciowa. Natomiast dosuszane nasiona stają się bardziej kruche. Pęknięcia występują często co 120 stopni rozchodząc się wzdłuż promieni, a złom liścieni powstaje nie tworząc zagęszczenia tkanki w całym przekroju.

W przypadku nasion podłużnych takich jak nasiona fasoli żółtostrąkowej odmiany szparagowej Laura (rys. 82), obciążenie powoduje deformację oraz zagęszczenie tkanki. Obszar spęczenia, zwłaszcza przy większych prędkościach deformacji, występuje pod całą powierzchnią kontaktu tworząc podłużną elipsę, zgodne z kształtem liścienia, a uszkodzenia występują promieniście tworząc złom rozdzielczy w kilku miejscach.

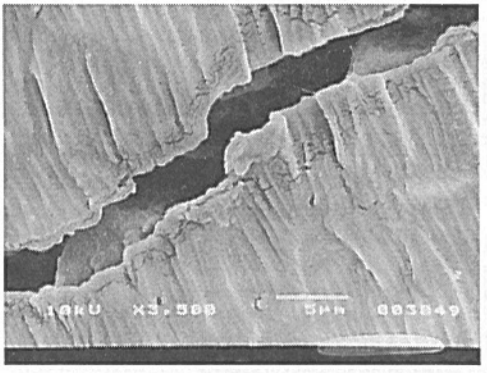


Rys. 82. Zagęszczenie tkanki liścienia przy prędkości deformacji 50 mm/min.



Rys. 83. Zagęszczenie tkanki liścienia przy prędkości deformacji 5 mm/min.

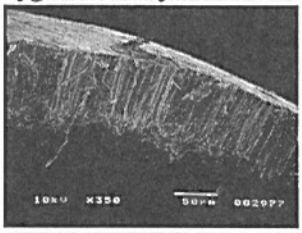
Przy mniejszej prędkości 5 mm/min, deformacja powoduje również zagęszczenie tkanki liścienia (jaśniejszy podłużny obszar centralny), jednak złom nastąpił przy małym zakresie odkształceń sprężystych i dla nasion fasoli odmiany Segal (rys. 83) jest ledwie widoczny (jasna linia pozioma). Trudna do zaobserwowania, w tym przypadku, prawie niewidoczna mała pionowa ciemna kreska w dolnej części liścienia świadczy o pojawieniu się złomu rozdzielczego. Podobnie dla nasion soi przy małych prędkościach deformacji trudno zaobserwować uszkodzenie liścienia, dla którego jednak zanotowano uskok wartości siły rejestrowany podczas ściskania, a związane z tym pojawienie się złomu w zakresie deformacji sprężystej jest gołym okiem prawie niewidoczne.



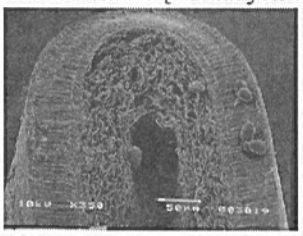
Rys. 84. Szczelina złomu rozdzielczego tkanki liścienia liścienia nasion soi powstała przy prędkości deformacji 5 mm/min.

Wielu autorów; Fornal i inni [53-55], Sadowska i inni [130], Konstankiewicz i inni [86], Kim i Hung [84], Preston [124], Sefa-Dedeh i Stanley [131] oraz Gao i inni [55-57] zauważyli, że uszkodzenia tkanki często są trudne do zaobserwowania i dopiero prawidłowa interpretacja fotografii mikroskopii skaningowej pozwala wyjaśnić przyczynę uszkodzenia. Podobnie dla nasion soi przy niewielkich prędkościach deformacji uszkodzenie jest trudne do zaobserwowania. Na przykładzie złomu sprężystego liścienia nasion soi odmiany Nawiko (rys. 84), dopiero powiększenie 3500 krotne uwidacznia szczelinę, która powstała pomiędzy ścianami komórek, tworząc krawędź złomu rozdzielczego.

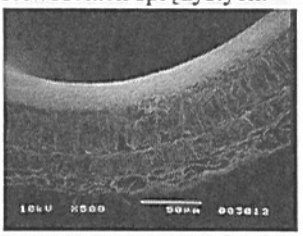
Przedstawiona budowa przekroju okrywy nasiennej nasion niektórych odmian roślin strączkowych wskazuje na ich właściwości sprężyste, a niewielkie deformacje nie mają charakteru zmian postaciowych. Bardzo ścisłą budowę prezentuje okrywa nasion fasoli odmiany Nida (rys. 85), która charakteryzowała się najwyższymi wartościami modułu sprężystości (698 MPa) uzyskanymi w teście rozciągania. Okrywa wielu odmian daje się wyginać bez wywołania uszkodzenia świadcząc o dużych właściwościach sprężystych.



Rys. 85. Okrywa nasion fasoli odmiany Nida.

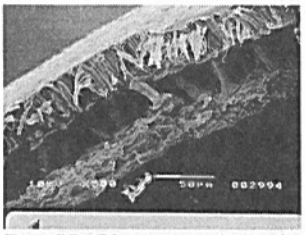


Rys. 86. Okrywa nasion fasoli odmiany Blanka.

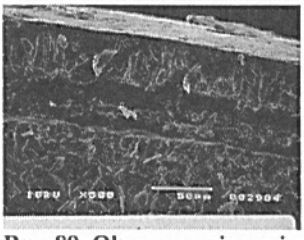


Rys. 87. Okrywa nasion fasoli odmiany Laura.

Dopiero zagięcie o 180 stopni okrywy, przedstawione dla fasoli odmiany Blanka (rys. 86) uwidacznia rozwarstwienie perynchymy gąbczastej powodowane deformacją postaciową. Mimo tak dalekiej deformacji, komórki palisadowe nie podlegają uszkodzeniu, świadcząc również o znacznych właściwościach sprężystych na rozciąganie. Deformacja odwrotna w kierunku komórek palisadowych przedstawiona na przykładzie okrywy nasion fasoli szparagowej odmiany Laura (rys. 87), potwierdza również jej właściwości sprężyste.



Rys. 88. Okrywa nasion soi odmiany Polan.

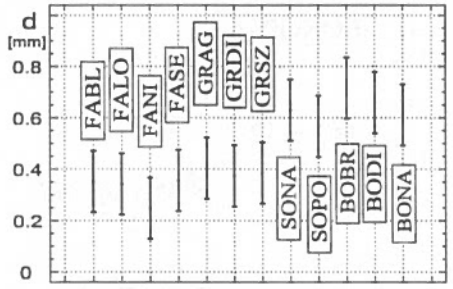


Rys. 89. Okrywa nasion soi odmiany Nawiko.

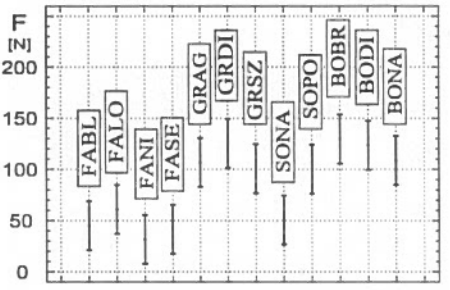
Zaobserwowaną wyższą wartość siły skurczu dla okrywy nasion soi odmiany Polan potwierdzają też zdjęcia (rys. 88) przekroju poprzecznego okrywy nasiennej, na których jej grubość osiąga wartości 93÷114 μm, a w porównaniu dla odmiany Nawiko (rys. 89) wartości te nie przekraczają 71÷75 μm. Perynchyma gąbczasta prawie nie występuje w okrywie nasion odmiany Nawiko, a jej grubość wynosi około 14 μm nie przekraczając 25 μm. W porównaniu warstwa ta w okrywie nasion odmiany Polan osiąga wartości 32÷35 μm. Warstwa komórek palisadowych obu odmian w przekroju poprzecznym wynosi około 40 μm, lecz zdecydowanie bardziej regularna w swej budowie warstwa komórek klepsydrowych (podpórkowych) okrywy nasion odmiany Polan sugeruje jej wyższą wytrzymałość mechaniczną. Jednak jest odwrotnie, to dla okrywy nasion soi odmiany Nawiko, wyznaczono większe naprężenia rozciągające. Łatwo zaobserwować, że do obliczeń naprężenia brano pod uwagę pole powierzchni przekroju paska okrywy, a z powyższych fotografii można wywnioskować, że większa grubość okrywy odmiany Polan związana jest z warstwą komórek klepsydrowych pracujących raczej na ścinanie a nie na rozciąganie. Dlatego warto zwrócić uwagę na te odmiany w następnym rozdziale, gdzie zostaną omówione wyniki testu połówkowania, w których okrywa podlega ścinaniu.

6.7. Właściwości mechaniczne nasion w testach połówkowania

Zastosowanie testu połówkowania miało na celu sprawdzenie znanego w praktyce produkcji nasion roślin strączkowych mechanizmu powstawania uszkodzeń, oszacowanie liczbowe właściwości mechanicznych nasion poddanych ścinaniu oraz wyznaczenie wytrzymałości w warunkach odpowiadających temu mechanizmowi. Opracowana przystawka, zastosowana w tym teście, posiadała łoże o kilku krzywiznach oraz możliwość regulacji odstępu pomiędzy elementami tnącymi, zapewniając odpowiednie



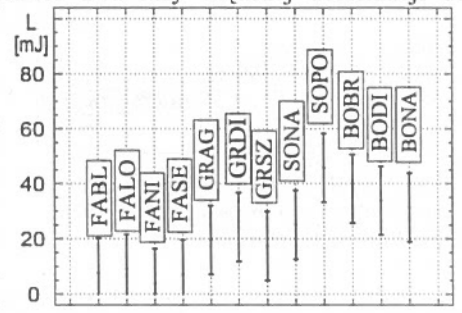
Rys. 90. Deformacja niszcząca podczas ścinania okrywy (test połówkowania).



Rys. 91. Siła tnąca wyznaczona w teście połówkowania.

ułożenie nasion w zależności od ich wymiaru i kształtu dla poszczególnych gatunków i odmian. Pomiar ten zapewniał uzyskanie danych odpowiających ścinaniu okrywy a nie przemieszczaniu czy deformacji postaciowej liścieni. Mimo tak opracowanego łoża i przystawki do testu połówkowania, nie było możliwe zagwarantowanie prawidłowych warunków ścinania okrywy nasion dla niektórych odmian.

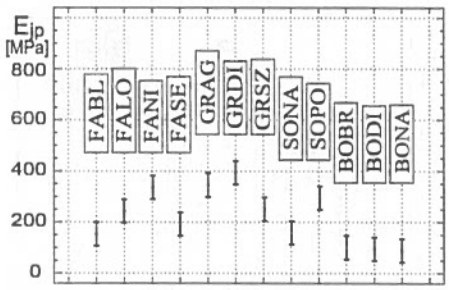
Zarejestrowane podczas testu połówkowania średnie wartości deformacji niszczącej (0.3÷0.4 mm) wskazywały na zbliżone właściwości okrywy nasion fasoli i grochu (rys. 90). Nasiona soi i bobiku podlegają prawie dwa razy większej deformacji do momentu ścięcia okrywy nasiennej, osiągając wartości w zakresie 0.6÷0.7 mm. Zróżnicowanie wartości deformacji dla tych gatunków nasion można tłumaczyć wyższą zawartością tłuszczu w przypadku nasion soi oraz grubszą okrywą i nieregularnym kształtem nasion bobiku. Dla wspomnianych w porzednim rozdziale odmian soi Nawiko i Polan nie zaobserwowano istotnych różnic, a okrywa nasion tych odmian podlegała podobnej deformacji.



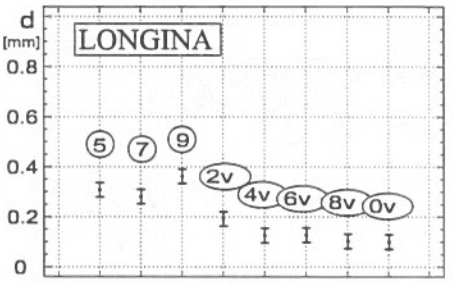
Rys. 92. Praca deformacji niszczącej podczas ścinania okrywy w teście połówkowania.

Dopiero siła powodująca połówkowanie nasion pozwoliła wyróżnić odmianę soi Nawiko oraz wszystkie badane w tym teście odmiany fasoli (rys. 91) jako słabsze, jednak związane jest to z ich mniejszą grubością okrywy. Największą pracę uszkodzenia (rys. 92) zanotowano dla nasion soi odmiany Polan o nietypowej oliwkowej okrywie oraz dla nasion bobiku odmian Bronto, Dino i

Nadwiślański czyli nasion, które są poddawane procesom obłuskiwania w celu poprawienia wartości paszowej [100-104]. W efekcie praca uszkodzenia dla nasion fasoli jest bardzo mała (przedziały ufności zawierają nawet wartości ujemne), co tłumaczy ich najwyższą podatność na połówkowanie zaobserwowaną w praktyce. Największe wartości modułu sprężystości okrywy (330÷390 MPa) otrzymano dla grochu uprawianego na suche nasiona odmian Diament i Agat oraz fasoli odmiany Nida o barwnej i mocnej okrywie (rys. 93).

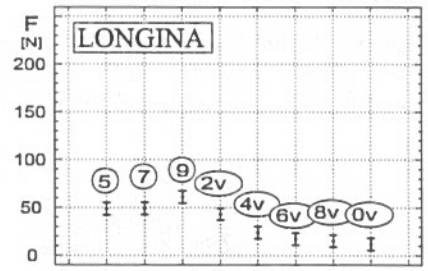


Rys. 93. Moduł sprężystości poprzecznej okrywy nasion wyznaczony w teście połówkowania.

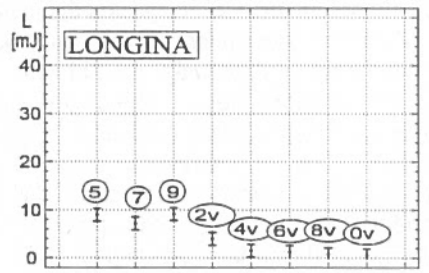


Rys. 94. Deformacja niszcząca podczas ścinania okrywy nasion fasoli odmiany Longina przy różnych prędkościach.

Wśród wszystkich badanych odmian nasiona fasoli odmiany Longina najdokładniej przylegały do łoża w stanowisku do połówkowania, dlatego przedstawiono wyniki uzyskane dla tej odmiany w warunkach dużych prędkości deformacji.



Rys. 95. Siła ścinania okrywy nasion fasoli odmiany Longina przy różnych prędkościach deformacji.



Rys. 96. Praca ścinania okrywy nasion fasoli odmiany Longina przy różnych prędkościach deformacji.

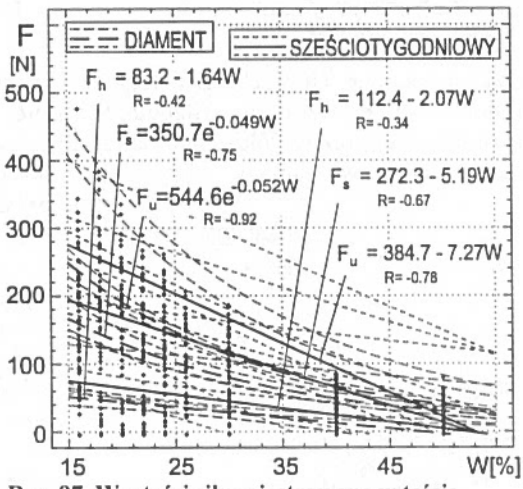
Zaobserwowano, że dla większych prędkości przemieszczeń, zwłaszcza powyżej 200 mm/min, zarówno deformacja (rys. 94) jak i siła tnąca (rys. 95) jest zdecydowanie mniejsza. W zakresie prędkości deformacji 400÷1000 mm/min nie zaobserwowano statystycznie istotnych różnic. W tym zakresie praca 2 mJ jest wystarczająca do spowodowania uszkodzenia okrywy odpowiadającego połówkowaniu nasion (rys. 96).

Wraz ze wzrostem prędkości rośnie energia elementów roboczych, która może zostać przekazana jako praca uszkodzenia a jedyną metodą przeciwdziałania jest zapewnienie takich warunków, w których nasiona nie będą narażone na odkształcenia przekraczające wartość deformacji sprężystej 0.1 mm.

6.8. Właściwości mechaniczne nasion oraz okrywy w testach ściskania

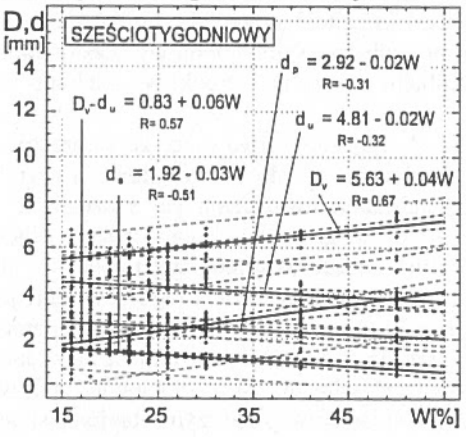
Badania mające na celu sprawdzenie pewnych rozważań modelowych dotyczących zmian kształtu podczas deformacji postaciowej nasion wilgotnych prowadzono na odmianach grochu o nasionach gładkich i kulistym kształtcie takich jak: odmiany jadalnej Diament, czy też grochu zielonego warzywnej odmiany Sześciotygodniowy. Zastosowano szeroki zakres wilgotności, tak aby badaniami objęto spotykane warunki w jakich nasiona znajdują się w trakcie zbioru.

Już w poprzednich pracach własnych [25, 31, 38] zaobserwowano, że w przebiegu krzywej siła-przemieszczenie daje się wyodrębnić dwa odcinki prostoliniowe o różnym kącie nachylenia. Złożony charakter krzywej ściskania uwidacznia się szczególnie w zakresie wilgotności 14÷26%. Wraz ze wzrostem wilgotności okrywa nasion grochu zostaje coraz bardziej wypełniona. Równocześnie zaobserwowano, że zmiana kształtu nasion w trakcie zgniatania powoduje wzrost powierzchni liścieni, czego skutkiem jest wypełnienie okrywy a następnie jej rozciąganie. Dlatego nie zajmowano się badaniem przebiegu siły w funkcji deformacji czy przemieszczenia, a skoncentrowano się na badaniu przebiegu poszczególnych składowych, odpowiedzialnych za rozciąganie okrywy, wymienionych wielkości w funkcji wilgotności. Tak więc w pierwszym etapie ściskania nasion zachodzi tylko deformacja postaciowa liścieni d_p, czemu odpowiada pierwszy, prostoliniowy odcinek krzywej siła-przemieszczenie, a następnie w drugim etapie, po całkowitym wypełnieniu okrywy mierzona siła F_u jest sumą siły potrzebnej na dalszą deformację postaciową lepkosprężystych liścieni oraz siły naprężającej okrywę F_h, czemu odpowiada drugi, prostoliniowy odcinek krzywej siła-przemieszczenie. Charakter ten potwierdzają wartości zarejestrowane w testach ściskania (rys. 97). Siła deformacji sprężystej F_s wraz ze wzrostem wilgotności maleje, zwłaszcza powyżej wilgotności 16 %, co potwierdzają ujemne współczynniki korelacji zanotowane dla obu odmian. Siła F_u w zakresie wilgotności 16÷20 % rośnie, co związane jest z naprężaniem okrywy wraz ze zmianą kształtu deformacji postaciowej nasion. Dalszy wzrost wilgotności powyżej wilgotności 18 % i z tym związana utrata właściwości sprężystych zarówno liścieni jak i okrywy odzwierciedlają malejące wartości siły F_u, powodującej uszkodzenie okrywy nasion grochu obu odmian, a zależność tej wielkości w funkcji wilgotności dla odmiany Sześciotygodniowy opisuje regresja liniowa, zaś dla odmiany Diament funkcja wykładnicza, a współczynnik korelacji (R=-0.92) potwierdza mocny wpływ wilgotności na badaną cechę. Udział wytrzymałości okrywy na wartość siły F_u wraz ze wzrostem wilgotności maleje co potwierdzają zależności prostoliniowe F_h przedstawione na rysunku 97.

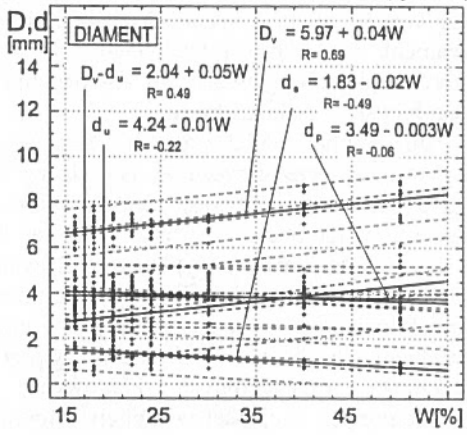


Rys. 97. Wartości siły rejestrowane w teście ściskania nasion grochu.

Układ pomiarowy maszyny Instron rejestrując przemieszczenie pozwalał na wyznaczenie średnicy nasion w kierunku ściskania przed deformacją D_v oraz wysokości nasion po deformacji D_v-d_u. Rejestrowane wielkości w układzie przemieszczenia osiowego deformacji nasion grochu odmiany Sześciotygodniowy (rys. 98) oraz Diament (rys. 99)

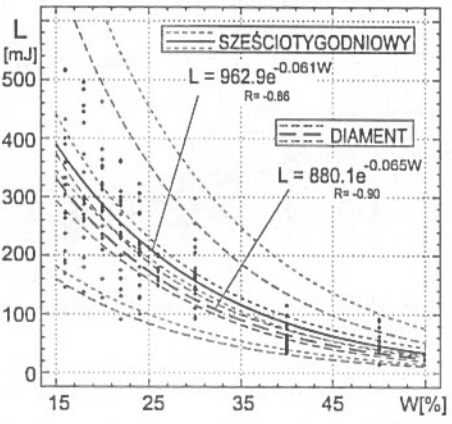


Rys. 98. Wymiary nasion grochu odmiany Sześciotygodniowy oraz wartości deformacji osiowej.



Rys. 99. Wymiary nasion grochu odmiany Diament oraz wartości deformacji osiowej.

ukazują podobne ich przebiegi w funkcji wilgotności dla obu odmian. Wielkość średnicy nasion wraz ze wzrostem wilgotności rośnie, a zbliżone wartości równania regresji prostoliniowej oraz współczynniki korelacji potwierdzają podobne zachowanie się nasion obu odmian w funkcji wilgotności. Większe wartości parametrów zależności prostoliniowej deformacji uszkodzenia okrywy dla odmiany Sześciotygodniowy niż dla odmiany Diament potwierdzają wyższą wytrzymałość okrywy jej nasion. Śladowe właściwości sprężyste całych nasion, malejące wraz ze wzrostem wilgotności w zakresie dużych odkształceń związane są tylko z właściwościami sprężystymi okrywy na rozciąganie. Deformacja postaciowa uszkodzenia d_p wraz ze wzrostem wilgotności rośnie ale tylko do wilgotności 24 %. Dalszy wzrost wilgotności powoduje większe wypełnienie okrywy przez pęczniejące liścienie, co prowadzi do uszkodzenia okrywy przy mniejszej deformacji postaciowej.

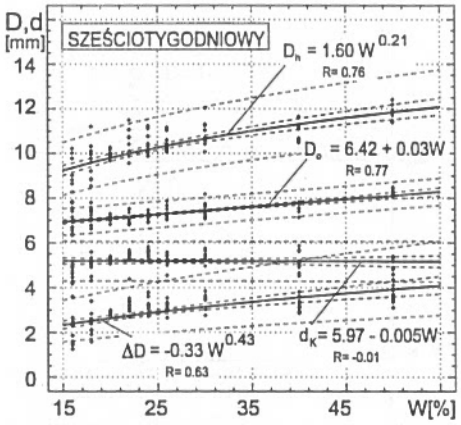


Rys. 100. Praca deformacji niszczącej nasion grochu.

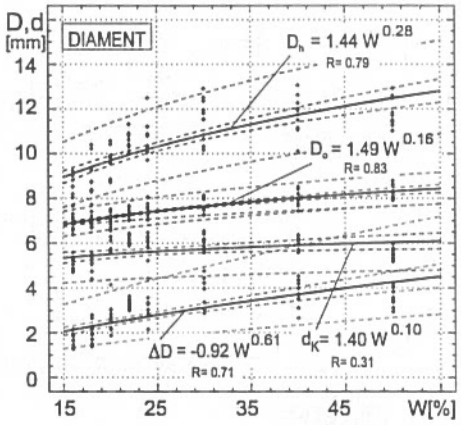
Uszkodzenie suchych nasion powoduje duża siła przy niewielkiej deformacji i odwrotnie dla nasion wilgotnych rejestrowano dużą deformację powodowaną małą siłą. W efekcie wpływa to na wartość pracy deformacji niszczącej (rys. 100), która swoje maksimum (ok. 500 mJ) osiąga przy wilgotności 12÷14 % dla odmiany Diament, a dla

odmiany Sześciotygodniowy przy wilgotności 18 %. Dla porównania praca uszkodzenia okrywy w teście połówkowania nasion suchych wynosiła zaledwie 20÷25 mJ (dla odmian Diament i Sześciotygodniowy). Wartość pracy niszczącej wraz ze wzrostem wilgotności malała co potwierdza regresja krzywoliniowa, a parametry funkcji wykładniczej dla obu odmian oraz wysokie, ujemne współczynniki korelacji (R=-86÷-90) potwierdzają negatywny wpływ wilgotności na wartość pracy deformacji niszczącej okrywę w trakcie ściskania całych nasion.

Wyliczona z zależności (8) w oparciu o wyznaczoną wielkość deformacji osiowej, średnica pola powierzchni kontaktu d_K nasion grochu odmiany Sześciotygodniowy (rys. 101) oraz Diament (rys. 102), świadczy o niewielkim wpływie wilgotności na jej wartość, co potwierdzają parametry równań regresji oraz niskie współczynniki korelacji.

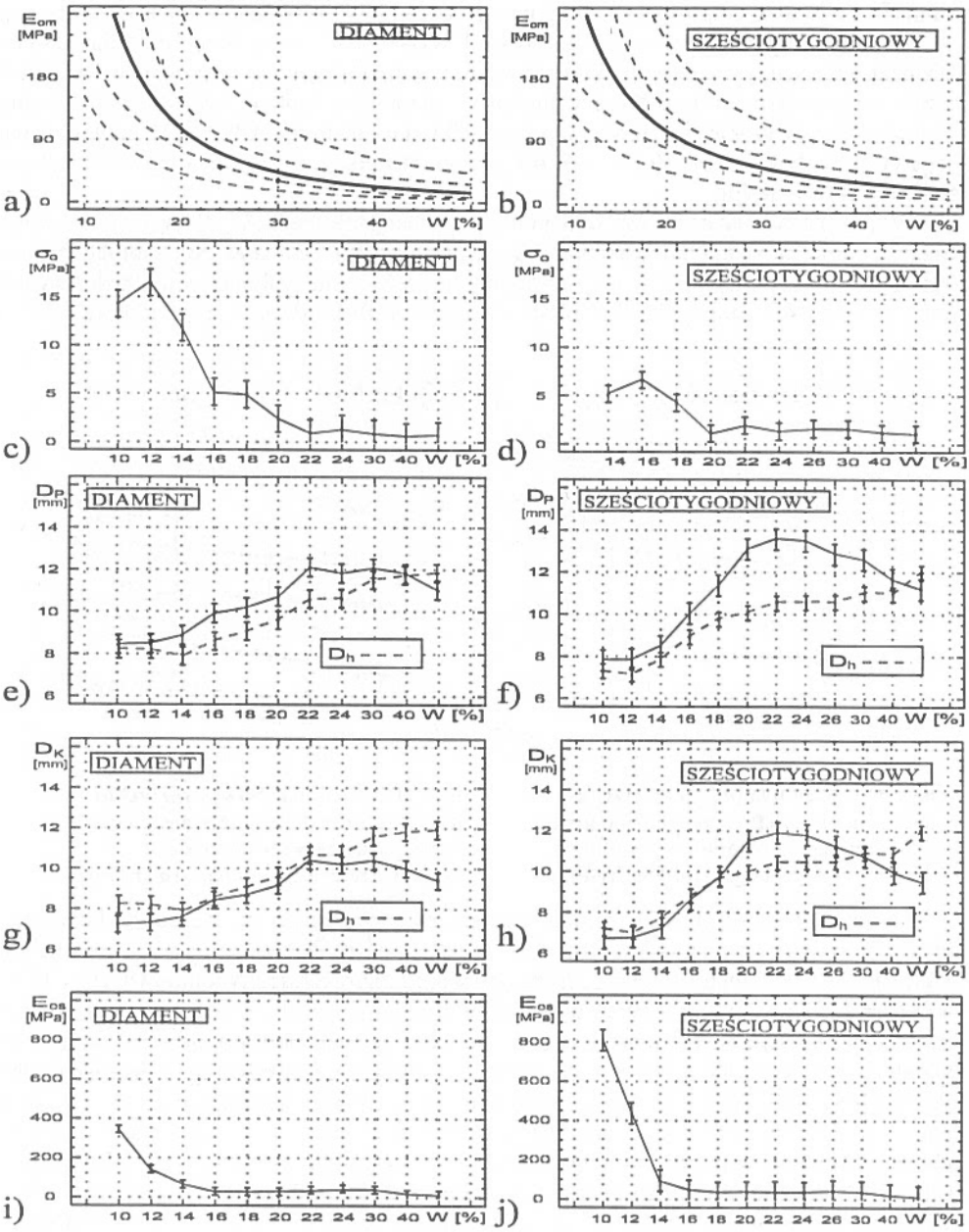


Rys. 101. Średnica pola powierzchni kontaktu oraz deformacja nasion grochu odmiany Sześciotygodniowy w układzie ekstensometrycznego pomiaru średnicy.



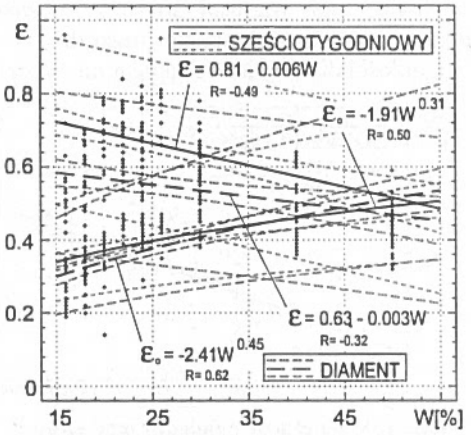
Rys. 102. Średnica pola powierzchni kontaktu oraz deformacja nasion grochu odmiany Diament w układzie ekstensometrycznego pomiaru średnicy.

Ekstensometryczny pomiar średnicy nasion D_o prostopadłej do kierunku obciążenia przed deformacją oraz średnicy nasion D_h w tej samej płaszczyźnie lecz po deformacji pozwalał określić zmiany średnicy nasion grochu odmiany Sześciotygodniowy (rys. 101) oraz Diament (rys. 102), w funkcji wilgotności oraz jej przyrost ΔD w kierunku działania ekstensometru. Zaobserwowano przyrost średnicy nasion obu odmian ze wzrostem wilgotności, jednak mniejszy niż w układzie osiowym przedstawionym wcześniej na rysunkach 97 i 98. Wymiary rejestrowane w układzie ekstensometrycznym (6.8÷8.3 mm) oraz w osi obciążenia (6.4÷8.2 mm) świadczą o bardziej kulistym kształcie nasion grochu odmiany Diament w porównaniu do odmiany Sześciotygodniowy, której średnica nasion w płaszczyźnie pracy ekstensometru (6.4÷8.2 mm) była większa niż w osi obciążenia (5.5÷7.2 mm). Rosnące, wraz ze wzrostem wilgotności w zakresie 15÷25 %, wartości średnicy nasion D_h podczas uszkodzenia okrywy, świadczą o jej niecałkowitym wypełnieniu przez deformowane liścienie w tym zakresie. Charakter funkcji potęgowej potwierdza większe wypełnienie okrywy powodowane dalszym wzrostem wilgotności.



Rys. 103. Mierzone i modelowe wartości charakteryzujące właściwości mechaniczne nasion grochu odmiany Diament i Sześciotygodniowy.

Układ ekstensometryczny pozwala wyznaczyć bezpośrednio odkształcenie obwodowe okrywy ε_o (rys. 104) oraz wyliczyć średnicę D_o w płaszczyźnie prostopadłej do obciążenia przed deformacją, średnicę D_h po deformacji spowodowanej zmianą kształtu podczas ściskania całych nasion oraz jej przyrost ΔD, przedstawione wcześniej na rysunkach 101 i 102. Moduł sprężystości okrywy nasiennej E_{om} (rys. 103 a,b) wyznaczono w oparciu o wcześniej przedstawione rozważania modelowe (10) deformacji nasion w zakresie dużych odkształceń oraz wartości średnie naprężenia σ_o na powierzchni kontaktu przedstawione dla tych odmian na rysunku 103 c,d. Równocześnie w układzie rejestracyjnym przemieszczenia osiowego, dzięki możliwości pomiaru średnicy nasienia D_v w osi obciążenia oraz deformacji niszczącej okrywę d_u, możliwe jest wyznaczenie odkształcenia ε powodującego uszkodzenie okrywy (rys. 104). Wzrost wypełnienia okrywy przez liścienie o coraz wyższej wilgotności potwierdzają malejące wartości odkształcenia osiowego ε. Okrywa nasion grochu odmiany Diament jest w większym stopniu wypełniona, na co wskazują wartości rejestrowane podczas uszkodzenia okrywy. Natomiast, parametry funkcji potęgowej opisującej zależność odkształcenia obwodowego ε_o od wilgotności, potwierdzają zaobserwowaną wcześniej (rozdz. 6.4), większą deformację niszczącą okrywy w testach rozciągania dla wyższych poziomów wilgotności.

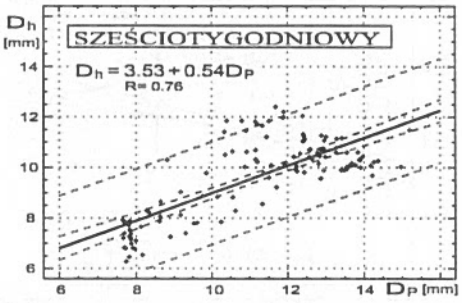


Rys. 104. Odkształcenie obwodowe okrywy oraz osiowe nasienia podczas ściskania nasion grochu o kulistym kształcie.

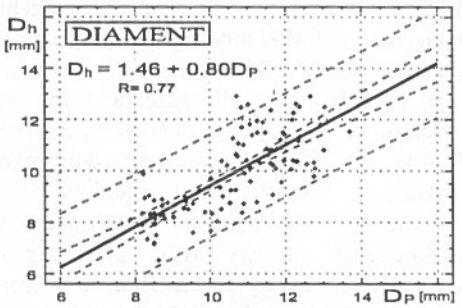
Przedstawiona wielkość modułu sprężystości nasion grochu E_{as} dla odmiany Diament (rys. 103i) i Sześciotygodniowy (rys. 103j) wyznaczona była zgodnie z procedurą zastosowaną przez firmę Instron, jednak wielkość ta tylko w części odpowiadała za właściwości sprężyste nasion. Na wartość tą wpływały właściwości wytrzymałościowe okrywy nasiennej na rozciąganie. Łatwo zauważyć można, że właściwości sprężyste nasion maleją gwałtownie ze wzrostem wilgotności już na poziomie 16 %. Pewne zróżnicowanie pomiędzy odmianami związane jest z kształtem nasion i innym polem powierzchni kontaktu wpływającym na sposób wartość wyznaczania modułu sprężystości i jego wartość. Dla wyższych poziomów wilgotności zaobserwowano śladowe właściwości sprężyste nasion obu odmian, związane jednak już z właściwościami sprężystymi okrywy, a nie liścieni. Dla wilgotności powyżej 30 %, właściwości sprężyste okrywy maleją, stąd zauważyć można dodatkowe obniżenie się wyznaczanej wartości, choć wielkość ta jest nieistotna statystycznie przy 95 % poziomie istotności.

Wyznaczona średnica nasion w oparciu o opis zmian geometrycznych w deformacji modelowej o zarysie parabolicznym D_P (rys. 103e,f) oraz o zarysie kulistym D_K (rys. 103g,h) deformowanych nasion oraz wartość deformacji osiowej d, pozwala zaobserwować, że wartości średnicy D_h wyznaczone eksperymentalnie za pomocą układu ekstensometrycznego pokrywają się w pewnych zakresach wilgotności z wartościami

modelowymi, a w całym zakresie wilgotności różnice nie przekraczają 15 %. Dla odmiany Diament wartości deformacji modelowej o zarysie kulistym D_K różnią się statystycznie dopiero dla wilgotności powyżej 30 %, a dla odmiany Sześciotygodniowy statystyczne różnice zaobserwowano w zakresie wilgotności 20÷24 % i 50 %. Dla deformacji modelowej o zarysie parabolicznym D_P zaobserwowano różnice w zakresie wilgotności 16÷30 %, lecz wartości średnicy w zakresie wilgotności powyżej 30 % poprawnie odzwierciedlają deformację uszkodzenia okrywy, a różnice w pozostałym zakresie wilgotności dla odmiany Diament nie przekraczają 10 %.



Rys. 105. Zależność pomiędzy modelową i eksperymentalną wartością średnicy nasion grochu odmiany Sześciotygodniowy dla deformacji niszczącej.



Rys. 106. Zależność pomiędzy modelową i eksperymentalną wartością średnicy nasion grochu odmiany Diament dla deformacji niszczącej.

Wzajemna korelacja prostoliniowa wartości średnicy nasion w deformacji modelowej o zarysie parabolicznym D_P i wartości D_h, wyznaczonej eksperymentalnie za pomocą ekstensometru dla nasion grochu odmiany Sześciotygodniowy (rys. 105) i Diament (rys. 106), potwierdzają poprawność opisów modelowych, a współczynniki korelacji (0.76 i 0.77) świadczą o niejednorodnym materiale jakim są prawie okrągłe nasiona grochu. Współczynnik kierunkowy (0.80>0.54) zależności prostoliniowej wielkości średnicy mierzonej oboma sposobami potwierdza bardziej okrągły kształt nasion grochu odmiany Diament w całym zakresie zmian wilgotności stosowanym w badaniach.

Badania prowadzone na całych nasionach umożliwiają wyznaczenie wielu właściwości mechanicznych nasion oraz ich okrywy, a zaobserwowana zgodność wyników eksperymentalnych z wyliczonymi w oparciu o modelowe zależności geometryczne dotyczące deformacji całych nasion wilgotnych potwierdza zasadność zastosowanych metod. Zaobserwowane uszkodzenia okrywy nasiennej w zakresie dużych deformacji nie pozwalają analizować mechanizmu powstawania uszkodzeń dla mniejszych odkształceń oraz nasion suchych podlegających nieznacznym deformacjom sprężystym. Dlatego też, uzyskane wyniki dotyczące właściwości mechanicznych liścieni, okrywy nasiennej oraz całych nasion wymagają dyskusji i analizy w oparciu o zaproponowane mechanizmy powstawania uszkodzeń; odrębne dla różnych poziomów wilgotności.

7. ANALIZA PRZYCZYN POWSTAWANIA USZKODZEŃ

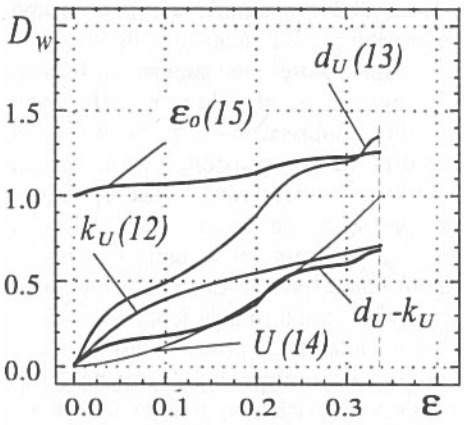
Przedstawione w poprzednim rozdziale wyniki badań przeprowadzonych na okrągłych nasionach grochu miały na celu określenie wpływu wytrzymałości okrywy nasiennej na całkowitą wytrzymałość nasion wilgotnych w zakresie dużych odkształceń. Analizując wykresy siły w funkcji przemieszczenia uzyskane w trakcie ściskania nasion, zaobserwowano, że różniły się one charakterem przebiegu dla różnych wilgotności, a rejestrowane wartości siły zależne były nie tylko od właściwości mechanicznych liścieni, ale także od wytrzymałości okrywy nasiennej; zwłaszcza dla dużych deformacji. Wcześniejsze badania własne [25, 31, 38] pozwoliły zaobserwować, że w przebiegu krzywej siła-przemieszczenie daje wyodrębnić się dwa odcinki prostoliniowe o różnym kącie nachylenia, a złożony charakter krzywej ściskania uwidacznia się szczególnie w zakresie wilgotności 14÷26 %. W pierwszym etapie ściskania nasion zachodzi tylko deformacja postaciowa liścieni d_p, czemu odpowiada pierwszy, prostoliniowy odcinek krzywej siła-przemieszczenie, a następnie w drugim etapie po całkowitym wypełnieniu okrywy, mierzona siła F_u jest sumą siły potrzebnej na dalszą deformację lepkosprężystych liścieni oraz siły naprężającej okrywę F_h, czemu odpowiada drugi prostoliniowy odcinek krzywej siła-przemieszczenie. Wzrost wilgotności i większe wypełnienie okrywy przez napęczniałe liścienie przy równoczesnej zmianie kształtu nasion w trakcie deformacji wymagającej większej powierzchni zewnętrznej, która mogłaby otoczyć liścienie powoduje, że okrywa nasion grochu zostaje rozciągana a następnie rozerwana. Dalszy wzrost wilgotności powyżej 20 % prowadzi do uszkodzenia okrywy przy mniejszej deformacji postaciowej.

Interpretacja drugiego odcinka krzywej siła-przemieszczenie pozwala wyznaczyć moduł sprężystości okrywy w oparciu o prosty model (rozdział 4.1.1.) opisujący zależności geometryczne odkształcanej postaciowo bryły kulistej otoczonej sprężystą powłoką. Przedstawione wyniki pomiarów D_P (rys. 103 ef) i D_K (rys. 103 gh) oraz wzajemna korelacja prostoliniowa wartości średnicy nasion w deformacji modelowej o zarysie parabolicznym D_P i wartości D_h wyznaczonych eksperymentalnie za pomocą ekstensometru (rys. 105 i 106) odzwierciedlają deformację wilgotnych nasion grochu i potwierdzają poprawność opracowanych opisów modelowych. Zanotowane wartości odkształcenia osiowego ε (rys. 104) wskazują jednak, że uszkodzenie okrywy następuje przy bardzo dużej deformacji. Zmiana kształtu nasion powodowana dużą deformacją postaciową (dotyczy tylko nasion wilgotnych) jest jednym z mechanizmów powstawania uszkodzeń okrywy, lecz nie może być główną przyczyną uszkodzenia nasion. Rozważań dotyczących dużych zakresów odkształceń nie można było jednak pominąć, gdyż we wcześniejszych badaniach własnych [34] zaobserwowano, że wilgotne nasiona grochu poddawane obciążeniom nawet do 10 MPa podlegały znacznej deformacji postaciowej i trwałej zmianie kształtu, a mimo to zachowywały wysoką zdolność kiełkowania.

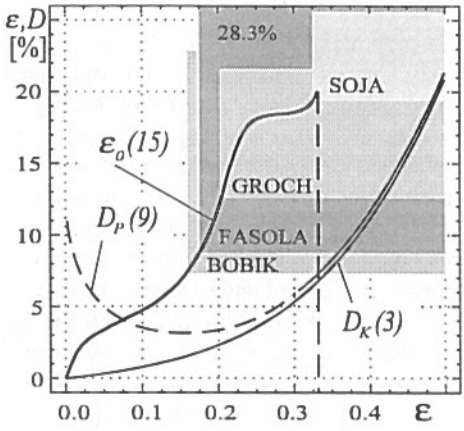
Rozważony mechanizm powstawania uszkodzeń okrywy wymagał jednak założenia symetrycznego ułożenia nasienia, w którym płaszczyzna podziału liścieni zawierała oś obciążenia. Tylko w takim położeniu i prostopadłym do osi oba liścienie można było w przybliżeniu traktować jako jednolitą kulę deformowaną podczas ściskania wilgotnego nasienia. W warunkach rzeczywistych, podczas zbioru i omłotu trudno sobie wyobrazić by nasiona mogły się ustawić w położeniach symetrycznych, zwłaszcza, że podczas omłotu

spodziewać się można dodatkowych sił stycznych do powierzchni okrywy wywołanych obrotem bębna młócącego.

Dlatego też w rozdziale 4.1.2. rozważono dowolne ułożenie osi obciążenia względem płaszczyzny podziału liścieni. Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyczne wielkości geometryczne opisujące wzajemny uślizg liścieni powodowany deformacją osiową, a zmiany tych wielkości w funkcji odkształcenia osiowego ε (rys. 107) przedstawiono w niniejszym rozdziale celem łatwiejszego przedyskutowania mechanizmów powstawania uszkodzeń. Wartość uślizgu U wzdłuż płaszczyzny podziału liścieni rośnie wraz ze wzrostem odkształcenia ε, lecz tylko do wartości, gdy wielkość ta zrówna się z średnicą nasienia D_w. W tym momencie bryła powstała z dwóch liścieni zetkniętych krawędzią obwodu wymaga największej powierzchni otaczającej okrywy. Dalsze obciążanie spowoduje, że liścień położony wyżej ześlizgnie się, a powstałą bryłę będzie mogła otoczyć okrywa już o mniejszej powierzchni. Ześlizgujący się liścień powoduje stały wzrost wartości k_U i d_U, dla których wartości wyliczyć można z zależności (12) i (13). Różnica tych wielkości pozwala wyznaczyć odkształcenie obwodowe ε_o okrywy rozciąganej uślizgującymi się liścieniami. Wszystkie wartości przedstawione na rysunku 107 podano w jednostkach bezwymiarowych w stosunku do wielkości średnicy nasienia D_w.



Rys. 107. Charakterystyczne wielkości geometryczne uślizgu liścieni.



Rys. 108. Procentowy przyrost wielkości średnicy nasion w deformacji osiowej oraz w trakcie uślizgu liścieni.

Odkształcenie obwodowe ε_o rozciąganej okrywy spowodowane uślizgiem liścieni wyrażone w procentach przedstawiono na rysunku 108, na którym dla porównania przedstawiono procentowy przyrost wartości średnicy nasion w deformacji modelowej o zarysie parabolicznym D_P i zarysie kulistym D_K oraz zakresy spotykanych wartości deformacji niszczącej okrywę nasion badanych gatunków roślin strączkowych, uzyskane w testach rozciągania. Średnica nasion w deformacji modelowej o zarysie kulistym D_K rośnie wraz ze wzrostem odkształcenia osiowego, jednak przyrost 10 % uzyskuje dla odkształcenia osiowego ε bliskiego 0.4. Podobne wartości w tym zakresie odkształceń przyjmuje średnica deformacji o zarysie parabolicznym D_P. Dla odkształcenia ε poniżej 0.3 przebieg wartości przyrostu średnicy deformacji o zarysie parabolicznym D_P

(zaznaczony linią przerywaną) związany jest ze sposobem obliczania zarysu deformacji i opisuje koło powstałe z dwóch fragmentów paraboli, dlatego w tym zakresie deformacji osiowej należy stosować opis o zarysie kulistym. Uślizg liścieni powoduje przyrost odkształcenia obwodowego okrywy sięgający 15 % dla wartości odkształcenia osiowego ε bliskiego 0.2, co świadczy o możliwości powstania naprężeń niszczących w okrywie nasiennej w tym zakresie deformacji. Potwierdzają to wartości deformacji zanotowane w testach rozciągania okrywy dla większości badanych gatunków i odmian nasion roślin strączkowych, dla których wartości deformacji niszczącej zawierały się w zakresie 7.1÷28.3 % średnicy nasion. Najbardziej narażona na rozerwanie w trakcie uślizgu liścieni jest okrywa nasion bobiku i fasoli; znacznie mniej okrywa nasion grochu, która rozrywa się przy dużym wydłużeniu, wymuszonym większym uślizgiem liscieni. Natomiast okrywa nasion soi ulega uszkodzeniu przy wydłużeniu w zakresie 19.4÷25.3 %, co w zasadzie jest już poza zakresem deformacji powodowanej uślizgiem.

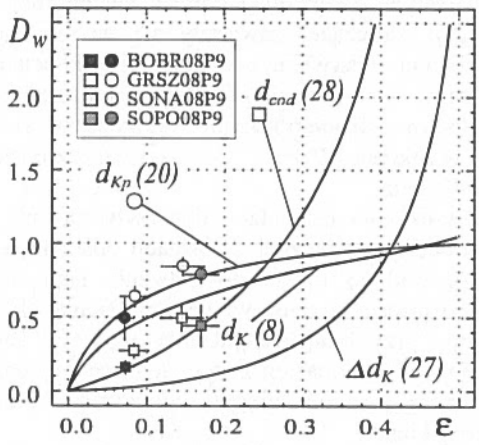
Rozważone dotychczas mechanizmy powstawania uszkodzeń dotyczyły nasion o wilgotności powyżej 12 %, których liścienie podlegały znacznej deformacji postaciowej lub uślizgiwały się. W obu przypadkach prowadziło to do powstawania naprężeń rozciągających w okrywie nasiennej, jednak wartości przedstawione na rysunku 108 wskazują, że tylko uślizg liścieni może być przyczyną uszkodzenia okrywy. Ten mechanizm jest również główną przyczyną pojawiania się nasion z wyraźnym pęknięciem okrywy lub pozbawionych całkowicie okrywy, wśród grochu zbieranego jako konserwowy; potocznie zwanego „zielonym groszkiem".

Zaobserwowano natomiast, że mechanizm uszkodzenia nasion suchych jest całkowicie odmienny i o ile nasiona wilgotne są deformowane, a uszkodzeniu ulega ich okrywa, to nasiona o wilgotności równoważnej do 8 % uszkodzone zostają przy niewielkim odkształceniu; na skutek pęknięcia liścieni. W tym zakresie wilgotności nasiona można porównać do materiału sprężysto-kruchego, jednak poprawną interpretację wykresów siła-przemieszczenie dla nasion nie nawilżanych o właściwościach zbliżonych do sprężystych można prowadzić tylko w zakresie małych odkształceń, w zasadzie nie powodujących uszkodzeń [25, 49].

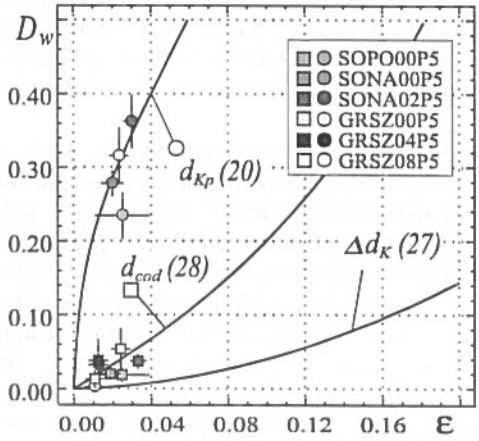
Dla wszystkich badanych odmian zaobserwowano, że uszkodzenie liścieni suchych nasion rejestrowano przy deformacji około 0.2 mm i różnice pomiędzy wartościami uzyskanymi dla większości poziomów wilgotności liścieni nasion dosuszanych były nieistotne statystycznie. Kształt nasion, a w zasadzie ich nieregularność wpływała w większym stopniu na wartości deformacji oraz rozrzut uzyskanych wyników. Największe wartości średnie siły podczas uszkodzenia liścieni rejestrowano dla nasion dużych takich jak nasiona bobiku o nieregularnym kształcie czy podłużnych jak nasiona fasoli. Przedziały ufności dla tych wartości zawierały się często w granicach 400÷650 N. Dla nasion grochu średnie wartości siły zawierały się w przedziale 250÷450 N, a dla nasion soi w przedziale 120÷250 N. Przedziały te wskazywałyby na bardzo duże zróżnicowanie wytrzymałości mechanicznej nasion poszczególnych odmian i gatunków. Jednak wartości modułu sprężystości wyznaczone w zakresie deformacji sprężystej wykazały, że faktyczna wytrzymałość liścieni poszczególnych odmian jest mniej zróżnicowana.

Wyznaczenie modułu sprężystości przez wielu autorów [1, 2, 9, 87, 88, 120, 132, 141] uważane jest za najbardziej poprawną ocenę właściwości mechanicznych badanego materiału, a obliczanie tej wielkości jako niezależnej od wymiarów próbki gwarantuje obiektywną metodę pomiaru cech materiałowych. Dodatkowo uwzględnia deformację

osiową i o ile naprężenie krytyczne jest wielkością określającą jednostkową wytrzymałość badanego materiału, to moduł sprężystości jest jednostkową wielkością wytrzymałościową uwzględniającą jednostkowe wydłużenie lub skrócenie próbki. Zatem, moduł sprężystości pozwala najdokładniej określić właściwości mechaniczne badanych materiałów, porównać je, lecz nie zawsze umożliwia ustalić mechanizm wywołujący uszkodzenie materiału, który najczęściej powstaje po przekroczeniu zakresu deformacji sprężystej.



Rys. 109. Wielkości modelowe i wartości eksperymentalne charakterystyczne dla deformacji postaciowej złomu rozdzielczego.



Rys. 110. Wielkości modelowe i wartości eksperymentalne charakterystyczne dla deformacji sprężystej złomu rozdzielczego.

Dlatego też, aby poznać mechanizm powstawania uszkodzenia należy często analizować skutki trwałej deformacji takie jak wielkość szczeliny powstałej po uszkodzeniu lub pole powierzchni kontaktu. Model powstawania złomu rozdzielczego dla deformacji postaciowej i sprężystej przedstawiono w rozdziale 4.2, a przebieg charakterystycznych wielkości w funkcji odkształcenia osiowego przedstawiono w niniejszym rozdziale (rys. 109). Wielkości modelowe jak i wartości eksperymentalne przedstawione na rysunkach 109 i 110 podano również w jednostkach bezwymiarowych w stosunku do wielkości średnicy nasienia D_w. Dla liścieni obciążanych przy prędkości 100 mm/min zaobserwowano trwałą deformację postaciową, którą ukazuje średnica pola powierzchni kontaktu d_{Kp} (rys. 109) wyznaczona w oparciu o dokumentację fotograficzną nasion soi, bobiku oraz grochu. Liścienie nasion soi odmian Polan i Nawiko podlegały większej osiowej deformacji postaciowej niż nasion bobiku odmiany Bronto czy grochu odmiany Sześciotygodniowy, a wartości uzyskane dla średnicy pola powierzchni kontaktu d_{Kp} i wielkości szczeliny d_{cod} powstałej podczas złomu rozdzielczego potwierdzają większą plastyczność liścieni nasion soi, na którą wpływa wysoka zawartość tłuszczu. Poprawność założeń modelowych potwierdzają wartości zanotowane zarówno dla większej (rys. 109) jak i mniejszej prędkości deformacji (rys. 110). Uszkodzenie liścienia przy prędkości równej 5 mm/min i charakterystyczny złom rozdzielczy powstawał, dla odkształcenia poniżej wartości 0.03. Liścienie nasion dosuszanych podlegały mniejszej deformacji, świadcząc o wyższych właściwościach kruchych

materiału (liscienia), a wartości pola powierzchni kontaktu jak i wielkości szczeliny nasion grochu odmiany Sześciotygodniowy o wilgotności 0 i 4 % bliskie zeru, potwierdzają możliwość powstawania złomu w zakresie deformacji sprężystej. Wyższe wartości średnicy pola powierzchni kontaktu zanotowano dla nasion soi o wilgotności w zakresie 0÷8 % oraz grochu o wilgotnośći 8 %, podlegające trwałej deformacji postaciowej.

Zaobserwowano, że mechanizm powstawania uszkodzenia liścieni nasion podczas obciążania osiowego prostopadle do płaszczyzny kontaktu związany jest z powstawaniem złomu rozdzielczego powodowanego wzrostem naprężeń rozrywających pomiędzy komórkami w płaszczyźnie przekroju poprzecznego. Potwierdzają to zdjęcia mikroskopii skaningowej wykonane dla nasion odmian soi, na których zaobserwować można uszkodzenie szczelinowe liścienia nie większe niż 50 μm. Powierzchnia szczeliny o mało chropowatej strukturze przedstawiona w powiększeniu 1000 krotnym pozwala zaobserwować nieuszkodzone ściany komórkowe, nadające gładki charakter powierzchni przełomu. Inny charakter powstawania uszkodzeń nasion suszonych potwierdzają szczeliny powstające w kilku miejscach liścienia co świadczy o mniejszej spójności tkanki suszonej w trakcie jej deformacji. Fotografia skaningowa, w powiększeniu 5000 krotnym, pozwala zaobserwować bardziej chropowatą powierzchnię płaszczyzny złomu, ukazując uszkodzenia ścian komórkowych liścieni nasion suszonych i puste przestrzenie po kroplach tłuszczu.

Prowadzona dokumentacja fotograficzna deformacji oraz uszkodzeń liścieni pozwoliła zaobserwować pewne prawidłowości oraz przyczyny ich powstawania. Decydujący wpływ na charakter pęknięć miał kształt obciążanej próbki. Liścienie nasion bobiku o nieregularnym kształcie, mimo szlifowanej podstawy, obciążane z prędkością deformacji 50 mm/min pękały niecentralnie, a uszkodzenia powstawały na granicy niesymetrycznego pola powierzchni kontaktu, ograniczającego obszar spęczenia materiału i zagęszczenia tkanki. Pole powierzchni kontaktu określało wielkość i miejsce zagęszczenia tkanki liścienia. W przypadku bardziej symetrycznego kształtu nasion obserwowano zagęszczenie tkanki w całym przekroju do podstawy, które powodowało typowy złom rozdzielczy liścienia. Centralne zagęszczenie tkanki obciążanych liścieni zaobserwowano dla okrągłych o bardzo regularnym kształcie nasion i było najlepiej widoczne dla nasion grochu odmiany Sześciotygodniowy obciążanych przy prędkości deformacji 20 mm/min. Natomiast dosuszane nasiona, bardziej kruche, ulegały uszkodzeniu przy mniejszej deformacji nie tworząc zagęszczenia tkanki w całym przekroju. Pęknięcia często występowały co 120 stopni rozchodząc się wzdłuż promieni.

Fotograficzna weryfikacja powstawania uszkodzeń pozwoliła zaobserwować występowanie płaszczyzn złomu, zwłaszcza dla próbek o szlifowanej podstawie zapewniających symetryczny rozkład naprężeń podporowych. Oś obciążenia pokrywała się z linią przecięcia płaszczyzn złomu. Dla mniejszych prędkości deformacji zaobserwowano pojedyncze szczeliny rozchodzące się promieniście oraz trzy typy symetrycznych pęknięć, których płaszczyzny złomu przechodziły przez oś obciążeń, a liścienie dzielone były na dwie, trzy lub cztery części, a przy bardzo dużych deformacjach nawet na sześć części.

Uszkodzenie suchych nasion powoduje duża siła przy niewielkiej deformacji i odwrotnie dla nasion wilgotnych rejestrowano dużą deformację powodowaną małą siłą. W efekcie wpływa to na wartość pracy deformacji niszczącej, która swoje maksimum (ok. 500 mJ) osiąga przy wilgotności 12÷14 % dla odmiany Diament, a dla odmiany

Sześciotygodniowy przy wilgotności 18 %. Nasiona roślin strączkowych większości gatunków, podczas omłotu, są najmniej narażone na uszkodzenia mechaniczne w tym zakresie wilgotności. Dla porównania praca uszkodzenia okrywy nasion tych samych odmian w teście połówkowania wynosiła zaledwie 20÷25 mJ, i tu należy się spodziewać głównej przyczyny powstawania uszkodzeń podczas mechanicznej obróbki nasion.

Zastosowanie testu połówkowania miało na celu sprawdzenie mechanizmu powstawania uszkodzeń znanego w praktyce produkcji nasion roślin strączkowych oraz oszacowania liczbowego właściwości mechanicznych nasion poddanych ścinaniu w warunkach odpowiadających mechanizmowi połówkowania. Zaobserwowano, że siła jak też deformacja uszkodzenia jest zdecydowanie mniejsza dla większych prędkości przemieszczeń, zwłaszcza powyżej 200 mm/min, a praca 2 mJ okazała się wystarczająca do spowodowania uszkodzenia okrywy odpowiadającego połówkowaniu nasion, w zakresie prędkości deformacji 400÷1000 mm/min. Wraz ze wzrostem prędkości rośnie energia elementów roboczych, która może zostać przekazana jako praca uszkodzenia, a jedyną metodą przeciwdziałania jest zapewnienie takich warunków, w których nasiona nie będą narażone na odkształcenia przekraczające wartość deformacji sprężystej. Nasiona w trakcie omłotu mogą być nie tylko zgniatane z dużą prędkością, ale mogą być również uderzane elementami roboczymi maszyn oraz po nabraniu prędkości mogą uderzać w inne

Tabela. 4. Dopuszczalna prędkość omłotowa dla nasion roślin strączkowych o zróżnicowanej masie i wytrzymałości okrywy nasiennej na ścinanie.

	Prędkość liniowa V_o [m/s] dla nasion				
	o różnej masie		i	wytrzymałości	
Odmiany	$m_{śr}$	m_{max}	m_{min}	L_{min}	L_{max}
Nadwiślański	13.65	12.49	14.65	11.31	16.68
Bronto	12.80	12.12	13.55	11.26	14.80
Dino	10.09	9.35	11.03	9.12	10.96
Blanka	4.61	4.32	5.06	2.59	6.43
Nida	4.95	4.62	5.19	3.32	6.35
Segal	7.62	6.61	8.22	6.10	8.82
Longina	5.30	4.98	5.99	3.66	6.55
Agat	12.61	12.08	13.46	7.63	15.17
Diament	14.84	14.09	16.40	7.40	20.28
Sześciotyg.	12.57	11.84	13.25	6.43	17.06
Nawiko	20.92	19.22	21.98	6.00	38.74
Polan	25.64	23.77	28.33	4.27	45.50

stałe lub robocze elementy maszyn. W tym przypadku nasienie poruszające się z określoną prędkością o znanej masie posiada energię, która po uderzeniu nasienia w stałą przeszkodę może zostać zamieniona w pracę powodującą uszkodzenie. Powyższe założenie oraz praca wyznaczona w testach ścinania (połówkowania) daje możliwość obliczenia granicznych prędkości dopuszczalnych dla nasion roślin strączkowych, z uwzględnieniem nasion najmniejszych, największych a także nasion, które cechowały się najniższymi wartościami pracy powodującej uszkodzenie okrywy w teście połówkowania (tab. 4).

Przedstawione w tabeli 4 wartości dopuszczalnej prędkości omłotowej, która nie powoduje uszkodzenia świadczą o dużym zróżnicowaniu odporności na połówkowanie nasion poszczególnych gatunków roślin strączkowych. Wartości te wskazują, że nasiona fasoli mogą zostać uszkodzone przy najmniejszej prędkości, co potwierdza znaną wśród praktyków nasiennictwa opinię o ich dużej podatności na połówkowanie. Najwyższe średnie wartości dopuszczalnej prędkości zanotowano dla nasion soi odmian Polan i Nawiko, niezależnie od ich wielkości czyli dla nasion o największej i najmniejszej masie. Wartości te mogą być jednak zawyżone, co związane jest z dużą plastycznością nasion soi (zawartość tłuszczu), dla których większa deformacja liścieni wpływa na wartość pracy deformacji niszczącej, w oparciu o którą wyznaczono graniczne prędkości omłotowe.

Analizując wartości zamieszczone w tabeli 4 i porównując je do prędkości omłotowych (przeliczonych na prędkość liniową) spotykanych w większości młocarni czy kombajnów łatwo zauważyć, że stosowanie tych maszyn może prowadzić do powstawania uszkodzeń powodowanych procesem połówkowania. Większość młocarni cepowych pracuje w zakresie prędkości 28÷32 m/s, zębowych w zakresie 19÷25 m/s, zaś kombajny zbożowe typu Bizon pracują w szerszym zakresie prędkości 14÷34.5 m/s. Wśród przedstawionych tu maszyn tylko kombajny umożliwiają zbiór nasion roślin strączkowych, jednak w przypadku nasion fasoli, grochu a nawet soi należy się liczyć z możliwością powodowania uszkodzeń nasion w procesie ich połówkowania, o czym świadczą najmniejsze wartości pracy L_{min} zanotowane w testach wytrzymałościowych.

Przedstawione dopuszczalne wartości omłotowe, choć wyznaczone w prosty sposób wymagający przeprowadzenia tylko testu połówkowania, umożliwiają ocenę odporności nasion w dynamicznych procesach takich jak omłot za pomocą wyników uzyskanych w testach statycznych, a równocześnie uświadamiają, że stosowanie tradycyjnych maszyn zbożowych podczas zbioru i omłotu nasion roślin strączkowych musi prowadzić do powstawania uszkodzeń mechanicznych. Szkoda tylko, że rodzimy przemysł „uśpiony" sztucznym popytem na kombajny zbożowe nie zdecydował się na produkcję kombajnów specjalistycznych wcześniej, czekając dopiero na przemiany ustrojowe, a nie na wyniki badań naukowych. Oczywiście obecnie produkowane w Polsce kombajny specjalistyczne przeznaczone do zbioru nasion roślin strączkowych mają możliwość stosowania mniejszych prędkości omłotowych. Wiele krajów produkowało znacznie wcześniej kombajny specjalistyczne przeznaczone do pracy nawet na bardzo małych areałach. Firmy specjalizujące się w produkcji kombajnów dostosowanych do badań poletkowych oraz plantacji nasiennych, w swojej ofercie posiadają specjalistyczne kombajny do zbioru zbóż, kukurydzy, roślin oleistych (włączając słonecznik i rzepak), kwiatów i oczywiście nasion roślin strączkowych. Zastosowane w nich regulacje prędkości obrotowej bębna młócącego w zakresie 280÷1888 obr/min, zapewniają zmianę liniowej prędkości w zakresie 5.13÷34.60 m/s, co w większości obejmuje wartości przedstawione w tabeli 4. Tylko niektóre odmiany fasoli posiadają nasiona, które mogą ulec uszkodzeniu w procesie połówkowania. W zaleceniach regulacyjnych, jednej z firm, przy zbiorze nasion grochu proponuje się zastosować prędkość najniższą czyli 5.13 m/s, co wydaje się w pełni zgodne z wartościami dopuszczalnymi uzyskanymi w oparciu o testy połówkowania przeprowadzone na nasionach badanych odmian.

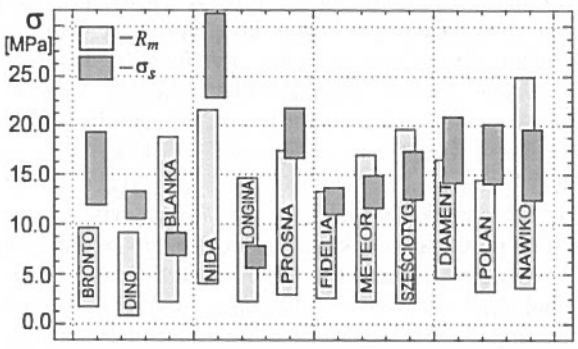
Zróżnicowaną wytrzymałość mechaniczną nasion niektórych odmian potwierdzają też zdjęcia przekroju poprzecznego okrywy nasiennej, przedstawiające różną grubość okrywy oraz ich budowę. Warstwa komórek palisadowych, regularna w swej budowie

warstwa komórek klepsydrowych (podpórkowych) oraz grubość parynchymy gąbczastej okrywy nasion wyróżnia niektóre odmiany, sugerując ich wyższą wytrzymałość mechaniczną. W okrywie nasion niektórych odmian, warstwa ta prawie nie występuje, a jej grubość wynosi zaledwie 14 μm.

Przeprowadzone badania eksperymentalne ściskania całych nasion potwierdziły, że wilgotność stanowi nie tylko najistotniejszy czynnik wpływający na zmianę ich właściwości mechanicznych, ale również wpływa na złożoność mechanizmu uszkodzenia, a także na zmiany objętościowe nasion, które mogą prowadzić do powstawania naprężeń w okrywie. Nasiona roślin strączkowych o wymiarach zbliżonych i kształcie kulistym pęczniały jednorodnie we wszystkich kierunkach pomiaru. Proces ten był prawie całkowicie odwrotny i podczas suszenia nasiona zmniejszały wszystkie wymiary. Największe przyrosty, sięgające prawie 100 %, zaobserwowano dla nasion soi wzdłuż podziału liścieni równoległe do zarodka. Podczas suszenia czyli w procesie odwrotnym zaobserwowano kurczenie się nasion, jednak proces ten nie był całkowicie odwracalny dla wymiaru a, który nie przyjmował poprzednich wartości. Zjawisko to może być jedną z przyczyn powstawania naprężeń w okrywie nasion soi podczas suszenia.

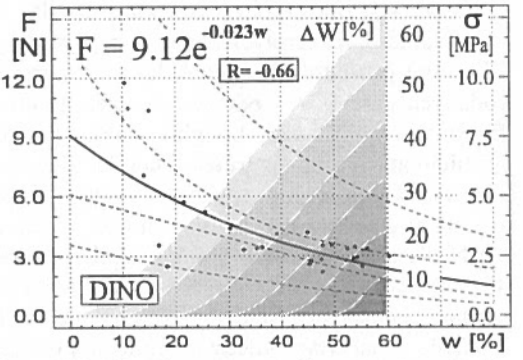
Przebieg krzywych uwidacznia wpływ okrywy na ubytek masy w trakcie suszenia, a dla grochu odmian warzywnych o nasionach pomarszczonych oraz odmian pastewnych okrywa jest w zasadzie główną przeszkodą w wydobywaniu się wody. Zaobserwowany wpływ okrywy nasiennej na przebieg suszenia nasion wskazuje, że nie są możliwe gwałtowne zmiany wilgotności liścieni, a także ich objętości. Równocześnie zaobserwowany skurcz okrywy sięgający u niektórych odmian nawet 30 %, wywołany zmianami wilgotności w trakcie suszenia, powoduje wzrost naprężenia rozciągającego w okrywie nasiennej. Zaobserwowano, że ponowne nawilżanie okrywy powoduje jej wydłużenie, ale równocześnie spadek wytrzymałości na rozciąganie.

Wilgotna okrywa nasienna wszystkich badanych odmian charakteryzowała się niską wytrzymałością na rozciąganie, a wartości modułu sprężystości spadały często poniżej 25 MPa. Wyznaczone wartości modułu sprężystości suchej okrywy większości badanych odmian zawierały się w przedziale od 210÷420 MPa. Najwyższe wartości modułu sprężystości (700 MPa) otrzymano dla barwnej okrywy nasion fasoli odmiany Nida, dla której zanotowano jedną z największych wartości granicy wytrzymałości na rozciąganie R_m (rys. 111). Maksymalne wartości naprężeń rozciągających dla suchej okrywy zawierały się w zakresie 13.5÷25.0 MPa, a dla okrywy nasiennej o dużej zawartości wody zawierały się w zakresie 1.0÷4.8 MPa. Odnotowane wartości granicy wytrzymałości na rozciąganie R_m były często mniejsze od wartości naprężeń skurczu σ_s rejestrowanych podczas suszenia okrywy, zwłaszcza dla niskich poziomów wilgotności.



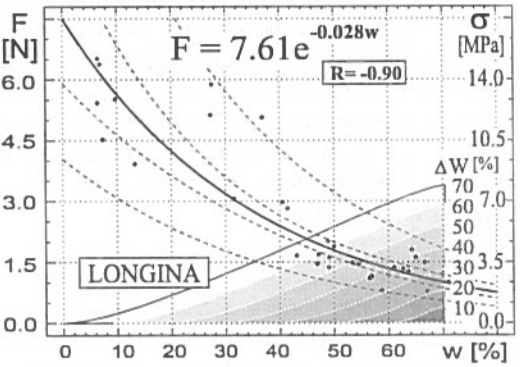
Rys. 111. Wartości wytrzymałości na rozciąganie R_m oraz naprężenia skurczu σ_s okrywy nasion roślin strączkowych.

Naprężenia powstające w okrywie podczas suszenia ogrzanym powietrzem, zależnie od temperatury i prędkości czynnika suszącego, osiągały wartości 5.5÷31.4 MPa. Suszenie zimnym powietrzem powodowało również wzrost naprężeń rozciągających w okrywie wszystkich badanych odmian i gatunków nasion roślin strączkowych, osiągając dla większości z nich zaledwie 5÷8 MPa. Przyglądając się wartościom naprężeń skurczu σ_s (rys. 111) można przypuszczać, że w większości przypadków podczas suszenia okrywa nasienna powinna ulec uszkodzeniu, ale tylko wzrost naprężeń w okrywie nasion grochu odmiany Meteor o nasionach pomarszczonych, odmiany pastewnej Fidelia oraz bobiku odmiany Dino powyżej granicy wytrzymałości na rozciąganie był powodem powstawania uszkodzeń. Pamiętajmy jednak, że naprężenia te uzyskano w warunkach ekstremalnych; to jest dla maksymalnego ujemnego gradientu wilgotności oraz przy stałej długości okrywy odpowiadającej objętości napęczniałych nasion. W rzeczywistych warunkach, podczas suszenia nie jest możliwe całkowite wysuszenie przylegającej do liścieni okrywy przy równoczesnym braku zmian wilgotności liścieni. Znając maksymalne naprężenia skurczu dla okrywy nasion danej odmiany można określić przybliżone granice naprężeń maksymalnych skurczu dla poszczególnych gradientów.



Rys. 112. Siła F, wytrzymałość na rozciąganie R_m oraz naprężenia skurczu σ_s okrywy nasion bobiku odmiany Dino dla gradientów wilgotności.

Na rysunku 112 przedstawiono przebieg siły niszczącej okrywę nasion bobiku odmiany Dino w funkcji wilgotności, dla której wyznaczono (znając grubość okrywy) granicę wytrzymłości na rozciąganie R_m. Na przykładzie tej odmiany zaobserwować można, że wytrzymałość okrywy w zakresie wilgotności 10÷20 % znacznie przewyższa naprężenia skurczu, powstające podczas suszenia. Jednak okrywa o wilgotności 20÷40 % może posiadać niższą granicę wytrzymłości na rozciąganie R_m niż wartości naprężeń skurczu σ_s dla gradientów wilgotności sięgających powyżej 20 %. Ujemne gradienty wilgotności okrywy nasion bobiku tej odmiany poniżej 10 % wywołują również naprężenia skurczu, ale mniejsze od granicy wytrzymłości na rozciąganie R_m; zachowując warunek bezpieczeństwa podczas suszenia. Granica wytrzymłości na rozciąganie R_m okrywy nasion fasoli odmiany Longina (rys. 113) o wilgotności mniejszej niż 40 % jest znacznie wyższa od maksymalnych naprężeń skurczu, jednak jej wytrzymałość mechaniczna przy wyższej wilgotności może prowadzić



Rys. 113. Siła F, wytrzymałość na rozciąganie R_m oraz naprężenia skurczu σ_s okrywy nasion fasoli odmiany Longina dla gradientów wilgotności.

do uszkodzeń wywołanych wzrostem naprężeń skurczu. Dla gradientu wilgotności mniejszego od 20 % naprężenia skurczu schnącej okrywy przyjmą wartości mniejsze od naprężeń niszczących σ_u a zarazem od granicy wytrzymałości R_m. Tym sposobem, dla różnych zakresów wyjściowej wilgotności można wyznaczyć przedziały dopuszczalnych gradientów wilgotności, których nie można przekroczyć podczas suszenia, a dla których spełniona jest zależność $\sigma_s<\sigma_u$ i warunek (46).

Najbardziej drastyczne spośród stosowanych w badaniach warunki suszenia (62^0 C, 15.4 m/s) powodowały jednak tak duży wzrost naprężeń w okrywie nasion wszystkich badanych gatunków i odmian, że szczególnie narażone na uszkodzenie okrywy nasiona fasoli odmian Blanka, Longina i Prosna oraz soi odmiany Nawiko oprócz wcześniej wymienionych odmian grochu i bobiku ulegały rozerwaniu podczas wyznaczania naprężeń skurczu. Ochłodzenie czynnika suszącego powodowało dodatkowy wzrost naprężeń, sięgający u niektórych odmian nawet 7 MPa. Najwyższy przyrost wartości siły skurczu 4.8 N dla okrywy nasion bobiku odmiany Bronto spowodowany spadkiem temperatury o 40^0 C, wywołał wzrost naprężenia o 6.7 MPa co stanowiło aż 35.8 %. Jednak u niektórych odmian, jak na przykład dla okrywy nasion bobiku odmiany Dino, wzrost naprężeń o 2.0 MPa stanowiąc zaledwie 15.8 % prowadził do jej uszkodzenia, uniemożliwiając rejestrację pełnego zakresu jego przyrostu.

Zanotowanie większych wartości maksymalnych naprężeń skurczu od granicy wytrzymałości na rozciąganie dla wszystkich badanych nasion bobiku odmian Bronto i Dino oraz fasoli odmiany Nida, świadczy o przekroczeniu granicy wytrzymałości na rozciąganie i jest to jak dotąd pierwszy potwierdzony eksperymentalnie dowód wskazujący na możliwość powstawania pęknięć okrywy w trakcie suszenia. Podczas suszenia okrywy nasion innych odmian, w wielu przypadkach również notowano wyższe wartości naprężenia skurczu niż granicy wytrzymałości na rozciąganie. W tej sytuacji spełnieniona nierówność (46) określa możliwość wystąpienia naprężeń niszczących podczas suszenia, co stanowi jednak tylko warunek konieczny, ale nie wystarczający do rozerwania okrywy otaczającej suszone nasienie. Okrywa nasienna ulegnie uszkodzeniu dopiero w przypadku, gdy spełniona zostanie nierówność (50) określająca warunek, który uwzględnia proporcje dostępu czynnika suszącego. Nierówność tą można przedstawić w postaci uproszczonej umożliwiającej wyznaczenie warunku wystarczającego do uszkodzenia okrywy:

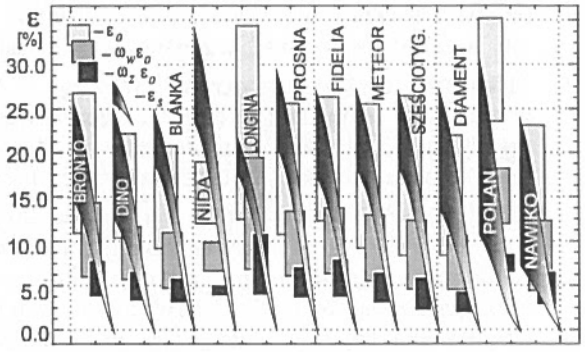
$$\varepsilon_s > \omega\, \varepsilon_o. \tag{51}$$

Stosunek długości obwodu części rozciąganej do części okrywy suszonej; podlegającej skurczowi określa współczynnik ω. Dostęp czynnika suszącego do nasion położonych wewnątrz warstwy jest utrudniony i należy przyjąć wartość współczynnika w zakresie 0.4÷0.5. Natomiast dla nasion leżących na warstwie powietrze dociera do ponad 3/4 obwodu nasienia i współczynnik ten przyjmie wartości w przedziale 0.2÷0.25.

Znając wcześniej wyznaczone wartości naprężeń skurczu σ_s oraz zakresy, w których przekroczą one granicę wytrzymałości na rozciąganie R_m, co stanowiło warunek konieczny powstawania uszkodzeń okrywy podczas suszenia, należało już tylko sprawdzić w jakim zakresie odkształcenia skurczu ε_s powodowane tymi zmian wilgotności spełniać będą nierówność (51), czyli warunek konieczny i wystarczający.

Największy skurcz okrywy (33.7 %) zanotowano wzdłuż najdłuższego wymiaru a dla nasion fasoli odmiany Nida suszonej powietrzem o temperaturze $52 \div 62^0$ C. Suszenie zimnym powietrzem powodowało znacznie mniejszy skurcz, który dla okrywy nasion większości odmian fasoli często nie przekraczał (20÷24 %), a dla odmian grochu 18÷20 %. Niejednorodny skurcz w różnych kierunkach, osiągając 30.2 % dla odmiany Polan i 23.0 % dla odmiany Nawiko wzdłuż najdłuższego wymiaru a oraz odpowiednio w kierunku poprzecznym 18.5 % i 14.3 %, wpływał na największe zróżnicowanie maksymalnych wartości skurczu okrywy nasion soi dla ekstremalnych warunków suszenia stosowanych w badaniach (rys. 114). Dla większości odmian badanych gatunków skurcz okrywy nasion sięgający 20 % zaobserwowano już po 5÷10 s, a maksymalne wartości zanotowane podczas suszenia pozwalały przypuszczać, że wilgotne nasiona o większej objętości będą ściskane kurczącą się okrywą prowadząc do naprężeń rozciągających w okrywie nasiennej, aż do jej rozerwania.

Przedstawione na rysunku 114 zakresy odkształceń skurczu ε_s powodowane suszeniem wskazują, że dla maksymalnych ujemnych gradientów wilgotności (60÷70 %), skurcz okrywy nasion większości odmian przyjmuje podobne wartości do wartości wydłużenia podczas jej rozrywania, a dla nasion fasoli odmiany Nida wartości skurczu są nawet znacznie większe. Uwzględniając położenie nasion w warstwie oraz stosunek określający proporcje okrywy suszonej, podlegającej skurczowi i wydłużeniu, przedstawione zakresy odkształceń rozciągających (rys. 114) określają strony nierówności (51). Łatwo zaobserwować, że odkształcenie skurczu ε_s wszystkich badanych odmian (lewa strona nierówności) jest wielokrotnie większe od zakresów odkształceń rozciągających $\omega_z \varepsilon_o$ dla nasion położonych na warstwie (prawa strona nierówności), co jednak dotyczy odkształceń skurczu dla maksymalnych gradientów wilgotności. Spadek wilgotności o 10 % nie powinien jednak wywołać skurczu okrywy większego od granicznego odkształcenia dla nasion położonych na warstwie, a o 20 % dla nasion znajdujących się wewnątrz warstwy dla większości badanych odmian.



Rys. 114. Odkształcenie skurczu ε_s okrywy nasion roślin strączkowych oraz graniczne wydłużenie ε_o podczas jej rozciągania.

Reasumując, naprężenie skurczu okrywy uzależnione jest od parametrów czynnika suszącego, a skurcz jest tym większy im wyższa jest temperatura i prędkość przepływu czynnika. Dla ekstremalnych warunków okrywa nasion wilgotnych o dużej objętości, zbyt gwałtownie suszona zawsze będzie podlegać skurczowi, a dodatkowy wzrost naprężeń spowodowany wyłączeniem elementów grzejnych w suszarniach i dalszym przepływem zimnego czynnika może być główną przyczyną powstawania uszkodzeń okrywy, zwłaszcza nasion położonych na warstwie. Chcąc więc zachować podczas suszenia nasion warunki, w których skurcz okrywy nie wywoła naprężeń niszczących należy zadbać, aby ujemne gradienty wilgotności okrywy nasiennej nie przekraczały 10 %.

8. WNIOSKI

Przeprowadzone badania eksperymentalne umożliwiły zweryfikowanie rozważań modelowych dotyczących deformacji nasion oraz skurczu okrywy, a w wielu przypadkach pozwoliły wyjaśnić przyczyny powstawania uszkodzeń, do których dochodzi często podczas zbioru, omłotu i suszenia nasion roślin strączkowych.

1. Nasiona roślin strączkowych w zależności od poziomu wilgotności podlegają całkowicie odrębnym mechanizmom uszkodzeń. Przekroczenie zakresu odkształceń sprężystych jest przyczyną uszkodzeń nasion o wilgotności poniżej 10 % i w zależności od położenia nasienia w stosunku do kierunku deformacji, obciążenie powoduje złom rozdzielczy liścieni lub ścinanie okrywy nasiennej w procesie połówkowania nasion. Natomiast mechanizm uszkodzenia nasion o wyższej wilgotności związany jest z przekroczeniem granicy wytrzymałości na rozciąganie okrywy nasiennej i powodowany jest uślizgiem liścieni lub deformacją postaciową. Oba te przypadki wymuszają zmianę kształtu nasion i rozciąganie okrywy.
2. Mechanizm uszkodzenia okrywy związany ze zmianą kształtu nasion, umożliwia wyznaczenie jej modułu sprężystości oraz zakres deformacji postaciowej dla granicy wytrzymałości okrywy na rozciąganie, a zastosowane metody pozwalają analizować ten mechanizm w zakresie dużych deformacji nasion o wilgotności powyżej 12 %.
3. Uślizg liścieni nasion o wilgotności powyżej 20 % jest główną przyczyną pojawiania się wyraźnych pęknięć okrywy. Uszkodzenia okrywy nasiennej prowadzą często do całkowitego jej pozbawienia u nasion roślin strączkowych, a mechanizm powstawania uszkodzeń związany jest z przyrostem odkształcenia obwodowego prowadzącym do powstawania naprężeń rozciągających w okrywie nasiennej. Mechanizm ten jest również, przyczyną pogorszenia jakości grochu zbieranego jako konserwowy; potocznie zwanego „zielonym groszkiem".
4. Mechanizm powstawania złomu rozdzielczego liścieni podczas obciążenia osiowego dotyczy nasion o wilgotności poniżej 10 % i związany jest z zagęszczeniem tkanki oraz spęczeniem materiału w centralnej części liścienia. Decydujący wpływ na charakter pęknięć ma kształt nasion, a·pole powierzchni kontaktu oraz granice zagęszczenia tkanki liścienia określają usytuowanie płaszczyzn złomu i liczbę powstałych szczelin.
5. Siła powodująca złom rozdzielczy i uszkodzenie liścieni nasion bobiku i fasoli (400÷650 N), nasion grochu (250÷450 N) oraz nasion soi (120÷250 N) różnicowała poszczególne gatunki i odmiany, jednak wyznaczone w zakresie deformacji sprężystej zbliżone wartości modułu sprężystości (często nieistotne statystycznie różnice) wykazały podobne właściwości mechaniczne liścieni nasion badanych odmian roślin strączkowych.
6. Makro- mikroskopowa weryfikacja fotograficzna uszkodzeń pozwoliła zaobserwować występowanie złomu rozdzielczego oraz symetryczne ułożenie szczelin, których linia przecięcia pokrywała się z osią obciążenia. Natomiast, liczne mniej regularne szczeliny świadczą o właściwościach kruchych tkanki liścieni nasion suszonych, które ulegają uszkodzeniu przy mniejszej deformacji, a zniszczone ściany komórkowe ukazują bardziej chropowatą powierzchnię płaszczyzny złomu.

7. Poddanie ścinaniu nasion roślin strączkowych pozwoliło oszacować odporność na uszkodzenia podczas omłotu oraz wyjaśnić mechanizm powstawania uszkodzeń odpowiadający procesowi połówkowania nasion; znany w praktyce produkcji nasiennej. Równocześnie niewielkie wartości pracy niszczącej nasiona w tym procesie świadczą o możliwości powstawania uszkodzeń okrywy nasiennej powodowanej ścinaniem.
8. Dopuszczalne wartości prędkości, które nie powodują uszkodzenia, choć wyznaczone w prosty sposób wymagający przeprowadzenia tylko statycznego testu połówkowania, umożliwiają ocenę odporności nasion w dynamicznych procesach takich jak omłot, a porównane do prędkości omłotowych spotykanych w większości młocarni czy kombajnów pozwalają zauważyć, że stosowanie tradycyjnych maszyn zbożowych podczas zbioru i omłotu nasion roślin strączkowych musi prowadzić do powstawania uszkodzeń mechanicznych. Nasiona fasoli zostają uszkodzone przy najmniejszej prędkości, co potwierdza znaną w praktyce opinię o ich dużej podatności na połówkowanie.
9. Skurcz okrywy podczas suszenia nasion wywołuje naprężenia rozciągające, które prowadzą często do jej rozerwania, stanowiąc jeden z mechanizmów uszkodzenia okrywy nasiennej podczas suszenia nasion. Zanotowanie wartości maksymalnych naprężeń skurczu σ_s większych od granicy wytrzymałości na rozciąganie R_m okrywy nasion większości badanych odmian potwierdza jedną z badanych hipotez o możliwości wystąpienia naprężeń niszczących w nieobciążonych nasionach.
10. Suszenie nasion prowadzi do skurczu okrywy i powstawania naprężeń rozciągających, jednak zachowanie warunku bezpieczeństwa podczas suszenia powinno uwzględniać graniczny ujemny gradient wilgotności, który w zależności od położenia nasion nie może przekraczać 10 % dla nasion leżących na warstwie oraz 20 % dla nasion znajdujących się wewnątrz warstwy. Dalszy spadek wilgotności może wywołać skurcz okrywy większy od granicznego odkształcenia rozciągającego, co przy równoczesnym spełnieniu warunku $\sigma_s > R_m$ spowoduje uszkodzenie okrywy.
11. Dodatkowy wzrost naprężeń o 20÷40 % spowodowany wyłączeniem elementów grzejnych w suszarniach przy dalszym przepływie zimnego czynnika może być główną przyczyną powstawania uszkodzeń okrywy nasion roślin strączkowych; zwłaszcza położonych na warstwie.
12. Analiza przyczyn powstawania uszkodzeń nasion pozwala opracować zalecenia produkcyjne technologii zbioru i obróbki pozbiorczej dla wielu gatunków roślin strączkowych. Zalecenia te mogą ograniczyć występowanie uszkodzeń nasion i ich okrywy. Poznanie mechanizmów powstawania uszkodzeń okrywy podczas suszenia nasion pozwoli na wyeliminowanie warunków suszenia, które są często stosowane, a które prowadzą do zniszczenia okrywy.

9. LITERATURA

1. Anazodo U.G.N., Chikwendu S.C.: Poisson's ratio and elastic modulus of radially compressed biomaterials - I: Small deformation approximation. Transaction 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. Transaction of the ASAE, 14, 78-84, 1971.
3. Bieganowski F.: Niektóre właściwości fizyczne fasoli szparagowej. Letnia Szkoła Mechanizatorów, AR, Lublin, 1980.
4. Bilanski W.K.: Mechanical properties of soyabeans. Physical Properties of Agricultural Materials and Products. Hemisphere Publ. Co., 363-368, 1988.
5. Biłowicka E.: Niektóre cechy fizyczne nasion strączkowych zależne od ich wilgotności. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 147, 47-58, 1974.
6. Bobrecka-Jamro D.: Podstawy rejonizacji roślin strączkowych w rejonie Polski Południowo-wschodniej. Rozpr. hab., Zesz. Nauk. AR, Kraków, 1989.
7. Bormuth C.D.: Rheological and physiological properties of pea seeds (Pisum Sativum L.) of different moisture contents being stressed under quasi-static load. Int. Agrophysics, 8, 185-190, 1994.
8. Bourne M.C.: Physical properties and structure of horticultural crops. Physical Properties of Foods, eds., 1983.
9. Chikwendu S.C., Anazodo U.G.N.: Poisson's ratio and elastic modulus of radially compressed biomaterials -II: Large deformation approximation. Transaction of the ASAE, 1563-1572, 1984.
10. Clark R.L., Fox W.R., Welch G.B.: Representation of mechanical properties of nonlinear viscoelastic materials by constituive equation. Transaction of the ASAE, 14, 3,511-515, 1971.
11. Clevenger J.T., Hamann D.D.: The behaviour of apple skin under tensile loading. Transaction of the ASAE, 11, 1, 34-47, 1968.
12. Clowes F.A.L., B.E. Juniper B.E.: Plant Cells. Oxford, Blackwell Scientific Publ, 1968.
13. Colson K.H., Young J.H.: Two component thin-layer drying model for unshelling peantus. Transaction of the ASAE, 33, 1, 241-246, 1990.
14. Croker W., Thorton N. S., Schroeder E.M.: Internal pressure necessary to break shells of nuts and role of the shells in delayed germination. Contrib. Boyce Thompson Inst., 14, 173-201,1946.
15. Davison E., Meiering A.G., Middendorf F.J.: A theoretical stress model of rapeseed. Canad. Agric. Eng., 45-46, 1979.
16. Davison E., Meiering A.G., Middendorf F.J.: Die Festigkeit der Samenschale von Rapskornern bei mechanischer Drückbelastung. Grundl. Landtechnik, 181-184, 1980.
17. Davison E., Middendorf F.J., Bilanski W.K.: Mechanical properties of rapeseed. Canad. Agric. Eng., 50-54, 1975.
18. Dobrzański B.: Wpływ wilgotności nasion grochu na ich właściwości mechaniczne. Biul. IHAR, 153, 75-78, 1984.

19. Dobrzański B., Pawłowski Z.: Polowy miernik odkształcenia względnego. Szkoła Letnia: Fizyczne Właściwości Materiałów Roślinnych, streszczenie doniesień, Kazimierz Dolny, 8, 1984.
20. Dobrzański B., Pawłowski Z.: Metoda wibracyjna badania gęstości usypnej nasion. Zesz. Prob. Post. Nauk Rol., 320, 63-70, 1987.
21. Dobrzański B., Pawłowski Z.: Kaseta do nastawiania nasion na kiełkowanie. Urząd Patentowy PRL, Wzór użytkowy, W-42406, 1987.
22. Dobrzański B., Pawłowski Z.: Physical properties of seed layer in vibratory method for the determination of bulk density. Physical Properties of Agricultural Materials and Products, Hemisphere Publ. Co., 401-405, 1988.
23. Dobrzański B.: Model of spherical seed cover during compression. Proceedings of the 4-ICPP of Agricultural Materials, Rostock, Niemcy, 139-143, 1989.
24. Dobrzański B., Szot B.: Strenght of pea seeds during compression. Proceedings of the 4-ICPP of Agricultural Materials, Rostock, Niemcy, 144-148, 1989.
25. Dobrzański B.: Metodyczne aspekty oceny mechanicznych właściwości nasion grochu. (Praca doktorska), Instytut Agrofizyki PAN, Lublin, 1-103, 1990.
26. Dobrzański B., Pawłowski Z.: Urządzenie do pomiaru odkształcenia względnego przy badaniach wytrzymałości pojedynczych nasion. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Patent, 152317, 1991.
27. Dobrzański B.: Method of the direct measurement of strain meter of the mechanical resistance. Problemy Agrofizyki, 65, 16, 60-64, 1991.
28. Dobrzański B.: Method of preparation of seed for germination and set of cassettes serving this purpose. Problemy Agrofizyki, 65, 14, 51-54, 1991.
29. Dobrzański B. and Stępniewski A.: Modulus of elasticity of rapeseed shell. Proceedings of 8-GCIRC Rapeseed Congress, Saskatoon, Canada, v.4, 1256-1260, 1991.
30. Dobrzański B.: Theoretical model of large deformation of compressed rapeseed. Proceedings of 8-GCIRC Rapeseed Congress, Saskatoon, Canada, v.4, 1261-1266, 1991.
31. Dobrzański B., Szot B.: Mechanical properties of pea seed. Agricultural Engineering and Roural Development, A Pergamon-CNPIEC Joint Venture, Beijing, China, II, D, 12-16, 1992.
32. Dobrzański B., Szot B., Stępniewski A.: Stress in the shell during large deformation of compressed rapeseed. Agricultural Engineering and Roural Development, A Pergamon-CNPIEC Joint Venture, Beijing, China, II, D, 17-21, 1992.
33. Dobrzański B., Pawłowski Z.: Urządzenie do badania gęstości usypanej materiałów sypkich. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, 50803, 1993.
34. Dobrzański B.: Germination capacity of compressed pea seed. Zesz. Prob. Post. Nauk Rol., 399, 31-34, 1993.
35. Dobrzański B.: Geometrical dependences of seed shell of compressed pea. Int. Agrophysics, 7, 259-264, 1993.
36. Dobrzański B, Horabik J., Molenda M.: Vibratory method for bulk density estimation of granular materials. Powder handling & processing, 6, 1, 67-70, 1994.
37. Dobrzański B.: Wpływ wilgotności na powstawanie naprężeń w okrywie nasion grochu. IIIV Sympozjum Suszarnictwa, Warszawa, I, 90-95, 1994.

38. Dobrzański B, Horabik J.: Strain as a factor of mechanical strenght of pea seed. XII ICAE, AgEng'94, Milano, 2, 905-906, Report N. 94-G-071, 1-8, 1994.
39. Dobrzański B., Rybczyński R.: The cassette for germination test of legumineous seeds - Work time in laboratory procedure. XXVI International Congress in Work Science, Lillehammer, I, 1-4, 1995.
40. Dobrzański B., Dobrzańska A.: Wartość żywieniowa nasion roślin strączkowych. Mat. Ogóln. Konf. Nauk. "Nauka Praktyce Ogrodniczej", Lublin, II, 649-652, 1995.
41. Dobrzański B., Szot B.: Metody oceny właściwości mechanicznych nasion grochu. Mat. Ogóln. Konf. Nauk. "Nauka Praktyce Ogrodniczej", Lublin, II, 641-644, 1995.
42. Dobrzański B., Rybczyński R.: Mechanical properties of legumineous seeds. Agric. & Biol. Eng. Conf., Newcastle, 4.4, 1-2, 1995.
43. Dobrzański B., Rybczyński R.: Niektóre właściwości fizyczne nasion roślin strączkowych. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 425, 43-48, 1996.
44. Dobrzański B., Rybczyński R.: The effect of moisture content on the mechanical properties of soybean. Abstracts of Second International Fulfat Soya Conference, Budapest, Hungary. 1996.
45. 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.
46. Dobrzański, jr B., Rybczyński R.: Ocena właściwości fizycznych nasion soi z Polskiego Rejestru Odmian. Ogóln. Konf. Nauk. Strączkowe Rośliny Białkowe, II SOJA, Lublin, 39-44, 1996.
47. Dobrzański, jr B.: Obraz struktury tkankowej obciążanych mechanicznie nasion soi. Ogóln. Konf. Nauk. Strącz. Rośliny Białkowe, II. SOJA, Lublin, 154-159, 1996.
48. Dobrzański, jr B., Szot B.: Strength of pea seed cover. Int. Agrophysics, 11, 4, 301-306, 1997.
49. Dobrzański, jr B.: Elasticity strain limit for legumineous seeds. Book of Abstracts of 6th ICA, v1, 29-32, 1997.
50. Dobrzański,jr B.: Mechanizmy powstawania uszkodzeń nasion roślin strączkowych. Sprawozdanie merytoryczne z Grantu KBN, Nr 5 S306 010 06, 1-46, A1-68, 1997.
51. Dorell D.G., Adams M.W.: Effect of some seed characteristic on mechanically included seedcoat damage in navy beans. Agron. J., 61, 5, 672-673, 1969.
52. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z.: Wytrzymałość materiałów. WNT, 1996.
53. Fornal J., Kaczyńska B., Gryzowska A.: Physical properties of faba bean seeds and their significance in particural technological operations. 10th Int. Congress CHISA, Prague, 1990.
54. Fornal J., Sadowska J., Kaczyńska B.: Damage of faba bean seeds during drying. Drying Technol. 11, 6, 1293-1309, 1993.
55. Fornal J., Sadowska J., Jaroch R., Kaczyńska B., Winnicki T.: Effect of drying of rapeseeds on their mechanical properties and technological usability. Int. Agrophysics, 8, 215-224, 1994.
56. Frontczak J., Bogdanowicz J.: The studies on corn resistance to the compression strenght, strain and cork necessery to damage the husk of a kernel. Physical Properties of Agricultural Materials and Products, Hemisphere Publ. Co., 429-434, 1988.
57. Gao Q., Pitt R.E., Ruina A.: A mechanics model of the compression of cells with finite initial contact area. Biorheology, 27, 225-240, 1990.

58. Gao Q., Pitt R.E.: Mechanics of parenchyma tissue based on cell orientation and microstructure. Transaction of the ASAE, 34, 1, 232-238, 1991.
59. Gates R.S., Pitt R.E., Ruina A., Cooke J.R.: Cell wall elastic constitutive laws and stress-strain behavior of plant vegetative tissue. Biorheology, 23, 453-466, 1986.
60. Gieroba J., Dreszer K.: The influence of geometry of the working elements of the paddle conveyor on grain damage. Int. Agrophysics, 8, 225-230, 1994.
61. Grochowicz J., Nadulski R.: The mechanical properties of some leguminons plant seeds. Physical Properties of Agricultural Materials and products. Hemisphere Publ. Co., 453-456, 1988.
62. Grochowicz J., Nadulski R., Bilanski W.K.: Influence of some mechanical properties of seed on energy requirement for their comminution. Int. Agrophysics, 8, 231-234, 1994.
63. Grochowicz J., Nadulski R., Bilanski W.K.: Testing of leguminous seed coat microhardness. Int. Agrophysics, 8, 235-237, 1994.
64. Grundas S., Horabik J., Woźniak W., Kocoń J.: Niektóre skutki zmian strukturalnych w uszkodzonych ziarnach pszenicy. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 258, 449-470, 1983.
65. Grzesiuk S., Kulka K.: Fizjologia i biochemia nasion. PWRiL, 1981.
66. Grzesiuk S., Górecki R.: Fizjologia plonów. Wydawnictwo ART, Olsztyn, 1994.
67. Gustafson R.J., Mase G.E., Seegerlind L.: Continuum theory for gas-solid-liquid media - I. Theory development. Transaction of ASAE, 1186-1189, 1977.
68. Gustafson R., Segerlind L.J.: Continuum theory for gas-solid-liquid media - II. Modeling by use of finite element method. Transaction of the ASAE, 1190-1200, 1977.
69. Hall G.E.: Test-weight changes of shelled corn during drying. Transaction of the ASAE, 320-323, 1972.
70. Haman D.Z., Burgess G.J.: Theoretical development for measuring the elastic properties of spherical cuticular membranes. Transaction of the ASAE, 29, 1470-1476, 1986.
71. Haman J.: Rheological properties of cereals and their theoretical interpretation. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 203, 107-121, 1976.
72. Haman J., Dobrzański B., Szot B., Stępniewski A.: Strength of shell in compression test of rapeseed. Int. Agrophysics, 8, 2, 245-250, 1994.
73. Heit K.: The Queensland Navy Bean Growers Handbook. Kingaroy, Queensland, Australia: The Navy Bean Marketing Board., 1983.
74. Henderson S.M.: Progress in developing the thin-layer drying equation. Transaction of ASAE, 17, 6, 1167-1168, 1172, 1974.
75. Henderson S.M., Pabis S.: Grain drying theory IV: The effect of airflow rate on the drying index. J. Agric. Engng. Res., 7, 85-89, 1962.
76. Herum F.L., Mensah J.K., Barre H.J., Majidzadech K.: Viscoelastic behavior of soybeans due to temperature and moisture content. Transaction of the ASAE, 1219-1224, 1979.
77. Hoki M., Pickett L.K.: Factors affecting mechanical damage of navy beans. Trans. Transaction of the ASAE, 16, 6, 1154-1157, 1973.
78. Horabik J., Molenda M.: Force and contact area of wheat grain in friction. J. Agric. Engng Res., 41, 33-42, 1988.

79. Horabik J., Molenda M.: Przyrost ciśnienia wywołany pochłanianiem wilgoci przez ziarno. I Zjazd Naukowy PTA Lublin, 53-55, 1997.
80. Hoser A., Dobrzycki J.: Rheological and srtuctural characteristics of green peas. Żywienie Człowieka i Metabolizm, 10 (4), 237-282, 1985.
81. Hutchinson D., Otten L.: Thin-layer air drying of soybeans and white beans. Journal of Food Technology, 18, 507-522, 1983.
82. Jasińska Z., Kotecki A.: Rośliny strączkowe. PWN, Warszawa, 1993.
83. Kamiński E., Szarycz M., Janowicz L.: Wpływ zmiany wymiarów cząstek w trakcie ich suszenia na kinetykę wysychania krajanki z jabłek. IIIV Sympozjum Suszarnictwa, Warszawa, II, 41-51, 1994.
84. Kim N.K., Hung Y.C.: Microscopic measurement of apple bruise. Food Structure., 7, 1-14, 1990.
85. Kiryluk J.: Wpływ warunków przygotowania nasion grochu i bobiku na skuteczność i energochłonność procesu ich rozdrabniania. Rocz. AR, Poznań, 16, CCXVIII, 1990.
86. Konstankiewicz K., Król A., Stoczkowska B.: Microscopic methods for the investigations of plant tissue. Book of Abstracts of 6th ICA, v2, 29-32, 1997.
87. Koper R.: Próby wykorzystania metody interferometrii holograficznej do wyznaczania modułu sprężystości podłużnej ziarna pszenicy. Rocz. Nauk Rol. C-74, 3, 39-46, 1980.
88. Koper R., Grundas S.: Moduł Younga i absorbcja barwnika w ziarnie pszenicy o zróżnicowanej zawartości białka. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 320, 151-157, 1987.
89. Kośmicki Z., Grabański P., Pawlicki T.: O potrzebie identyfikacji właściwości fizykomechanicznych materiałów roślinnych determinujących dynamiczne oddziaływanie zespołów roboczych. IV Symp. im. Cz. Kanafojskiego nt. Problemy budowy oraz eksploatacji maszyn i urządzeń rolniczych. PW, IMiUR, Płock, 1988.
90. Kutzbach H.-D., Szot B., Stępniewski A., Dobrzański B.: Some mechanical properties of rapeseed v. Ceres. 6. Tagung Agrophysik Physik und Landwirschaft, Bad Honnef, Germany, 23, 1992.
91. Lamb D.T., Hurburgh C.R. Jr.: Moisture determination in single soyabean seeds by near-infrared transmitance. Transaction of the ASAE, 34, 5, 2123-2128, 1991.
92. Lardner J., Pujara P.: Compression of spherical cells. Mechanics Today., 5, 161-176, 1980.
93. Laskowski J., Skonecki S., Gowin J.: Układ pomiarowy do maszyn wytrzymałościowych typu ZD z komputerową rejestracją i analizą parametrów procesu ściskania. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 424, 279-284, 1995.
94. Laskowski J., Skonecki S.: The influence of moisture on the physical properties and parameters of the compression process of legumes' seeds. Int. Agrophysics, 11, 4, 245-254, 1997.
95. Lin M., Haghighi K., Stroshine R.L.: Viscoelastic characterisation of the soyabean seedcoat. Transaction of the ASAE, 32, 3, 946-952, 1989.
96. Ling Ch.Y., Whitney L.: Analysis of spherical shell acted on by two concentric forces in opposite directions. Theory, determination and control of physical properties of food materials, D, Reidel Publ Co., 189-196, 1975.
97. Lityński M.: Biologiczne podstawy nasiennictwa. PWN, 1977.

98. Liu M., Haghighi K., Stroshine R.L. Viscoelastic characterization of the soybean seedcoat. Transaction of the ASAE, 32, 3, 946-952, 1989.
99. Liu M., Haghighi K., Stroshine R.L., Ting E.C. Mechanical properties of the soybean cotyledon and failure strength of soybean kernels. Transaction of the ASAE, 33, 2, 559-566, 1990.
100. Mac Donald, Jr. M.B.: Physical seed quality of soybean. Seed Sci. Technol., 13, 601-628, 1985.
101. Mensah J.K., Nelson G.L., Herum F.L., Richard T.G.: Mechanical properties related to soybean seedcoat cracking during drying. Transaction of the ASAE, 27, 2, 550-560, 1984.
102. Mieszkalski L.: Sposoby usuwania łupiny z nasion bobiku. V Symp. im. prof. Cz. Kanafojskiego nt. Problemy budowy oraz eksploatacji maszyn i urządzeń rolniczych. PW IMiUR, Płock, 1991.
103. Mieszkalski L.: Określenie formuły opisującej objętość nasion bobiku. Acta Acad. Agricult., Tech. Olst., Aedif. Mech., 23, 1992.
104. Mieszkalski L.: Wpływ wilgotności na zmianę cech geometrycznych nasion bobiku oraz zmienność tych cech w obrębie odmiany. Acta Acad. Agricult. Tech. Olst., Mech., 22, 1991.
105. Mieszkalski L., Fornal Ł,: Metoda zmiany wilgotności nasion bobiku na użytek badań. Acta Acad. Agricult. Tech. Olst., Aedif. Mech., 23, 1992.
106. Mieszkalski L.: Wpływ obciążeń mechanicznych na uszkodzenia nasion bobiku. Acta Acad. Agricult. Tech. Olst., Aedif. Mech., 23, 1992.
107. Misra M.K., Brooker D.B.: Thin-layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. Transaction of the ASAE, 23, 5, 1254-1260, 1980.
108. Misra R., Young J.H.: A model for predicting the effect of moisture content on the modulus of elasticity of soybeans. Transaction of the ASAE, 24, 5, 1338-1341, 1981.
109. Misra R., Young J.H., Haman D.D.: Finite element procedures for estimating shrinkage stresses during soybean drying. Transaction of the ASAE, 24, 3, 751-753, 1981.
110. Mohsenin N.N.: Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishers, 1979.
111. Narayan C.V., Stout B.A.: Mechanical checking of navy beans. Transaction of the ASAE, 15, 1, 191-194, 1972.
112. Nelson S.O., Lawrence K.C.: Sensing moisture content in dates by RF impedance measurements. Transaction of the ASAE, 35, 2, 591-596, 1992.
113. Otten L., Brown R., Reid W.S.: Drying of white beans-effect of temperature and relative humidity on seed coat damage. Canadian Agricultural Engineering, 26, 101-104, 1984.
114. Overhults D.G., White H.E., Hamilton H.E., Ross I.J.: Drying soybeans with heated air. Transaction of the ASAE, 16, 1, 112-113, 1973.
115. Pabis S., Henderson S.M.: Grain drying theory II: A critical analysis of the the drying curve for shelled maize. J. Agric. Engng. Res., 7, 1961.
116. Pabis S.: Procesy suszenia warzyw - Stan wiedzy i problemy poznawcze. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 424, 39-44, 1995.

117. Paulsen M.R.: Facture resistance of soybeans to compressive loading. Transaction of the ASAE, 1210-1216, 1978.
118. 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.
119. Palusen M.R., Nave W.R., Mounts T.L., Gray L.E.: Storability of harvest-damaged soybeans. Transaction of the ASAE, 24, 6, 1583-1589, 1981.
120. Peleg K.: A mathematical model of produce damage mechanism. Transaction of the ASAE, 287-293, 1984.
121. Perry J.S., Hall C.W.: Evaluating and reducing mechanical-handling damage to pea beans. Transaction of the ASAE, 9, 696-701, 1966.
122. Pickett L.K.: Mechanical damage and processing loss during navy bean harvesting. Transaction of the ASAE, 16, 6, 1047-1050, 1973.
123. Pietkiewicz T., Wierzbicki K.: Wymiary geometryczne i współczynnik sferyczności nasion rzepaku. II Krajowa Konf. Nauk. nt. Problemy techniki rolnej i leśnej. SGGW, Warszawa, 1989.
124. Preston R.D.: Microscopic structures of plant cell walls. Handbuch der Planzenphysiologie, 1, 722-730, 1955.
125. Radajewski W., Gaydon D.: The effect of drying conditions on damage to navy beans. Proceedings of Agricultural Engineering Conference, Toowoomba, Australia, 372-375, 1990.
126. Radajewski W., Jensen T., Abawi G.Y., McGahan E.J.: Drying rate and damage to navy beans. Transaction of the ASAE, 35, 2, 583-590, 1992.
127. Rao V.N., Haman D.D., Hammerle J.R.: Stress analysis of visco-elastic sphere subjected to temperature and moisture gradients. J. Agric. Engng. Res., 283-293, 1975.
128. Rataj V.: Poisson's constant determination of selected legumes and oil seeds. Int. Agrophysics, 8, 295-298, 1994.
129. Rataj V., Jech J., Ponican J.: The technological properties of pea seeds. Int. Agrophysics, 8, 299-303, 1994.
130. Sadowska J., Fornal J., Kaczyńska B., Jacórzyński B.: Changes in microstructure and physical properties of green peas during ripening. Int. Agrophysics, 8, 311-317, 1994
131. Sefa-Dedeh S., Stanley D.W.: The relationship of microstructure of cowpeas to water absorption and dehulling properties. Cereal Chem.,56, 4, 379-386, 1979.
132. Sherif S.M., Segerlind L.J., Frame J.S.: An equation for the modulus of elasticity of a radially compressed cylinder. Transaction of the ASAE, 1976, 782-785, 1994.
133. Singh B., Linvill D.E.: Determining the effect of pod and grain moisture content on threshing loss and damage of navy beans. Transaction of the ASAE, 20, 2, 226-231, 1977.
134. Smith J.A., Biere D.A.: Direct combining harvest loss of dry edible beans. ASAE, Paper No. 85-1065, 1985.
135. Sosnowski.: Quality analysis of bean threshing with peg threshing unit. Int. Agrophysics, 8, 327-332, 1994.
136. Sosnowski., Puchalski C.: Effect of loading type on quality of bean. AgEng' 96, Madrid, paper: 96F-016, 1-7, 1996.

137. Stępniewski A., Dobrzański B.: Higher temperature of rapeseeds as a factor affecting their mechanical resistance. Proceedings of 8-GCIRC Rapeseed Congress, Saskatoon, Canada, v.4, 1246-1250, 1991.
138. Stępniewski A., Szot B., Dobrzański B.: Effect of temperature on Young's modulus of rapeseed. Agricultural Engineering and Roural Development, Beijing, China, I, III, 197-199, 1992.
139. Swanson B.G., Hughes J.E., Rasmussen H.P.: Seed coat microstructure: Review of water imbibition in legumes. Food Microstructure. 4, 1985.
140. Szot B., Dobrzański B., Stępniewski A.: Changes of strain and stress of pea coat during drying. Proceedings of the 4ICPP Agricultural Materials, Rostock, Niemcy, 824-828, 1989.
141. Ślipek Z., Kolowca J.: Methods of estimating the grain resistance to mechanical damage. Physical Properties of Agricultural Materials and Products, Hemisphere Publ. Co., 571-576, 1988.
142. Szyrmer J, Bros L.: Postęp w krajowej hodowli soi. Ogóln. Konf. Nauk. Strącz. Rośliny Białkowe, II. SOJA, Lublin, 7-23, 1996.
143. Volsy P.W., Lyall L.H.: Methods of determining the strenght of tomato skins in relation to fruit cracing. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., A5, 597-609, 1986.
144. Walczak J.: Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności. PWN, 1978.
145. Whitaker T., Marre H.J., Hamdy W.Y.: Theoretical and experimental studies of diffusion in spherical bodies with a variable diffusion coefficient. Transaction of the ASAE, 12, 5, 668-672, 1969.
146. White G.M., Bridges T.C., Loewer O.J., Ross I.J.: Seed coat damage in thin-layer drying of soyabeans. Transaction of the ASAE, 23, 2, 224-227, 1980.
147. White G.M., Ross I.J., Poneleit C.G.: Stress crack development in popcorn as influenced by drying and rehydration processes. Transaction of the ASAE, 25, 3, 768-772, 1982.
148. Woyke H., Dobrzański B.: Wpływ obciążeń statycznych na wigor nasion grochu. Fizyczne Właściwości Materiałów Roślinnych, Słonne, 8, 1985.
149. Woyke H., Gabryl J.: Warzywa strączkowe. PWRiL, Warszawa, 1987.
150. Zgorzelewicz, J., R. Glaser, Wpływ wilgotności na wybrane właściwości fizyczne materiałów ziarnistych. Zesz. Nauk. AR, Wrocław, 165, Rolnictwo XLVII, 1987.

THE CRACKING MECHANISMS OF THE LEGUME SEEDS

Summary

The seed quality is greatly affected by methods of harvesting and handling. In these operations, seeds are subjected repeatedly to many impacts on metal surfaces and against other seeds. The mechanical properties at different moisture content of cotyledon and seedcoat are needed and should be clearly understood before determining cracking mechanism. However, in the study of stress cracking, there is additional need, specially in the legume seed industry, to find the optimum combination of drying parameters which will minimize seedcoat damage. The major problem in the drying of legume seeds with heated air is the splitting of the seedcoat affected by the temperature and moisture.

In this study, the change of shape as well as the characteristic geometrical values of seed and seedcoat at various moisture contents, during seed swelling and drying were determined. More distinctly effects of moisture content on seed dimensions were observed in the initial phase of swelling. Further seed's filling, leads to the seedcoat tensioning till its disruption. A preliminary study was conducted to establish the time required for strain of seedcoat after being dried to final moisture content. The second series of drying tests was conducted to evaluate the effect of drying parameters on the stress and strain development of the seedcoat. The resistance of seedcoat to tension was studied for all seeds at wide range of moisture. The shrinkage of the seedcoat during drying achieved value more than 26 % for all seeds. The air temperature seems to be the most influential factor affecting the shrinkage and split of seedcoat.

Resuming, the measuring of geometrical changes of seed and seedcoat during swelling and drying shoved that decrease of moisture content involves shrinkage and leads to its stress. The results obtained in all experiments concerning with strength of seedcoat proved that frequently the stress was higher than strength of seedcoat. Probably, it is one of the most important reason of the seedcoat cracking during drying. The rapid decrease of air temperature during drying and the values of shrinkage stress higher than strength of the seedcoat is the most important reason of the seedcoat cracking during drying. The additional shrinkage of seedcoat, clarifies the origin of the cracking after disconnection of the heating set in dryers, observed in practice. On the other hand, the seed strain (under 30 %) leads shape deformation without stress in the coat. However, for large deformation of non-elastic wet seeds mechanical strength is mainly connected with the resistance of seedcoat to tension.

Keywords: legume seeds, seedcoat, cracking, drying, deformation, strain, stress