

MODEL SKURCZU OKRYWY ORAZ ANALIZA NAPRĘŻEŃ PODCZAS SUSZENIA NASION ROŚLIN STRĄCZKOWYCH

B. Dobrzański, jr

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

bdob@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie. Celem badań było opracowanie i zastosowanie modelu opisującego mechanizm uszkodzenia okrywy podczas suszenia nasion, a także określenie wpływu suszenia na skurcz okrywy oraz powstawanie naprężeń. Badania wpływu różnych warunków suszenia na powstawanie uszkodzeń okrywy przeprowadzono na nasionach odmian bobiku (*Vicia faba* L.), soi (*Glicine hispida* Max.), fasoli (*Phasoleus* L.) i grochu (*Pisum sativum* L.). Zależność odkształcenia (skurczu) w funkcji czasu, dla różnych parametrów czynnika suszącego, rejestrowano za pomocą ekstensometru 2630-107 firmy Instron. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że naprężenia skurczu σ_s okrywy są często większe od jej wytrzymałości na rozciąganie R_m . Za przyczynę powstawania uszkodzeń okrywy nasion podczas suszenia w warstwie można uznać zróżnicowanie skurczu i naprężeń jej fragmentów znajdujących się w kontakcie z innymi nasionami, co ogranicza dopływ powietrza różnicując również naprężenia rozciągające w okrywie. Prawdopodobnie jest to jedna z najważniejszych przyczyn powstawania uszkodzeń okrywy podczas suszenia nasion roślin strączkowych.

Słowa kluczowe: Nasiona roślin strączkowych, model, okrywa, skurcz, naprężenie.

SPIS OZNACZEŃ

D_z - średnica zewnętrzna nasion z okrywą	[mm]
D_s - średnica suchej okrywy nasion o zarysie kulistym	[mm]
D_w - średnica wilgotnej okrywy nasion o zarysie kulistym	[mm]
g - grubość okrywy nasiennej	[mm]
l_o - długość początkowa rozciąganej okrywy	[mm]

ε_o - odkształcenie obwodowe okrywy - wydłużenie	[-]
l_s - długość początkowa okrywy podlegająca skurczowi	[mm]
ε_s - odkształcenie skurczu okrywy	[-]
d_K - wycinek koła strefy kontaktu	[mm]
ω - współczynnik strefy kontaktu nasion suszonych w warstwie	[-]
V_{Ks} - kulista objętość wewnętrzna okrywy suchej	[mm ³]
V_{Kw} - kulista objętość wewnętrzna okrywy wilgotnej	[mm ³]
R_m - granica wytrzymałości na rozciąganie	[MPa]
k_r - naprężenie dopuszczalne na rozciąganie	[MPa]
σ_u - naprężenie niszczące	[MPa]
σ_s - naprężenie skurczu suszonej okrywy	[MPa]
σ_o - naprężenie obwodowe okrywy	[MPa]
p_w - ciśnienie wewnętrzne	[MPa]
E_o - moduł sprężystości okrywy (test rozciągania okrywy)	[MPa]
E_{oS} - moduł sprężystości okrywy suchej	[MPa]
E_{oW} - moduł sprężystości okrywy wilgotnej	[MPa]
T_{IV} - parametry czynnika suszącego (temperatura, prędkość)	[°C,m/s]

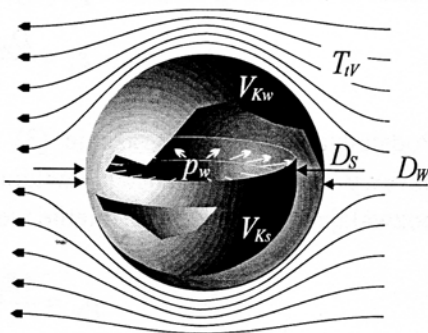
WSTĘP

Badania ściskania całych nasion wykazy, że wilgotność stanowi nie tylko najistotniejszy czynnik wpływający na zmianę ich właściwości mechanicznych, ale również wpływa na złożoność mechanizmu uszkodzenia [2, 4, 7, 8, 13], a także na zmiany objętościowe nasion, mogące prowadzić do powstawania naprężeń w okrywie [1-8, 11, 13, 16]. Znane są przypadki, gdy nieprawidłowe warunki suszenia powodują powstawanie uszkodzeń okrywy nasion roślin strączkowych [7-9, 12, 14-20, 22, 23]. Prowadzone wcześniej badania [5-9] 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 [5-9]. Gdy proces ten zachodzi powoli (np.: naturalne wysychanie), okrywa i liścienie kurczą się jednocześnie i nie jest możliwe powstanie naprężeń w okrywie.

Celem badań było opracowanie modelu nasienia otoczonego okrywą, która podczas suszenia nasion w warstwie ulega skurczowi oraz sprawdzenie czy skurcz wywołujący naprężenia w okrywie może spowodować jej rozerwanie i stanowi jeden z głównych mechanizmów powstawania uszkodzeń nasion roślin strączkowych.

MODEL SKURCZU OKRYWY PODCZAS SUSZENIA NASION

Na Rys. 1 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



Rys. 1. Skurcz okrywy nasiennej w strumieniu ogrzanego powietrza.

Fig. 1. The seed coat shrinkage at hot air.

których wilgotne nasienie posiada objętość V_{Kw} , oraz okrywa kurcząc się dąży do objętości V_{Ks} , powodują wzrost ciśnienia wewnętrznego p_w nieściśliwych liścieni; wypełnionych w dużym stopniu wodą. Prowadzi to 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 cienkościenne kuliste zbiorniki. W technice rozważany jest często przykład cienkościennego kulistego zbiornika 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 [21], dla którego naprężenia główne σ_s w obu prostopadłych kierunkach są równe, dlatego w dowolnym przekroju kołowym warunek bezpieczeństwa określa nierówność:

$$\sigma_s = \frac{D_z p_w}{4g} \leq k_r. \quad (1)$$

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 (1) otrzymujemy wyrażenie określające ciśnienie wewnętrzne p_w wywołane skurczem okrywy:

$$p_w = \frac{4E_o \varepsilon_s g}{D_z}. \quad (2)$$

Odształcenie skurczu okrywy ε_s można określić znając jej wymiary dla średnicy nasienia wilgotnego D_w oraz po jego wysuszeniu D_s :

$$\varepsilon_s = \frac{D_w - D_s}{D_w}. \quad (3)$$

Podstawiając za ε_s wyrażenie (3) oraz przyjmując, że w trakcie wysychania okrywy liścienie pozostają wilgotne; czyli $D_z = D_w$, otrzymujemy zależność pozwalającą wyznaczyć ciśnienie wewnętrzne p_w :

$$p_w = \frac{4E_o g (D_w - D_s)}{D_w^2}. \quad (4)$$

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 [20], które narażone są na działanie ciśnienia gazów (np.: kotły parowe lub butle gazowe). Rozważając zagadnienia wytrzymałościowe, znajdujących szerokie zastosowanie w technice kotłów parowych wykazano, że naprężenia obwodowe są dwukrotnie większe od prostopadłych do nich naprężeń wzdłuż tworzących powierzchni walcowej [20]. 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 :

$$\sigma_o = \frac{p_w (0.5D_w^2 + D_w g + g^2)}{D_w g + g^2}. \quad (5)$$

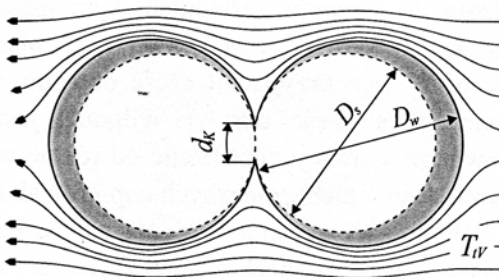
Suszenie nasion fasoli powinno spełniać warunek bezpieczeństwa dla naprężeń obwodowych σ_o w przekroju części walcowej nasienia:

$$\sigma_o \leq k_r. \quad (6)$$

Warunek ten zależy 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. Warunek ten dotyczy pojedynczych nasion w strumieniu powietrza, których okrywa na całej powierzchni wysychałaby jednorodnie.

W rzeczywistych warunkach podczas suszenia sąsiednie nasiona są w stałym kontakcie, do którego powietrze ma utrudniony dostęp.

Rysunek 2 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. 2. Skurcz okrywy nasion w strumieniu ogrzanego powietrza.

Fig. 2. The seed coat shrinkage at hot air stream.

$$\varepsilon_s = \frac{\pi(D_W - D_S)}{\pi D_W - d_K}. \quad (7)$$

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

$$\sigma_s = E_{oS} \varepsilon_s. \quad (8)$$

W tym samym czasie skurcz suszonej okrywy powoduje rozciąganie wilgotnej okrywy o module sprężystości 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:

$$\sigma_u = E_{oW} \varepsilon_o. \quad (9)$$

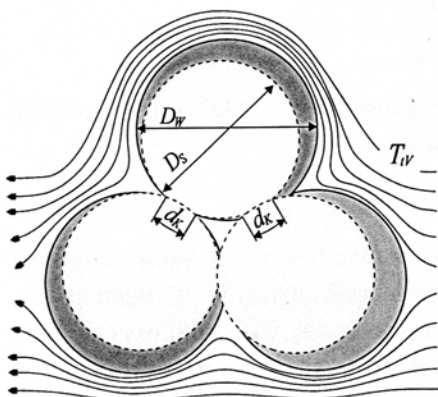
Podczas suszenia nasion okrywa nasienna nie będzie ulegać uszkodzeniu gdy spełniony zostanie warunek:

$$\sigma_u > \sigma_s, \quad (10)$$

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 różnic 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 znajdują się w tej samej płaszczyźnie (Rys. 3). Położenie nasion w warstwie wierzchniej, a właściwie na warstwie, stwarza praktycznie najbardziej ekstremalne warunki skurczu okrywy w trakcie ich suszenia.



Rys. 3. Strefy kontaktu nasion warstwy powierzchniowej.

Fig. 3. The contact area at seed on the layer.

Nierówność (10) 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 znajdują 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 dużego spadku wilgotności, wywołanego 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 (11) fragmentu okrywy podlegającego wysychaniu:

$$\Delta l_s = \pi D_w - 2d_K - (\pi D_s - 2d_K) \quad (11)$$

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:

$$2d_K \varepsilon_o < \pi(D_w - D_s) \quad (12)$$

lub

$$2d_K \varepsilon_o < (\pi D_w - 2d_K) \varepsilon_s \quad (13)$$

Przekształcając powyższą nierówność (13) 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 $2d_K$:

$$\varepsilon_s > \frac{2d_K \varepsilon_o}{\pi D_w - 2d_K} \quad (14)$$

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

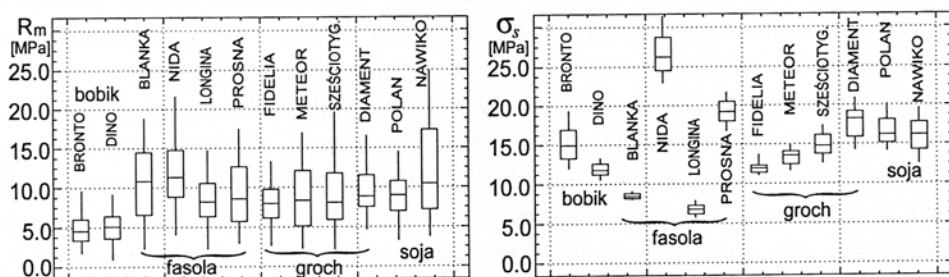
Skurcz okrywy ε_s można łatwo określić znając jej wymiary dla średnicy nasion wilgotnych D_w oraz po ich wysuszeniu D_s . Suszenie nasion powinno spełniać warunek bezpieczeństwa dla naprężeń obwodowych. Warunek ten zależny jest od wielkości naprężeń skurczu okrywy nasiennej σ_s w trakcie suszenia, od odkształcenia skurczu ε_s oraz modułu sprężystości suchej okrywy E_o . Wyznaczając eksperymentalnie odkształcenie niszczące ε_o wilgotnej okrywy oraz jej moduł sprężystości E_o , można określić niszczące naprężenia rozciągające $\sigma_u = E_o \varepsilon_o$. Podczas suszenia nasion okrywa nasienna nie będzie ulegać uszkodzeniu gdy spełniony zostanie warunek: $\sigma_u > \sigma_s$, 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.

MATERIAŁ I METODY EKSPERYMENTALNE

Badania wpływu różnych warunków suszenia na powstawanie naprężeń oraz skurczu okrywy przeprowadzono na otrzymanych ze Stacji Hodowli Roślin Ogrodniczych nasionach dwóch odmian bobiku (*Vicia faba* L.) i soi (*Glicine hispida* Max.) oraz czterech odmian fasoli (*Phasoleus* L.) i grochu (*Pisum sativum* L.). Zależność odkształcenia (skurczu) w funkcji czasu, dla różnych parametrów czynnika suszącego, rejestrowano za pomocą ekstensometru 2630-107 firmy Instron. Naprężenia skurczu podczas suszenia rejestrowano w teście izometrycznym za pomocą maszyny wytrzymałościowej Instron model 6022. Szczegółowy opis metod pomiarów oraz uzyskane wyniki eksperymentalne przedstawiono w tym samym tomie [10], natomiast w niniejszej pracy przeprowadzono analizę na podstawie uzyskanych zakresów naprężeń skurczu okrywy σ_s , skurczu czyli negatywnego odkształcenia ε_s oraz naprężeń krytycznych R_m dla okrywy nasion kilku odmian wybranych gatunków.

ANALIZA NAPRĘŻEŃ ORAZ SKURCZU OKRYWY

Zmienności wartości krytycznych naprężeń rozciągających R_m (górna granica „skrzynki z wąsami”) w przypadku suchej okrywy zawiera się w zakresie 13,5÷25,0 MPa, a dla okrywy nasiennej o dużej zawartości wody dolna granica zawarta jest w zakresie 1,0÷4,8 MPa (Rys. 4). Rozpiętość kwartyli zarówno dolnych jak i górnych wartości krytycznych naprężeń rozciągających R_m okrywy nasion badanych odmian, świadczy o znacznym wpływie wilgotności na badaną cechę. Wyjątek stanowi wytrzymałość okrywy nasion obu odmian bobiku, dla



Rys. 4. Wytrzymałość na rozciąganie R_m oraz naprężenia skurczu σ_s okrywy nasion roślin strączkowych.

Fig. 4. The tension strength and R_m and shrinkage stress σ_s of the seed coat of grain legume.

których zaobserwowano najmniejszą rozpiętość „skrzynki z wąsami” oraz kwartyli dolnych i górnych. 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. 4).

Niewielka odległość pomiędzy kwartylem górnym i dolnym wartości naprężeń σ_s , wywołanych skurczem, świadczy o powtarzalnych cechach wytrzymałościowych okrywy nasion każdej z odmian, a różnice pomiędzy nimi świadczą o zróżnicowanym wpływie suszenia na skurcz i naprężenia wywołane u poszczególnych odmian. Naprężenia powstające w okrywie podczas suszenia ogrzany powietrzem, zależnie od temperatury i prędkości czynnika suszącego, osiągały wartości od 5,5 do 31,4 MPa. Suszenie zimnym powietrzem wywoływało również skurcz oraz wzrost naprężeń rozciągających w okrywie wszystkich badanych odmian i gatunków nasion roślin strączkowych, jednak wartości osiągały zaledwie 5÷8 MPa. Najbardziej drastyczne spośród stosowanych w badaniach warunki suszenia (62°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, soi odmiany Nawiko, nasion grochu o nasionach pomarszczonych odmiany Meteor, odmiany pastewnej Fidelia oraz bobiku odmiany Dino ulegały często rozerwaniu podczas wyznaczania naprężeń skurczu. Ochłodzenie czynnika suszącego w trakcie suszenia ogrzany powietrzem powodowało dodatkowy wzrost naprężeń, sięgający u niektórych odmian nawet 7 MPa.

Analizując wartości naprężeń skurczu σ_s (Rys. 4) można przypuszczać, że w większości przypadków podczas suszenia okrywa nasienna powinna ulec uszkodzeniu, ale tylko w niektórych przypadkach wzrost naprężeń w okrywie powyżej granicy wytrzymałości na rozciąganie był powodem powstawania uszkodzeń. Zanotowanie większych wartości naprężeń skurczu od granicy wytrzymałości na rozciąganie dla badanych nasion bobiku odmian Bronto i Dino oraz fasoli odmiany Nida, świadczy o przekroczeniu granicy wytrzymałości na rozciąganie, będąc potwierdzonym eksperymentalnie dowodem wskazującym na możliwość powstawania uszkodzeń okrywy w trakcie suszenia. Podczas suszenia okrywy nasion innych odmian, w wielu przypadkach również notowano wyższe wartości naprężenia skurczu niż granicy wytrzymałości na rozciąganie.

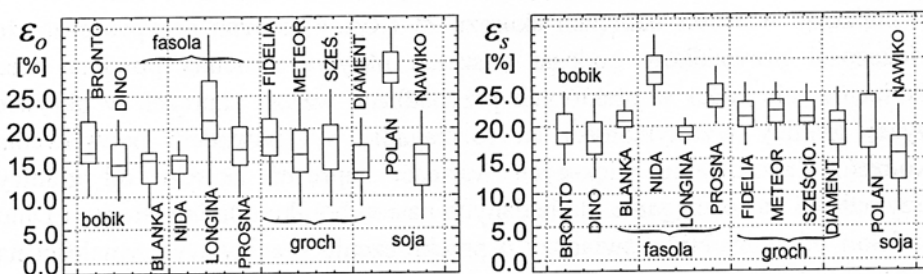
Należy jednak zauważyć, że naprężenia te uzyskano w warunkach ekstremalnych, to jest dla maksymalnej utraty wilgotności oraz przy stałej długości okrywy odpowiadającej objętości napęczniałych nasion. W rzeczywistych warunkach, podczas suszenia nie jest możliwe całkowite wysuszenie przylegającej do

liścieni okrywy przy równoczesnym braku zmian wilgotności liścieni. W tej sytuacji spełniona nierówność (10) 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 (14) określająca warunek, który uwzględnia proporcje dostępu czynnika suszącego. Nierówność tą można przedstawić w postaci uproszczonej umożliwiającej wyznaczenie warunku wystarczającego do uszkodzenia okrywy:

$$\varepsilon_s > \omega \varepsilon_o. \quad (15)$$

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 $0,4 \div 0,5$. Natomiast dla nasion leżących na warstwie powietrze dociera do ponad $3/4$ obwodu nasienia i współczynnik ten przyjmie wartości w przedziale $0,2 \div 0,25$.

Wyznaczone wartości naprężeń skurczu σ_s oraz zakresy, w których przekroczą one granicę wytrzymałości na rozciąganie R_m , stanowią warunek konieczny powstawania uszkodzeń okrywy podczas suszenia. Jednak należy sprawdzić w jakim zakresie odkształcenia skurczu ε_s powodowane tymi zmian wilgotności spełniać będą nierówność (15), czyli warunek konieczny i wystarczający.



Rys. 5. Skurcz ε_s oraz wydłużenie ε_o podczas rozciągania okrywy nasion roślin strączkowych.

Fig. 5. The shrinkage ε_s and elongation ε_o at tension of the seed coat of grain legume.

Skurcz ε_s okrywy nasiennej badanych odmian w większości przypadków zawierał się w zakresie od 15 do 25 %, o czym świadczą wartości kwartyli górnych i dolnych. Najwyższe zróżnicowanie skurczu okrywy zanotowano dla nasion soi odmiany Polan, której skurcz wzdłuż największego wymiaru sięgał 30 % (górna

granica „skrzynki z wąsami”), a wzdłuż najmniejszego nie przekraczał 10 % (dolna granica „skrzynki z wąsami”). Największy skurcz okrywy (33,7 % - górna granica „skrzynki z wąsami”) zanotowano wzdłuż najdłuższego wymiaru dla nasion fasoli odmiany Nida suszonej powietrzem o temperaturze $52 \div 62^{\circ}\text{C}$. Suszenie zimnym powietrzem powodowało znacznie mniejszy skurcz, który dla okrywy nasion większości odmian fasoli często nie przekraczał ($20 \div 24$ %), a dla odmian grochu $18 \div 20$ %. Niejednorodny skurcz w różnych kierunkach, osiągając 30,2 % dla odmiany Polan i 23,0 % dla odmiany Nawiko wzdłuż najdłuższego wymiaru 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. Dla większości odmian badanych gatunków skurcz okrywy nasion sięgający 20 % zaobserwowano już po $5 \div 10$ 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 5 zakresy odkształceń skurczu ε_s powodowane suszeniem wskazują, że dla największych spadków wilgotności ($60 \div 70$ %), skurcz okrywy nasion większości odmian przyjmuje wartości podobne do wartości wydłużenia ε_0 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 określają strony nierówności (15). Łatwo zaobserwować, że odkształcenie skurczu ε_s wszystkich badanych odmian (lewa strona nierówności) jest wielokrotnie większe od zakresów odkształceń rozciągających $\omega \varepsilon_0$ dla nasion położonych na warstwie (prawa strona nierówności), co jednak dotyczy odkształceń skurczu dla maksymalnych spadków wilgotności. Spadek wilgotności o 10 % nie powinien wywołać skurczu okrywy większego od granicznego wydłużenia fragmentu okrywy dla nasion położonych na warstwie, a o 20 % dla nasion znajdujących się wewnątrz warstwy.

Suszone fragmenty okrywy o niższej wilgotności charakteryzują się wyższą wytrzymałością na rozciąganie; często nawet wielokrotnie, stąd można oczekiwać, że dla dużego spadku wilgotności, wywołanego suszeniem i w tym przypadku, naprężenia skurczu σ_s zawsze osiągną wartości większe, niż niszczące naprężenia rozciągające wilgotnej okrywy σ_w . Przyglądając się wartościom naprężeń skurczu σ_s można przypuszczać, że w większości przypadków podczas suszenia okrywa nasienna powinna ulec uszkodzeniu. W szczególności położenie

nasion na warstwie stwarza najbardziej ekstremalne warunki suszenia, gdy są odsłonięte największe fragmenty okrywy podlegające skurczowi. Powoduje to powstawanie naprężeń rozciągających w strefie kontaktu nasion fragmentów okrywy o wyższej wilgotności, a zarazem o mniejszej wytrzymałości.

WNIOSKI

1. Skurcz okrywy podczas suszenia nasion prowadzi do pojawienia się naprężeń rozciągających, stanowiąc jeden z mechanizmów uszkodzeń, a wartości naprężeń skurczu σ_s są często większe od granicy wytrzymałości na rozciąganie R_m okrywy nasion większości badanych odmian potwierdzają hipotezę o wystąpieniu naprężeń niszczących w nieobciążonych nasionach.
2. 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. 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.
3. Określenie właściwości mechanicznych okrywy oraz prawidłowych parametrów suszenia może prowadzić do ograniczenia uszkodzeń nasion w trakcie ich suszenia; stanowiąc aspekt praktyczny prowadzonych badań.
4. Znając maksymalne wartości naprężeń skurczu dla okrywy nasion danej odmiany można określić przybliżone granice naprężeń maksymalnych skurczu dla poszczególnych zakresów spadku wilgotności. Chcąc zachować podczas suszenia nasion warunki, w których skurcz okrywy nie wywoła naprężeń niszczących należy zadbać, aby spadek wilgotności nasion nie przekraczał 10 %.

PIŚMIENNICTWO

1. Davison E., Meiering A.G., Middendorf F.J.: A theoretical stress model of rapeseed. Canad. Agric. Eng., 45-46, 1979.
2. Dobrzański, jr. B.: Metodyczne aspekty oceny mechanicznych właściwości nasion grochu. Instytut Agrofizyki PAN, 1-103, 1990.
3. Dobrzański, jr. B.: Theoretical model of large deformation of compressed rapeseed. Proceedings of 8th GCIRC, Saskatoon, Canada, P1-076, 1261-1266, 1991.

4. **Dobrzański, jr. B.:** Geometrical dependences of seed shell of compressed pea. *Int. Agrophysics*, 7(4):259-264, 1993.
5. **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.
6. **Dobrzański, jr B., Szot B.:** Strength of pea seed cover. *Int. Agrophysics*, 11, 4, 301-306, 1997.
7. **Dobrzański, jr. B.:** Mechanizmy powstawania uszkodzeń nasion roślin strączkowych. *Acta Agrophysica*, 13, 1-96, 1998.
8. **Dobrzański, jr. B.:** The cracking mechanisms of the legume seeds. CD-ROM of *AgEng'2000* papers, Paper: 00-PH-050, 1-10, Warwick, 2, 2000., p.111-112.
9. **Dobrzański, jr. B., Rybczyński R.:** Znaczenie okrywy nasiennej w procesie suszenia nasion roślin strączkowych. *Acta Agrophysica*, 46, 23-30, 2001.
10. **Dobrzański, jr. B., Rybczyński R.:** Metody eksperymentalne badania właściwości mechanicznych okryw nasiennych. *Acta Agrophysica*, 57, 2001. (w tym samym tomie)
11. **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.
12. **Fornal J., Sadowska J., Kaczyńska B.:** Damage of faba bean seeds during drying. *Drying Technol.* 11, 6, 1293-1309, 1993.
13. **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.
14. **Liu M., Haghighi K., Stroshine R.L.:** Viscoelastic characterization of the soybean seedcoat. *Trans. ASAE* 32(3): 946-952, 1989.
15. **Mensah J.K., Nelson G.L., Herum F.L., Richard T.G.:** Mechanical properties related to soybean seedcoat cracking during drying. *Trans. ASAE*, 27(2):550-560, 1984.
16. **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.
17. **Misra R., Young J.H., Haman D.D.:** Finite element procedures for estimating shrinkage stresses during soybean drying. *Trans. ASAE* 24(3):751-753, 1981.
18. **Otten L., Brown R., Reid W.S.:** Drying of white beans-effect of temperature and relative humidity on seed coat damage. *Canad. Agric. Eng.*, 26, 101-104, 1984.
19. **Pabis S., Henderson S.M.:** Grain drying theory II: A critical analysis of the drying curve for shelled maize. *J. Agric. Engng. Res.*, 7, 1961.
20. **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.
21. **Walczak J.:** Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności. PWN, 1978.

22. **White G.M., Bridges T.C., Loewer O.J., Ross I.J.:** Seed coat damage in thin-layer drying of soybeans. Trans. ASAE 23(1):224-227, 1980.
23. **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.

THE ANALYSIS OF STRESS AND SHRINKAGE OF THE SEED COAT AT GRAIN LEGUME DRYING

B. Dobrzański, jr.

B. Dobrzański Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences

Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

bdob@demeter.ipan.lublin.pl

Summary. The major problem in the drying of grain legume with heated air is the splitting of the seed coat. Temperature and moisture gradients can cause stresses in the seed coat during drying. In view of these problems, there is need, specially in the legume seed industry, to find the optimum combination of drying parameters which will minimise seed coat cracking. The objectives of this study were to apply and verify a model describing some geometrical relations for cracking mechanism at drying, and to estimate the effect of drying on the stress and strain development of the seed coat. Fababean (*Vicia faba* L.), soybean (*Glicine hispida* Max.), bean (*Phasoleus* L.), and pea seed (*Pisum sativum* L.) cultivars were obtained to study the effect of drying conditions on the splitting of seed coat, subjected to different drying conditions. The time-strain curves at different drying conditions were obtained with 2630-107 Instron strain gauge. Shrinkage of the seed coat at drying leads to its stress and splitting. The results obtained in all experiments concerning with strength of seed coat proved that frequently the stress σ_s was higher than strength R_m of seed coat. However, most seeds of real condition are in the layer being in contact to other. It limits inflow of air to some parts of seed coat. Hot air caused the shrinkage of part, which is only available for the stream of air. Those, shrinkage of dry part of the seed coat caused tension of wet part of it. Probably, it is one of the most important reason of the seed coat cracking during drying.

Key words: Grain legume, model, seed coat, shrinkage, stress.