

VV

**Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie**

ACTA AGROPHYSICA

49

Grażyna Skubisz

**METODY OCENY
WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH
ŁODYG RZEPAKU OZIMEGO**

Seria – Monografie

Lublin 2001

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny - prof. dr hab. Jan Gliński, czł. koresp. PAN

Z-cy Redaktora Naczelnego:

prof. dr hab. Ryszard T. Walczak, czł. koresp. PAN - fizyka środowiska

prof. dr hab. Bogusław Szot - fizyka materiałów roślinnych

prof. dr hab. Ryszard Dębicki - gleboznawstwo

Rada Redakcyjna

prof. dr hab. J. Haman, czł. rzecz. PAN - przewodniczący

prof. dr hab. T. Brandyk

prof. dr hab. I. Dechnik

prof. dr hab. D. Drozd

prof. dr hab. F. Dubert

prof. dr hab. J. Fornal

prof. dr hab. E. Kamiński

prof. dr hab. A. Kędziora

prof. dr hab. T. Kęsik

prof. dr hab. Cz. Koźmiński

prof. dr hab. J. Laskowski

prof. dr hab. P.P. Lewicki

prof. dr hab. S. Nawrocki, czł. rzecz. PAN

prof. dr hab. E. Niedźwiecki

prof. dr hab. J. Siewiewski

prof. dr hab. W. Stępniewski

prof. dr hab. Z. Ślipek

prof. dr hab. S. Zawadzki, czł. rzecz. PAN

Redaktor tomu

dr Grażyna Skubisz

Opiniowali do druku

prof. dr hab. inż. Janusz Kaczorowski

prof. dr hab. Stanisław Nawrocki, czł. rzecz. PAN

prof. dr hab. Daniela Żuk

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: editor@demeter.ipan.lublin.pl

http://www.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>

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2001

ISBN 83-87385-68-9

ISSN 1234-4125

Wydanie I. Nakład 150 egz. Ark. wyd. 4,6

Skład komputerowy: Irena Kulawiak

Druk: Zakład Usług Poligraficznych TEKST s.c., ul. Wspólna 19, 20-344 Lublin

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP I OKREŚLENIE CELU PRACY	7
2. STAN WIEDZY PRZED ROZPOCZYNANIEM BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH ŁODYG RZEPAKU.....	9
3. METODYKA BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH ŁODYG RZEPAKU OZIMEGO	14
3.1. Metody	17
3.1.1. Metoda statyczna	17
3.1.2. Metoda dynamiczna	18
3.1.3. Badania strukturalne	18
3.1.4. Metoda rentgenograficzna	19
3.2. Materiał	20
3.2.1. Doświadczenie odmianowe	20
3.2.2. Doświadczenie o zróżnicowanej rozstawie rzędów i obsadzie roślin/m ² (agrotechniczne)	20
3.2.3. Doświadczenie gęstościowo-nawozowe.....	21
4. WYNIKI BADAŃ.....	22
4.1. Wyniki badań uzyskane w doświadczeniu odmianowym	22
4.2. Wyniki badań z doświadczenia o zróżnicowanej rozstawie rzędów i obsadzie roślin/m ² (agrotechnicznego).....	30
4.3. Wyniki badań uzyskane w doświadczeniu gęstościowo-nawozowym ..	33
4.4. Wyniki badań rentgenograficznych	37
5. DYSKUSJA	40
6. WNIOSKI	45
7. PIŚMIENNICTWO	47
8. STRESZCZENIE.....	53
9. SUMMARY.....	55

Publikacja ta stanowi omówienie wyników badań przedstawionych wcześniej w następujących artykułach (I – XIV):

- I. Skubisz G.: An assessment of the mechanical properties of winter rape stems determined static and dynamic tests (Ocena właściwości mechanicznych łodyg rzepaku ozimego uzyskanych w badaniach statycznych i dynamicznych). 4th International Conference Physical Properties of Agricultural Materials and Their Influence on Technological-Processes, Rostok, 763-767, 1989.
- II. Skubisz G.: Determination of the mechanical properties of winter rape stalks (Określanie właściwości mechanicznych łodyg rzepaku ozimego). Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 389, 165-173, 1991.
- III. Skubisz G.: The variability of mechanical properties of winter rape stems during plant vegetation period (Zmienność właściwości mechanicznych łodyg rzepaku ozimego w czasie wegetacji roślin). 8 International Rapeseed Congress, Saskatoon, USA, 1795-1800, 1991.
- IV. Skubisz G.: Określanie sztywności łodyg rzepaku ozimego. Annales, UMCS Lublin, XLVI/XLVII, 38, sectio AAA, 391-398, 1991/1992.
- V. Skubisz G.: A method for the determination of rape stalk bending stress (Metoda wyznaczania naprężenia zginającego łodygi rzepaku). Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 399, 213-217, 1993.
- VI. Skubisz G.: Determination of the mechanical properties of winter rape stems (Określanie właściwości mechanicznych łodyg rzepaku ozimego). Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 399, 219-225, 1993.
- VII. Skubisz G.: The effect of mechanical properties of winter rape stems on the resistance of plant to lodging (Wpływ właściwości mechanicznych łodyg rzepaku ozimego na odporność roślin na wyleganie). Int. Agrophysics, 8, 319-322, 1994.
- VIII. Skubisz G., Vielikanov L.: Methods of determining the strength properties of the winter rape stems (Metody określania właściwości mechanicznych łodyg rzepaku ozimego). Int. Agrophysics, 8, 323-326, 1994.
- IX. Skubisz G.: Studies of the mechanical properties of winter rape stems (Badania właściwości mechanicznych łodyg rzepaku ozimego) Zemedelska Technika 41, (2), 65-68, 1995.
- X. Skubisz G.: Variability of the strength properties of winter rape stems as an effect of controlled strategy in plant growth conditions (Zmienność właściwości wytrzymałościowych łodyg rzepaku jako efekt kontrolowanej

- strategii w postaci warunków uprawy roślin). CAPPT Ostend, Belgium, 63-66, 1995.
- XI. Skubisz G.: Określanie mechanicznych właściwości łodyg rzepaku ozimego. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 425, 223-227, 1996.
- XII. Skubisz G.: Determination of the mechanical properties of winter rape stems (Określanie mechanicznych właściwości łodyg rzepaku ozimego). AgEng Madrid 1996.
- XIII. Skubisz G.: The effect of differentiated sowing density on the lodging and the variability of mechanical properties of rape stalks (Wpływ gęstości uprawy roślin na wyleganie i zmienność właściwości mechanicznych łodyg rzepaku). Int. Agrophysics, 10, 303-307, 1996.
- XIV. Skubisz G., Vielikanov L.: Assessment of the susceptibility of rape stems to shearing (Ocena podatności łodyg rzepaku na ścinanie). Int. Agrophysics, 14, 427-430, 2000.

1. WSTĘP I OKREŚLENIE CELU PRACY

Rzepak ozimy stanowi podstawową roślinę oleistą naszego klimatu. W ostatnim czasie na świecie wzrosło dodatkowo zainteresowanie rzepakiem z uwagi na możliwość produkcji paliwa do silników samochodowych w oparciu o ten surowiec.

Badania właściwości mechanicznych łodyg rzepaku ozimego dostarczają wiedzy niezbędnej do oceny podatności roślin na wyleganie i efektów energetycznych (energia cięcia) przy mechanicznym zbiorze tej rośliny. Zjawisko wylegania roślin utrudnia proces zbioru, obniżając plony. Odporność roślin na wyleganie zależy wyraźnie od mechanicznych właściwości łodyg pojedynczych roślin. Fakt ten jest odzwierciedlony w wieloletnich badaniach prowadzonych przez autora.

Wobec powyższego badania właściwości mechanicznych łodyg roślin rzepaku są istotne dla technologów zbioru oraz hodowców nowych odmian.

Poznanie właściwości mechanicznych łodyg roślin rzepaku jest ważne ze względu na możliwość oceny odmian pod względem wytrzymałościowym.

Przegląd licznych metod i wyników badań właściwości mechanicznych łodyg roślin wskazuje na dużą ich zmienność, determinowaną aktualnym stanem fizycznym rośliny oraz wieloma czynnikami wewnętrznymi i zewnętrznymi [77,91]. W zależności od wytyczonego celu zajmowano się zarówno całą łodygą [19,42,91] jak i jego fragmentami [3,23,47,56,57,85,86], oceniając jedynie stan aktualny roślin (zboż, traw, kukurydzy, lnu), bez uwzględnienia zmienności cech fizycznych w czasie ich wzrostu. Brak było tych badań w odniesieniu do roślin rzepaku. Aktualny ciągły problem wylegania roślin zmuszał niejako do dalszych poszukiwań, które przybliżyłyby poznanie złożonych i wieloczynnikowych zagadnień wiążących się zarówno z kształtowaniem właściwości fizycznych, jak i występującym zakresem zmienności parametrów wytrzymałościowych w czasie wzrostu i rozwoju roślin [91,IV,VI,94].

Wieloletnie badania właściwości sprężystych źdźbła pszenicy ozimej wyrażane poprzez współczynniki sprężystości (E), wyznaczone w procesie zginania zarówno odcinków jak i całego źdźbła, przedstawione zostały w pracy doktorskiej autorki [91].

Stwierdzona zmienność właściwości sprężystych wzdłuż źdźbła, ze wskazaniem ekstremum, jak również w fazach fenologicznych, a także istotne różnice międzyodmianowe, inspirowały do rozpoczynania badań właściwości mechanicznych łodyg innych roślin.

Opracowana przez autorkę metodyka została zastosowana przez Dolińskiego [19] i Jeżowskiego [42] do badań odporności źdźbeł zboż na wyleganie, w pracach hodowlanych nowych odmian. Uzyskano wysokie wartości współczynników

odziedziczalności dla parametrów mechanicznych. Badania te wskazały, że parametry mechaniczne są znacznie silniej odziedziczalne w porównaniu z parametrami morfologicznymi i autorzy nazywają je markerami.

Odziedziczalność właściwości mechanicznych źdźbła zbóż stwierdzona dla źdźbła pszenicy i jęczmienia [19,42] inspirowała do opracowania metodyki badań właściwości mechanicznych łodyg rzepaku – ważnej rośliny żywnościowej i przemysłowej, których luka jest zauważalna w świetle przeglądu literatury.

Należy nadmienić, że przekrój poprzeczny łodygi rzepaku nie przypomina żadnej figury geometrycznej, a zatem trudno jest wyznaczyć moment bezwładności (I), co oznacza, że nie określano współczynnika sprężystości (E) jako parametru mechanicznego, tak jak w przypadku źdźbła zbóż. Dlatego też w badaniach właściwości wytrzymałościowych łodyg rzepaku wyznaczano szereg parametrów mechanicznych w różnych procesach, między innymi, w procesie zginania odcinków łodygi sztywność (EI) oraz maksymalne naprężenia zginające (σ_{\max}), zaś w procesie cięcia statycznego i dynamicznego energię (E_s i E_d), używając maszyny wytrzymałościowej firmy Instron oraz aparat typu Dynstat.

Z kolei niezbędny w tych badaniach parametr jakim jest powierzchnia przekroju poprzecznego łodygi naturalna (S) oraz po usunięciu substancji miękkiszowej (S') wyznaczano metodą optyczną, za pomocą obiektywu zamieszczonego w przyrządzie ΔT -areometrze.

Przedmiotem szczególnego zainteresowania autora jest możliwość wykorzystania opracowanej metodyki dotyczącej określania parametrów mechanicznych łodyg rzepaku do oceny ich właściwości wytrzymałościowych.

Celem badań (I – XIV) omawianych w niniejszej publikacji było dokonanie wyboru najbardziej korzystnych parametrów testujących właściwości wytrzymałościowe łodygi rzepaku oraz ocena metod pozwalających poznać właściwości mechaniczne łodyg rzepaku ozimego z uwzględnieniem fazy rozwoju roślin i zróżnicowanych warunków agrotechnicznych uprawy roślin, a także ocena zależności pomiędzy właściwościami mechanicznymi łodyg a podatnością roślin na wyleganie.

2. STAN WIEDZY PRZED ROZPOCZYNANIEM BADAŃ

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH ŁODYG ROŚLIN RZEPAKU

Badania oceny właściwości wytrzymałościowych łodyg roślin były przedmiotem wieloletniej uwagi autorów. Stosowano różnorodne testy zmierzające do określenia odporności roślin na wyleganie.

Szywność łodyg roślin badało wielu autorów uważając, że jest to wielkość odzwierciedlająca naturalne warunki zginania roślin, która charakteryzuje odporność na odkształcanie jakie występuje pod wpływem warunków zewnętrznych, w których wzrastają rośliny. Szywność jest również określana jako iloczyn współczynnika sprężystości i tzw. geometrycznego momentu bezwładności przekroju. Oda i in. [74] stwierdzili, że szywność źdźbła jęczmienia wynika głównie z dużej wartości momentu bezwładności przekroju, a szywność pszenicy przede wszystkim ze względu na wysoką wartość modułu sprężystości. Średnia szywność źdźbła wyznaczona na podstawie określenia szywności poszczególnych międzywęźli również charakteryzuje się, jak to wynika z prac Dolińskiego i in. [18] wysoką odziedziczalnością. Z kolei szywność na zginanie źdźbeł zbóż w metodzie holograficznej wyznaczał Gowin [30]. Również za pomocą szywności oceniał wytrzymałość łodyg roślin Siemienow [88]. Wprost proporcjonalną zależność pomiędzy szywnością źdźbła a stopniem wylegania roślin zbożowych uzyskali następujący autorzy: Oda i in. [74], Multamaki [65], Murphy i in. [66], Hess i Shands [36].

Miarą wytrzymałości łodyg na zginanie mogą być m. in. maksymalna siła zginająca, maksymalny moment gnący lub maksymalne naprężenie zginające. Wszystkie te cechy były badane w kontekście odporności na wyleganie zbóż. Jak wynika z licznych prac wytrzymałość dolnych międzywęźli, stwierdzili Chigantsev [15], Nelson [73] i Seko [87] lub ta cecha w kombinacji z innymi wg. Vaidyla i Ram [117], dość dobrze charakteryzuje odporność na wyleganie podstawowych zbóż. Wielkość siły zginającej całe źdźbło lub jego fragmenty była wyznaczana przez Dolińskiego [18,22] dla pszenicy oraz Dolińskiego i in. [19,21] dla pszenicy i pszenżyta, a także Jeżowskiego [39,40] oraz Jeżowskiego i in. [41-44] dla jęczmienia, którzy testowali odmiany w kontekście odporności na wyleganie uzyskując zadowalające wnioski. Zarówno Doliński [22] jak i Jeżowski [45] na pewnym etapie swoich prac stosowali metodę ultradźwiękową do oceny wytrzymałości źdźbeł zbóż w relacji z odpornością odmian na wyleganie. Należy nadmienić, że wspomniani badacze zajmowali się różnymi gatunkami zbóż: pszenicą, pszenżytem lub jęczmieniem i uzyskali pewne rozbieżne wnioski pomiędzy metodami mechanicznymi a prędkością fali ultradźwiękowej. Podobnie

też inni badacze stwierdzali rozbieżne przebiegi parametrów mechanicznych u gatunków zbóż m. in. Haman i in. [34] dla pszenicy i żyta oraz Oda i in. [74] dla pszenicy i jęczmienia.

Autorka metody ultradźwiękowej Gawda, w pracach wykonywanych dla źdźbeł zbóż, stwierdziła zależność między prędkością rozchodzenia się ultradźwięków a strukturą wewnętrzną włókien łądygi, a ściślej teksturą ściany wtórnej włókien sklerenchymy [27,28]. Natomiast w badaniach lnu Gawda stwierdzając maximum prędkości fali ultradźwiękowej w połowie długości łądygi wyjaśnia, że sposób ułożenia mikrofibryl celulozowych na łądydze, równoległy lub izotropowy decyduje o prędkości przechodzenia fali wzdłuż łądygi roślin [27,59,109]. Badania wytrzymałościowe źdźbła zbóż i analizę budowy morfologicznej wykonywał Kurzyp [50] oraz Kurzyp i in. [51]. Autor ten uzyskał analogię zmienności charakterystyk z procesu zginania z rezultatami badań przechodzenia fali ultradźwiękowych przez źdźbło pszenicy, skąd wnioskuje, że obydwa testy można stosować zamiennie [53,54]. Ponadto zmienność maksymalnej siły zginającej łądyg roślin pastewnych (łądygi lucerny, tymotki, owsa) oceniał Prince [79], a także Suggs i Splinter [108] używali parametru siły zginającej w badaniach wytrzymałościowych łądyg tytoniu. Z kolei moment gnący był używany do charakterystyki włóknistych roślin przez Mullera [63] oraz Muller i Skubisz [64] i został wyznaczony dla łądyg rzepaku ozimego również przez Skubisz i Muller [96]. Natomiast współzależność momentu gnącego z odpornością na wyleganie wykazali Bashford i in. [7] oraz Oh [75]. Rozległe charakterystyki wytrzymałościowe, zarówno pod względem zastosowanych metod badawczych jak również pod względem doboru materiału badawczego uzyskał Blahovec i in. [11]. Równocześnie w procesie zginania, rozciągania oraz cięcia charakterystyki wytrzymałościowe dla traw wyznaczył Ahlgrimm [1-4].

Jak wynika z obszernych badań wykonywanych dla źdźbeł zbóż: Ruebenbauer [82], Grafius i Brown [32], Grafius [33], Bauer [10], Moustafa [62], Kaczorowski [46], Miczyński [60], Neenan i Spencer-Smith [72], Uctum i Hungerbuhler [116] oraz badań źdźbeł traw: Ahlgrimm [2], Evans [24,25], Mc Randal i in. [58], próby określania warunków stabilności rośliny zbożowej, nie wyczerpywały wszystkich aspektów odporności na wyleganie. Już sam opis właściwości mechanicznych źdźbła napotykał znaczne trudności ze względu na ich niejednorodność i anizotropowość. Dowodem jest obserwowana w literaturze zaskakująca rozbieżność danych, a także wyraźna zależność mierzonych wartości od metody i fizycznych warunków pomiaru. Stwierdzono, że cechy mechaniczne podobnie jak cechy morfologiczne i anatomiczne: Multamaki [65], Sowa [106], Baier [9], Wąs [119], Jeżowski [45], których one są funkcją, zależą od fazy

rozwojowej rośliny, położenia na źdźbłę oraz warunków wzrostu rośliny: Skubisz [90,91,93,94] i Szot [111]. Zależność cech mechanicznych od wielu czynników jednocześnie, komplikuje badanie ich współzależności z odpornością na wyleganie. Tym nie mniej, jak to wynika m.in. z dość obszernych badań nad jęczmieniem, cechy źdźbła oparte na pomiarach mechanicznych niekiedy znacznie lepiej różnicują formy hodowlane pod względem odporności na wyleganie, w porównaniu z cechami morfologicznymi wg. Jeżowskiego [39,40] oraz Jeżowskiego i in. [41], a także wykazują wysoki stopień odziedziczalności, powyższy fakt stwierdzili Doliński i in. [19] oraz Jeżowski i in. [42].

Ponadto, przegląd literatury wskazuje, że właściwości wytrzymałościowe lnu oceniali Putz [81] oraz Sager i Putz [85], gdzie przewidywali moduł Younga w badaniach relaksacyjnych, a także Becknan i Kromer [8], którzy w teście rozciągania wyznaczali moduł Younga stwierdzając, że parametr ten jest przydatny do testowania materiału hodowlanego.

Proces cięcia był używany przez wielu autorów w badaniach mechanicznych właściwości łądyg roślin np. Ahlgrimm [3] dla traw, Aktridis [5] dla kukurydzy, Haman i in. [34] dla zbóż, Reznicek i in. [83,84] dla zbóż, lnu i rzepaku, Żuk [122,123] dla zbóż.

Charakterystyki wytrzymałościowe stosowane w badaniach właściwości mechanicznych roślin zamieszczone zostały w licznych monografiach: Burmistrowa i in. [13], Mohsenin [61], Ahlgrimm [2], Timoszenko i Gere [115], Pinthus [77], Reznicek i in. [84], Persson [76]. Mimo wielu prób podejmowanych przez autorów badań w zakresie oceny właściwości mechanicznych łądyg roślin problem wydaje się ciągle aktualny. Wylegające gatunki roślin wymagają hodowli odmian bardziej odpornych.

Jak wiadomo, składnikami przenoszącymi zasadniczą część naprężeń w ścianach komórkowych, a tym samym w łądygach, które zawierają dobrze wykształcone tkanki mechaniczne są celuloza i lignina. Celuloza ze względu na wysoki stopień polimeryzacji i tworzenie formy krystalicznej zapewnia ścianom komórkowym przede wszystkim wysoką sztywność i wytrzymałość na rozciąganie. Z kolei lignina wypełniając przestrzenie między łańcuchami celulozowymi nadaje ścianom komórkowym odpowiednią wytrzymałość na ściskanie. Biorąc pod uwagę, że zginanie łądyg wiąże się zarówno z rozciąganiem i ścisaniem jego ścianek jest zrozumiałym, że obecność obydwu składników w odpowiednio wysokiej ilości i właściwej proporcji jest niezbędna dla wysokiej sztywności i wytrzymałości łądyg na obciążenia mechaniczne w warunkach naturalnych. Można wskazać prace, gdzie autorzy wykazują ścisły związek odporności na wyleganie zbóż z zawartością

celulozy w całym źdźble t.j. Anikceeva [6], Pravdiva [78], Zenisceva i Stankova [120] lub w dolnych międzywęzłach: Spahr [107] i Skopik [89], z zawartością ligniny: Kiriłow [48], Liaskovskij i Kalinin [55], Skopik [89], zaś hemicelulozy: Skopik [89] i Spahr [107], a także ilościowym stosunkiem celulozy do ligniny: Heyland [35], Skopik [89] i Spahr [107]. Znaczna niezgodność danych dotyczących znaczenia poszczególnych składników chemicznych źdźbła z odpornością na wyleganie wydaje się wynikać przede wszystkim ze znacznej zmienności składu chemicznego źdźbła w czasie wegetacji wg. Ślusarczyk [112,113] oraz z tego, że zmienność genotypowa innych cech odpowiedzialnych za odporność na wyleganie jest znacznie większa.

Badania struktury łądyg roślin były przedmiotem zainteresowania wielu autorów prac wykonywanych w zakresie oceny właściwości wytrzymałościowych roślin t.j. Żuk [122-124], Żebrowski [121], Gawda [26,28], Gawda i Haman [27], Gawda i Trębacz [29]. Analizę przekroju poprzecznego źdźbła przeprowadzał Gowin [31], który zaproponował też pewien model przekroju źdźbła [49]. Natomiast Żuk [124] oceniła, że stosunek poszczególnych tkanek tworzących źdźbło, parenchymy i sklerenchymy jest zmienny na całej długości rośliny, a zatem zróżnicowanie struktury źdźbła utrudnia odtworzenie modelowe. Jednakże mimo wielu utrudnień jakich dostarcza źdźbło zbóż spowodowanych niejednorodną konstrukcją, w literaturze dostrzega się próby tworzenia modelu wytrzymałościowego źdźbła m. in. przez Kaczorowskiego [46] i Miczyńskiego [60]. Z kolei zawartość substancji szkieletowych w źdźble zbóż jest szeroko omówiona w pracach Ślusarczyk [112,113] i Przeszlakowskiej [80], w których stwierdzono, że ilościowa zawartość ligniny i celulozy w źdźbłach decyduje o odporności roślin na wyleganie.

W świetle literatury w badaniach odporności na wyleganie metodą rentgenograficzną do analizy budowy przekrojów źdźbła zbóż używał Żebrowski [121]. Na podstawie analizy wyników badań uzyskanych zdjęć i oglądanych przekrojów można z punktu widzenia wytrzymałości źdźbła stwierdzić charakterystyczne cechy jego budowy, wykazała Żuk [124]. Peryferyjne rozmieszczenie sklerenchymy zapewnia źdźbłu nie tylko dużą sztywność, ale też znaczną wytrzymałość na zginanie. Obły kształt źdźbła oraz symetria osiowa rozmieszczenia różnych tkanek świadczą o przystosowaniu tego organu do przenoszenia obciążeń bocznych. Podkreślają to również badania odporności na wyleganie przeprowadzone przez Żebrowskiego [121].

Przytoczony przegląd badań wykonywanych, w celu określenia właściwości wytrzymałościowych łądyg roślin, wskazuje lukę w zakresie badań oceny

właściwości wytrzymałościowych łodyg roślin rzepaku, ważnej rośliny żywieniowej i przemysłowej dla naszego klimatu. Istniejący brak wiedzy z zakresu znajomości mechanicznych właściwości łodyg roślin rzepaku, jak również stwierdzona odziedziczalność parametrów mechanicznych dla źdźbeł zbóż, przyczyniły się do rozpoczęcia badań przedstawionych w niniejszej publikacji.

3. METODYKA BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH ŁODYG RZEPAKU OZIMEGO

W przedstawionych pracach zastosowano szeroki zakres metod pomiarowych, w celu wybrania najbardziej odpowiednich parametrów mechanicznych przydatnych do testowania łodyg rzepaku pod względem wytrzymałościowym.

Właściwości mechaniczne łodyg rzepaku charakteryzowane były poprzez wyznaczane parametry mechaniczne.

Na Rys. 1-3 przedstawiony został schemat badań oraz wzory opisujące wyznaczane parametry mechaniczne, a także obiekt badań.

Zamierzony cel realizowano poprzez wyznaczanie parametrów mechanicznych w teście statycznym i dynamicznym.

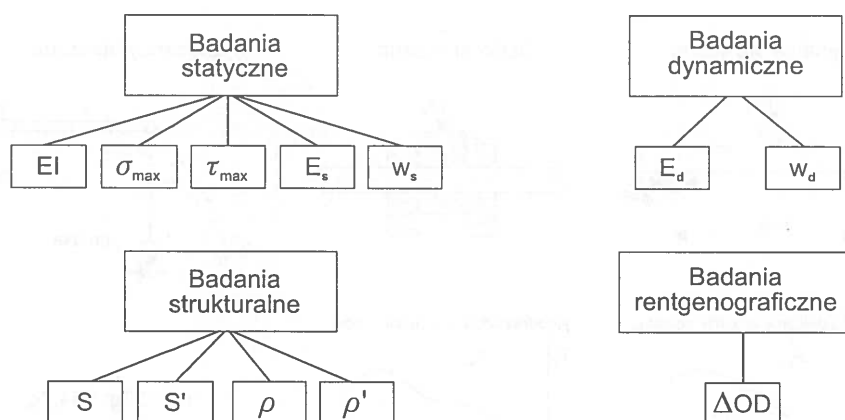
Badania właściwości mechanicznych łodyg obejmowały kilka odmian rzepaku ozimego, a także uwzględniały zróżnicowanie warunków agrotechnicznych uprawy roślin (gęstość wysiewu nasion, rozstawa rzędów, nawożenie azotowe). Zastosowano prowokujące wyleganie warunki uprawy roślin, między innymi stosując wysokie dawki nawozu azotowego, które zdaniem hodowców są niezbędne do oceny podatności roślin na wyleganie.

Jak wynika z przeglądu literatury, warunki uprawy i hodowli rzepaku ozimego stanowiły przedmiot wieloletniej uwagi polskich rolników [14,16,17,37,38, 62-66,100,107]. W licznych doświadczeniach rozpatrywano wpływ wielu czynników na jakość plonu nasion rzepaku, w tym celu stosowano zmienną agrotechnikę uprawy odmian. Eksperymenty uwzględniały coraz bardziej ulepszone odmiany rzepaku.

W niniejszych badaniach, w celu uchwycenia zależności pomiędzy właściwościami mechanicznymi łodyg rzepaku a podatnością roślin na wyleganie, zastosowano zarówno zróżnicowane zagęszczenie roślin/m², jak również różnej wielkości dawki nawozu azotowego. Jak wynika z prac rolniczych dotyczących uprawy rzepaku ozimego zwiększona dawka azotu zwiększa podatność roślin na wyleganie [16, 69].

Rośliny rzepaku ozimego poddawane testowi mechanicznemu uprawiane były w trzech doświadczeniach: odmianowym, o zróżnicowanej rozstawie rzędów i gęstości roślin/m² (agrotechnicznym) i gęstościowo-nawozowym.

Należy nadmienić, że wszystkie doświadczenia trwały najkrócej dwa lata, w celu możliwości potwierdzenia uzyskiwanych wniosków i były zakładane w trzech powtórzeniach.



Rys. 1. Schemat badań właściwości mechanicznych łądy rzepaku.

Fig. 1. Diagram of tests on the mechanical properties of rape stems.

Oznaczenia:

EI – sztywność

σ_{\max} – maksymalne naprężenia zginające

τ_{\max} – maksymalne naprężenie ścinające

E_s – energia cięcia statycznego

w_s – energia cięcia statycznego odpowiadająca jednostkowemu przekrojowi poprzecznemu łądy

E_d – energia cięcia dynamicznego

w_d – energia cięcia dynamicznego odpowiadająca jednostkowemu przekrojowi poprzecznemu łądy

S – powierzchnia przekroju poprzecznego naturalnego

S' – powierzchnia przekroju poprzecznego po usunięciu substancji miększowej łądy

ρ – gęstość łądy

ρ' – gęstość suchej masy łądy

ΔOD – wielkość określająca ilość promieniowania rentgenowskiego zaabsorbowanego przez łądę

EI – rigidity

σ_{\max} – maximum bending stress

τ_{\max} – maximum shearing strength

E_s – shearing energy in static test

w_s – shearing energy necessary to shear a unit stem cross section area

E_d – dynamic shearing energy

w_d – dynamic shearing energy necessary to shear a unit stem cross section area

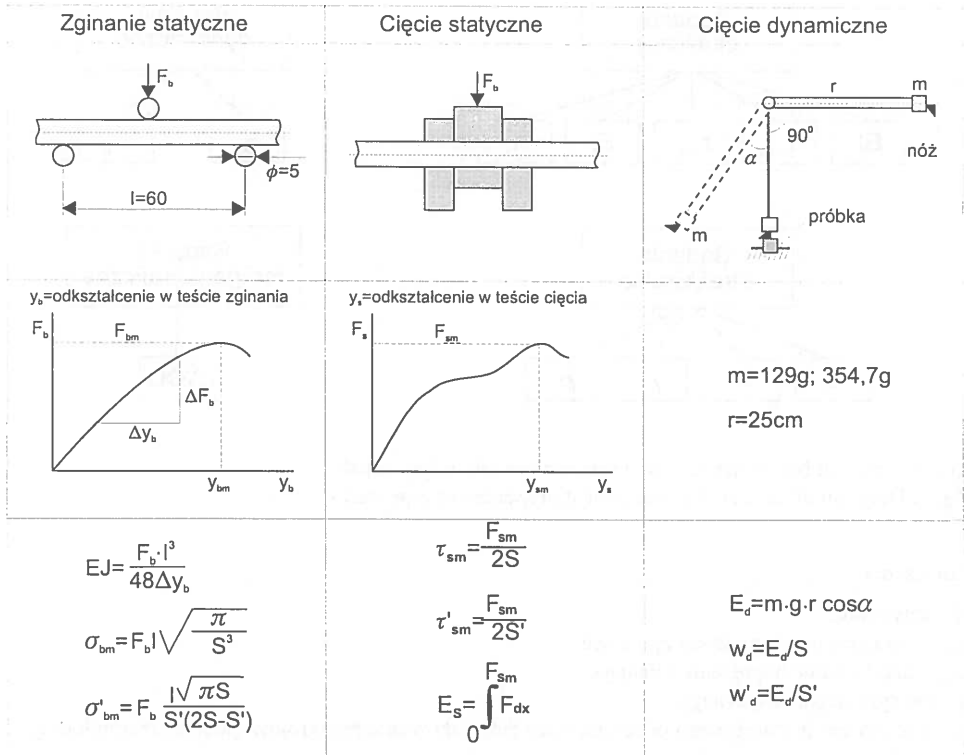
S – natural stem cross section area

S' – cross section area of stem with the parenchyma removed

ρ – natural stem density

ρ' – density of stem with the parenchyma removed

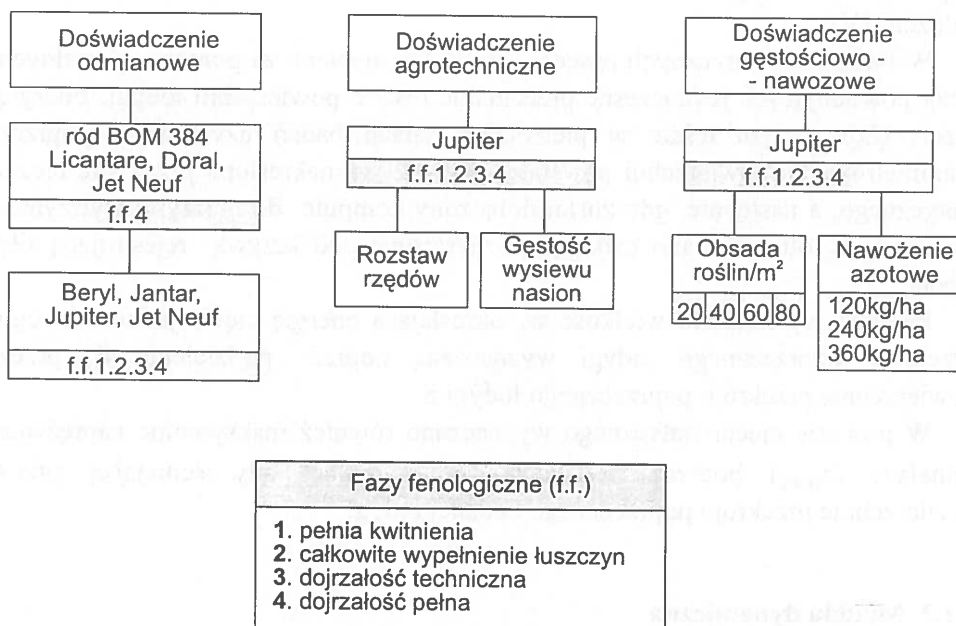
ΔOD – mean value representing the absorption of X-ray radiation by the stem.



Rys. 2. Schematyczna ilustracja testów używanych w badaniach mechanicznych właściwości łądy rzepaku.

Fig. 2. Schematic presentation of tests used in the study of mechanical properties of rape stems.

Ponadto należy nadmienić, że liczebność łądy niezbędna do oceny statystycznej, określona drogą eliminacji prób o różnej liczebności rozpatrywanego materiału badawczego, wynosiła 30. Z uwagi na fakt, że poletka doświadczalne były zakładane w trzech powtórzeniach, liczebność badanych łądy z doświadczeń o zróżnicowanej rozstawie rzędów i gęstości roślin/m² (agrotechnicznym) oraz gęstościowo-nawozowego wzrastała trzykrotnie, czyli wynosiła 90. Dlatego też można zauważyć, że kompleksowe obliczenia, zarówno parametrów pośrednich niezbędnych do uzyskania analizowanych parametrów mechanicznych w zastosowanych testach, jak i ocena statystyczna, podobnie jak przeprowadzenie eksperymentów, wymagały dużej uwagi autora.



Rys. 3. Schemat doświadczeń roślinnych rzepaku ozimego.

Fig. 3. Diagram of experiments on winter rape plants.

3.1. Metody

3.1.1. Metoda statyczna

W badaniach statycznych wyznaczano za pomocą maszyny wytrzymałościowej firmy Instron w procesie zginania sztywność (EI) i maksymalne naprężenie zginające (σ_{max}) oraz w procesie cięcia energię (E_s) i maksymalne naprężenie ścinające (τ_{max}). Wyniki rejestrowano systemem komputerowym stosując do tego celu opracowany program.

Parametry wytrzymałościowe w procesie zginania określano dla ośmiocentymetrowej długości odcinka łodygi dwustronnie podpartego.

Sztywność (EI) wyznaczano dla zakresu odkształceń sprężystych łodygi. Siła zginająca działała w środku długości badanego odcinka łodygi. Podczas eksperymentu odczytywano wartość siły zginającej i strzałkę ugięcia.

Z kolei maksymalne naprężenia zginające (σ_{max}) spowodowane działaniem maksymalnej siły zginającej wyrażano poprzez mierzone powierzchnie przekroju

poprzedniego łądygi. Wielkość ta została wyliczona na podstawie przyjętych założeń [IV].

W badaniach statycznych procesu cięcia dokonywano za pomocą specjalnych noży powodujących jednoczesne przecinanie dwóch powierzchni łądygi. Energię cięcia (E_s) w tym teście w pierwszych latach badań uzyskiwano poprzez planimetrowanie powierzchni powstałej pod krzywą nakreśloną przez siłę cięcia statycznego, a następnie, gdy został dołączony komputer do maszyny wytrzymałościowej E_s otrzymywano całkując powierzchnię pod krzywą rejestrującą siłę cięcia.

Ponadto wyznaczano wielkość w_s określającą energię cięcia jednostkowego przekroju poprzecznego łądygi wyznaczaną poprzez podzielenie E_s przez powierzchnię przekroju poprzecznego łądygi S .

W procesie cięcia statycznego wyznaczano również maksymalne naprężenie ścinające (τ_{max}) poprzez podzielenie maksymalnej siły ścinającej przez powierzchnie przekroju poprzecznego badanej łądygi.

3.1.2. Metoda dynamiczna

W teście dynamicznym mierzono energię cięcia dynamicznego (E_d) za pomocą aparatu typu Dynstat działającego na zasadzie młota wahadłowego, w którym nóż poruszał się z prędkością $v=2,1$ m/sek (nóż został zamocowany na młocie). Odcinek łądygi poddawany ścinaniu o długości 2 cm umieszczono w tulejce o odpowiedniej średnicy dla badanej próbki, w taki sposób, żeby ścinana łądyga miała długość 1cm, zgodnie z wymaganiami aparaturowymi. W niniejszym teście energię cięcia dynamicznego wyrażano poprzez ilość energii kinetycznej straconej przez młot wahadłowy podczas ścinania.

Z wielkości E_d poprzez podzielenie przez powierzchnie przekroju poprzecznego łądygi została wyliczona równowartość pracy wykonanej, w celu przecięcia jednostkowej powierzchni przekroju łądygi w_d .

3.1.3. Badania strukturalne

Właściwości mechaniczne łądyg korelowane były z ich budową wyrażoną poprzez powierzchnie przekrojów poprzecznych łądygi (S, S') i gęstości (ρ i ρ').

Powierzchnie przekroju poprzecznego łądygi: naturalną (S) i sztuczną tzn. po usunięciu substancji miękkiszowej wypełniającej wewnątrz łądygi (S'), wyznaczano za

pomocą obiektywu rejestrującego stopień zaciemnienia pola widzenia przekroju łądygi stosując przyrząd produkcji angielskiej ΔT -areameter. W badaniach tych zaciemnienie powierzchni przekroju łądygi rejestrowano przez przyrząd pomiarowy. Powierzchnia ta widoczna była na ekranie monitora, natomiast stopień jej zaciemnienia w stosunku do czerni powierzchni wzorca (rozmiar 2 cm x 2 cm) odczytywano w jednostkach powierzchni.

Gęstość ρ i ρ' (naturalną i sztuczną po usunięciu substancji miękiszowej) 3 centymetrowej długości odcinka łądygi określano metodą geometryczną. W tym celu wyznaczano masę badanego odcinka łądygi za pomocą wagi zaś metodą geometryczną wyznaczano objętość. Parametry te pozwoliły uzyskać więcej informacji na temat budowy strukturalnej łądygi.

Jednocześnie w celu rozszerzenia możliwości oceny budowy strukturalnej łądygi rzepaku i jej wpływu na zmienność właściwości mechanicznych określono zawartość substancji szkieletowych w łądygach tzn. ligniny, celulozy i hemicelulozy [Praca wykonana przez dr M. Ślusarczyk według metodyki zawartej w Pracy doktorskiej IUNG Puławy, 1971].

3.1.4. Metoda rentgenograficzna

W ostatnim etapie badań zastosowano metodę rentgenograficzną zarówno do określenia struktury łądygi rzepaku, jak również w celu poszukiwania relacji tej struktury z właściwościami mechanicznymi łądygi.

Właściwości mechaniczne wyrażane były poprzez energię cięcia dynamicznego E_d oraz przez pracę niezbędną do przecięcia jednostkowego przekroju poprzecznego łądygi w_d .

Metoda rentgenograficzna włączona do badań właściwości wytrzymałościowych łądyg roślin rzepaku, poza tym, że umożliwia poszerzenie informacji z zakresu budowy strukturalnej łądyg pozwala również oceniać ich właściwości mechaniczne. W metodzie tej dwie prostopadłe wiązki promieniowania rentgenowskiego przenikały przez łądygę, zaś wynik tego eksperymentu rejestrowany był za pomocą kliszy fotograficznej natomiast stopień jasności uzyskiwanych prążków odczytywano przy pomocy densytometru, który pracował tak jak fotometr. Przy pomocy densytometru odczytywano stopień rozjaśnienia kliszy w stosunku do czerni wzorca, którym w tym przypadku było tło nienaświetlonej kliszy. W metodzie tej wyznaczano wielkość ΔOD , która określa stopień rozjaśnienia kliszy po przejściu promieniowania rentgenowskiego przez łądygę co jest równoznaczne z ilością

zaabsorbowanej energii tego promieniowania [VIII za Smirnova [95], Praca wykonana we współpracy z dr L.Vielikanov z Petersburga].

Badania właściwości mechanicznych łodyg rzepaku, uwzględniające metodę rentgenograficzną, wykonano dla dojrzałych roślin odmiany Bolko, Leo, Libravo, Ceres i Mar uprawianych w warunkach standardowych. Pomiary wykonywano na łodygach w miejscu znajdującym się 25 cm od powierzchni gleby, tzn. w odległości odpowiadającej (w przybliżeniu) średniej wysokości cięcia roślin, przez maszyny żniwne [XIV].

3.2. Materiał

3.2.1. Doświadczenie odmianowe

W doświadczeniu odmianowym badania przeprowadzono na łodygach roślin rzepaku ozimego odmiany Jupiter, Beryl, Jet Neuf oraz Jantar. Pomiary wykonywano w kilku wysokościach łodygi rzepaku, w tym celu dzielono łodygę na sześć równych części w kierunku od korzenia do wierzchołka rośliny. Na początku badań pomiary przeprowadzono na 6-ciu wysokościach łodygi, a następnie zrezygnowano z ostatniego odcinka pomiarowego, gdyż był zbyt cienki, w swoim wyglądzie przypominał boczne odgałęzienie łodygi, zaś uzyskiwane rezultaty właściwości mechanicznych wierzchołkowego odcinka zakłócały obraz wytrzymałościowy całej łodygi. Pomiary wykonywano podczas kwitnienia roślin, w czasie całkowitego wypełnienia łuszczyń, a także podczas dojrzałości technicznej i pełnej nasion [I-VI].

3.2.2. Doświadczenie o zróżnicowanej rozstawie rzędów i obsadzie roślin/m² (agrotechniczne)

W doświadczeniu agrotechnicznym badania wykonywano dla łodyg roślin rzepaku ozimego odmiany Jupiter, w którym zastosowano zarówno zróżnicowaną rozstawę rzędów jak i obsadę roślin/m². W niniejszym doświadczeniu zaplanowano rozstawę rzędów $R_1=15$ cm i $R_2=45$ cm oraz gęstość wysiewu nasion $W_1=120$ szt/m², $W_2=240$ szt/m², $W_4=480$ szt/m².

Na wiosnę, stan roślin na poletkach w dwuletnim doświadczeniu agrotechnicznym przedstawiał się następująco:

		W ₁	W ₂	W ₄
I rok badań	R ₁	91 roślin/m ²	161 roślin/m ²	196 roślin/m ²
	R ₂	87 roślin/m ²	132 roślin/m ²	207 roślin/m ²
II rok badań	R ₁	48 roślin/m ²	54 roślin/m ²	126 roślin/m ²
	R ₂	43 roślin/m ²	53 roślin/m ²	72 roślin/m ²

Jak wskazują przytoczone dane w kolejnych latach badań uzyskano zupełnie inną ilość roślin, będącą wielokrotnością poprzedniej liczby. Powstała sytuacja miała wpływ na założenia przyjęte w kolejnym doświadczeniu.

Pomiary wykonywano na trzech wysokościach łodygi w zakresie odcinka od powierzchni gleby do pierwszego odgałęzienia łodygi, w czasie kwitnienia rośliny oraz podczas całkowitego wypełnienia łuszczyn, a także w czasie dojrzałości technicznej i pełnej nasion [II, VI].

3.2.3. Doświadczenie gęstościowo-nawozowe

Badaniom właściwości mechanicznych poddano także łodygi rzepaku ozimego Jupiter w doświadczeniu gęstościowo-nawozowym charakteryzującym się zróżnicowaną obsadą roślin/m², w każdym roku stałą (20, 40, 60 i 80), gdzie zastosowano prowokujące wyleganie warunki dawkami nawozu azotowego w ilości 120, 240 i 360 kg/ha. Pomiary wykonywano w punkcie charakterystycznym łodygi znajdującym się w pobliżu pierwszego odgałęzienia (miejsce charakterystyczne wskazały poprzedzające badania z zakresu oceny właściwości mechanicznych na całej długości łodygi) pod koniec kwitnienia oraz w czasie całkowitego wypełnienia łuszczyn [VII, IX-XI, XIII].

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Wyniki badań uzyskane w doświadczeniu odmianowym

W badaniach przeprowadzonych na łądęgach czterech odmian rzepaku ozimego (Jupiter, Beryl, Jet Neuf, Jantar) pochodzących z doświadczenia odmianowego stwierdzono dużą zmienność parametrów wytrzymałościowych E_d , w_d , E_s , w_s , EI , τ_{max} , σ_{max} na długości łądęgi. Badania te pozwoliły określić zmienność właściwości mechanicznych wzdłuż łądęgi uwzględniając również stadium rozwojowe rośliny (Rys. 4-10). Stwierdzono, że charakter zmian opisuje wielomian 2 stopnia [I-VI].

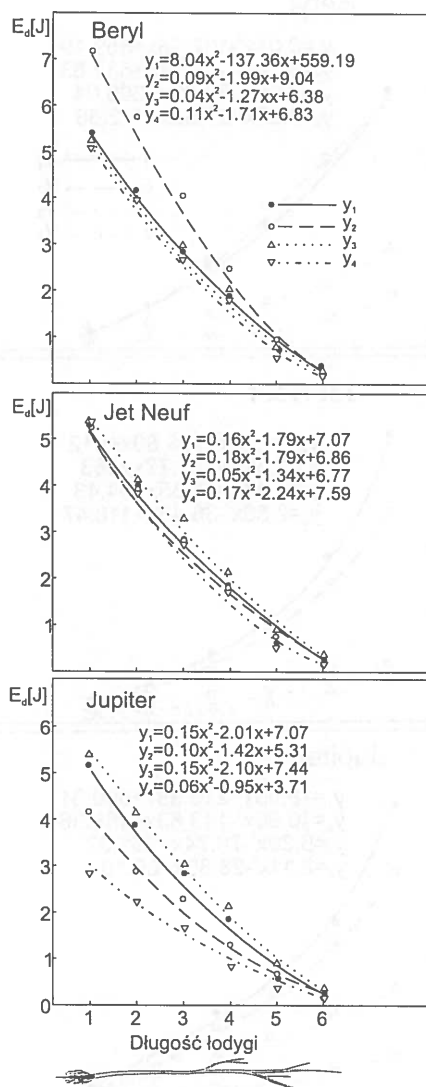
Stwierdzono istotny związek pomiędzy zmiennością właściwości mechanicznych łądęg oraz ich budową wyrażoną zarówno poprzez powierzchnie przekrojów poprzecznych, gęstość jak również zawartość substancji szkieletowych ligniny, celulozy i hemicelulozy [III i VI].

Badania wykazały, że energia cięcia E_d i E_s porównywalnie ocenia różnice międzyodmianowe. Uzyskano wysokie wartości współczynników korelacji pomiędzy tymi parametrami, rzędu 0,80 – 0,90. Wniosek ten wskazuje na identyczną lub równoznaczną możliwość stosowania obydwu testów, dynamicznego i statycznego do wyznaczania energii cięcia łądęgi rzepaku.

Orientacyjny przykład zakresu zmienności średnich wartości energii cięcia dla niektórych spośród analizowanych odmian rzepaku ozimego przedstawia się następująco: E_d dla odmiany Jupiter 0,10 – 0,51 J, Jantar 0,11 – 0,60 J, Jet Neuf 0,11 – 0,55 J oraz E_s dla odmiany Jupiter 0,02 – 0,29 J, Jantar 0,03 – 0,31 J, Jet Neuf 0,03 – 0,35 J. Natomiast stwierdzoną zależność zmienności energii ścinających od powierzchni przekroju poprzecznego łądęgi i gęstości wyrażają współczynniki korelacji: E_d , $E_s \times S$, S' dla odmiany Jupiter $r=0,67 - 0,95$, Jantar $r=0,49 - 0,90$, Jet Neuf $r=0,77 - 0,94$ oraz E_d , $E_s \times \rho$, ρ' dla odmiany Jupiter $r=0,20 - 0,55$, Jantar $r=0,62 - 0,84$, Jet Neuf $r=0,20 - 0,78$. Wyniki te uwzględniają cztery fazy dojrzałości rzepaku ozimego [VI].

Na podstawie analizy wyników dotyczących zmienności w_d wzdłuż łądęgi rzepaku stwierdzono występowanie miejsca charakterystycznego znajdującego się w pobliżu pierwszego odgałęzienia rośliny [III,VI]. Graficzny przykład przebiegu zmienności energii cięcia dynamicznego odpowiadającej jednostkowej powierzchni przekroju poprzecznego łądęgi dla odmiany Jupiter zamieszczono na Rys. 7.

Powyższy parametr zawierał się w następujących przedziałach zmienności odpowiednio dla badanych odmian: Jupiter 3990 - 7511J/m², Jantar 3903 - 7496J/m², Jet Neuf 4462 - 6516J/m². Z kolei wielkość ta określona metodą statyczną w_s zmieniała się w znacznie mniejszych przedziałach wartości dla poszczególnych odmian, które przedstawiały się następująco: Jupiter 1521 - 4156J/m², Jantar 805 - 4033J/m², Jet Neuf 874 - 3660J/m².

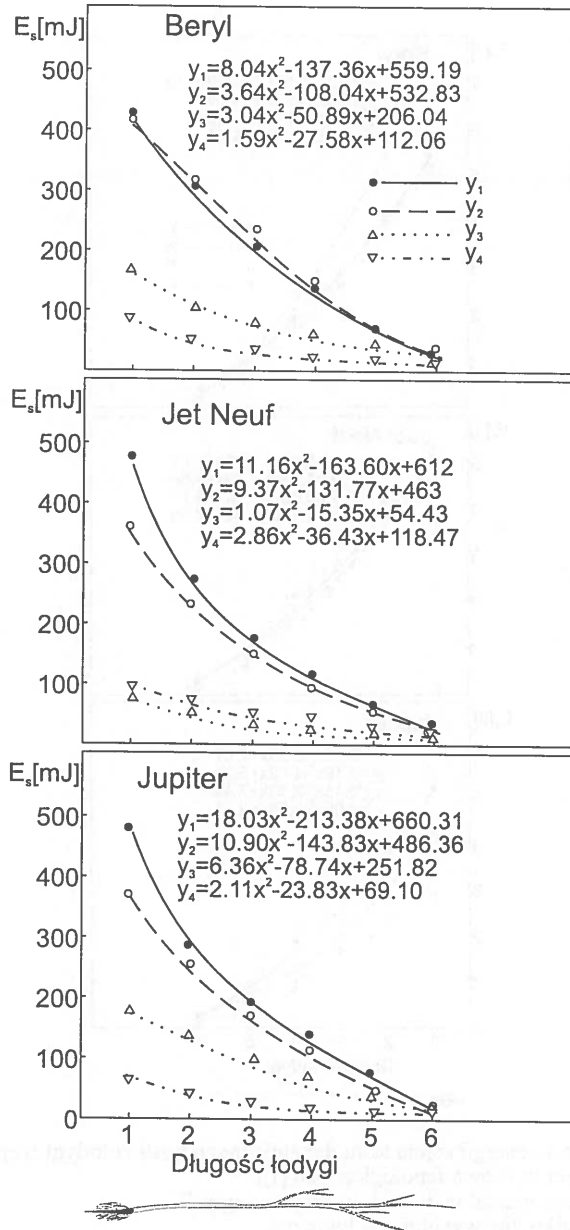


Rys. 4. Rozkład wartości energii cięcia testu dynamicznego wzdłuż łodygi rzepaku odmiany Beryl, Jet Neuf i Jupiter w fazach fenologicznych [1].

(●, ○, △, ▽ - punkty eksperymentalne, y_1, y_2, y_3, y_4 - krzywe regresji,
 ●, y_1 - kwitnienie, ○, y_2 - całkowite wypełnienie łuszczyń,
 △, y_3 - dojrzałość techniczna, ▽, y_4 - dojrzałość pełna)

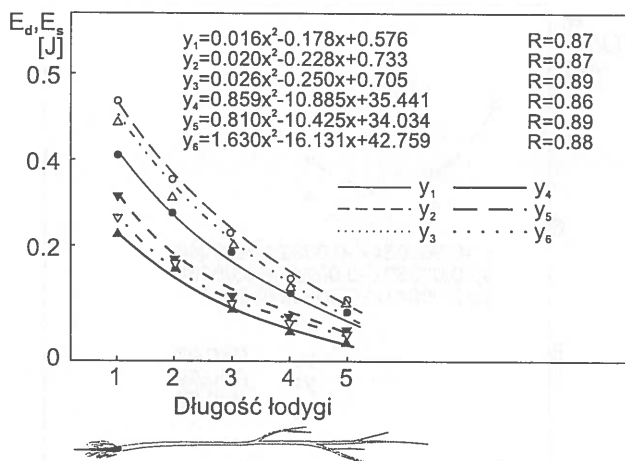
Fig. 4. Distribution of the values of the shearing energy in dynamics tests along the stem of Beryl, Jet Neuf and Jupiter rape in successive phenophases [1].

(●, ○, △, ▽ - experimental points, y_1, y_2, y_3, y_4 - regression curve, ●, y_1 - blooming,
 ○, y_2 - complete silique filling, △, y_3 - technical ripeness, ▽, y_4 - full ripeness).



Rys. 5. Rozkład wartości energii cięcia w teście statycznym na długości łodygi rzepaku odmiany Beryl, Jet Neuf i Jupiter w fazach fenologicznych [I] (objaśnienia jak na Rys. 4).

Fig. 5. Distribution of the values of the shearing energy in static tests along the stem of Beryl, Jet Neuf and Jupiter rape in successive phenophases, explanations as on Fig. 4.



Rys. 6. Rozkład wartości energii cięcia w teście dynamicznym i statycznym wzdłuż łodygi rzepaku odmiany Jupiter w poszczególnych fazach fenologicznych [VI].

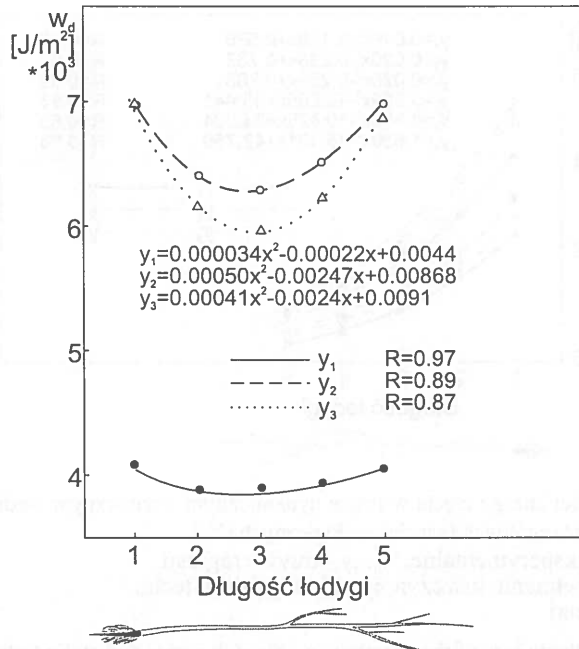
(●,○,△,▽,▲,▼- punkty eksperymentalne, y_1, \dots, y_6 -krzywe regresji, ● y_1 ;▽ y_4 -całkowite wypełnienie łuszczyzn, ○ y_2 ;▲ y_5 -dojrzałość techn. △ y_3 ;▼ y_6 -dojrzałość pełna)

Fig. 6. Distribution of the values of the shearing energy in dynamic and static tests along the stem of Jupiter rape in successive phenophases [VI].

(●,○,△,▽,▲,▼- experimental points, y_1, \dots, y_6 - regression curve, ● y_1 ;▽ y_4 - complete siliqua filling, ○ y_2 ;▲ y_5 - technical ripeness. △ y_3 ;▼ y_6 - full ripeness)

Analiza właściwości mechanicznych odmian w czasie wzrostu i rozwoju roślin wykazała zróżnicowanie wielkości w_d . Stwierdzono maksymalne wartości energii cięcia dynamicznego odpowiadającej jednostkowemu przekrojowi poprzecznemu łodygi w okresie dojrzałości technicznej nasion. Identyczny przebieg zmienności tego parametru został potwierdzony w późniejszych badaniach wykonanych dla odmiany Bolko, Leo i Mar, a w połączeniu z badaniami łuszczyzn pozwolił sugerować termin zbioru rzepaku w dojrzałości technicznej jako bardziej korzystny w porównaniu z dojrzałością pełną [102].

Ponadto wielkość w_d wykazała identyczną charakterystykę zmienności na całej długości łodygi jak parametr naprężenia, uzyskany w teście niszczącym podczas poprzecznego ściskania łodygi pomiędzy równoległymi płytkami, czyli w teście, którego charakterystyki nie zależą od wielkości geometrycznych przekroju łodygi, a więc mogą być traktowane jako stałe materiałowe, fakt ten stwierdzili Skubisz i Blahovec [101]. Wniosek stąd, że obydwa testy można używać zamiennie.



Rys. 7. Rozkład wartości energii cięcia dynamicznego przypadającej na jednostkę przekroju poprzecznego wzdłuż łodygi rzepaku odm. Jupiter w poszczególnych fazach fenologicznych [III, VI].

(●, ○, △- punkty eksperymentalne, y_1, y_2, y_3 - krzywe regresji, ● y_1 - całkowite wypełnienie łuszczyn, ○ y_2 - dojrzałość techniczna, △ y_3 - dojrzałość pełna)

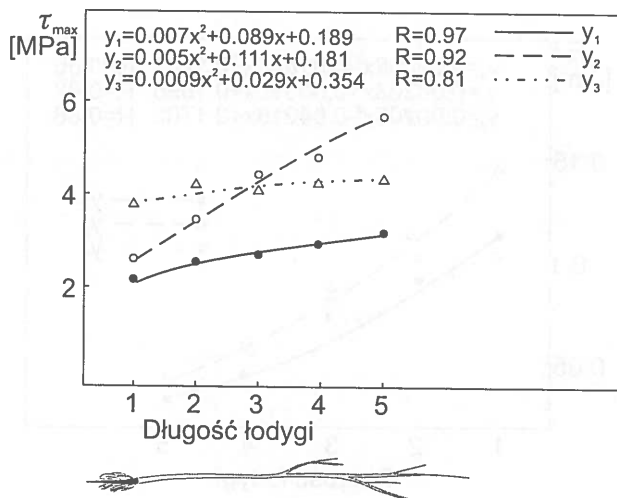
Fig. 7. Distribution of the values of the shearing energy per stem cross-section area unit in dynamic test along the stem of Jupiter rape in successive phenophases [III, VI].

(●, ○, △- experimental points, y_1, y_2, y_3 - regression curve, ● y_1 - complete silique filling, ○ y_2 - technical ripeness, △ y_3 - full ripeness).

Jednocześnie podobną charakterystykę do w_d wzdłuż łodygi rzepaku wykazała prędkość propagacji fali podłużnej w metodzie ultradźwiękowej [95], gdzie również wystąpiło głębokie minimum wartości w pobliżu pierwszego odgaślenia rośliny.

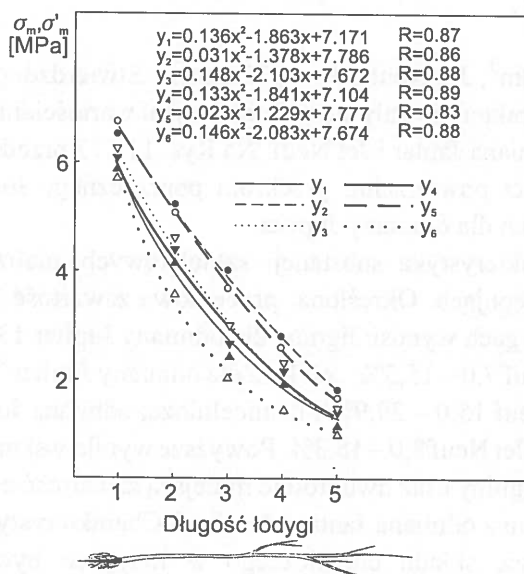
Stwierdzona, analogiczna zmienność parametru w_d wzdłuż łodygi z wielkościami uzyskanymi w przytoczonych testach (poprzeczne napężenie w metodzie poprzecznego ściskania, prędkość propagacji fali podłużnej w metodzie ultradźwiękowej), wskazuje na szczególnie dużą jego przydatność do charakterystyki właściwości mechanicznych łodyg odmian rzepaku.

Uzyskane parametry strukturalne wyznaczone dla cytowanych odmian wynosiły: S, S' dla odmiany Jupiter 11,4 – 90,9 mm², Jantar 14,0 – 94,7 mm², Jet Neuf 15,4 – 96,7 mm² zaś ρ, ρ' odpowiednio dla odmiany Jupiter 189 - 998 kg/m³,



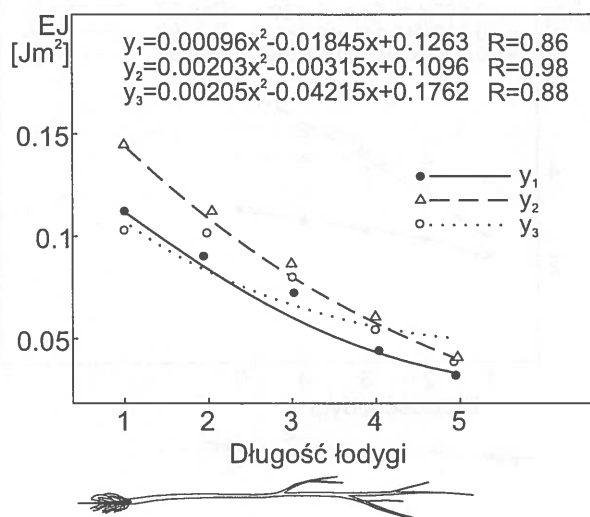
Rys. 8. Rozkład wartości maksymalnego naprężenia zginającego wzdłuż łodygi rzepaku ozimego odm. Jupiter w poszczególnych fazach fenologicznych [III, VI] (objaśnienia jak na Rys. 7).

Fig. 8. Distribution of the values of the shearing stress along the stem of Jupiter rape in successive phenophases [III, VI], explanations as Fig. 7.



Rys. 9. Rozkład wartości maksymalnego naprężenia zginającego wzdłuż łodygi odmiany Jupiter [V] (objaśnienia jak na Rys. 6).

Fig. 9. Distribution of values of maximum bending stress along the stem of the Jupiter rape variety, explanations as Fig. 6 [V].

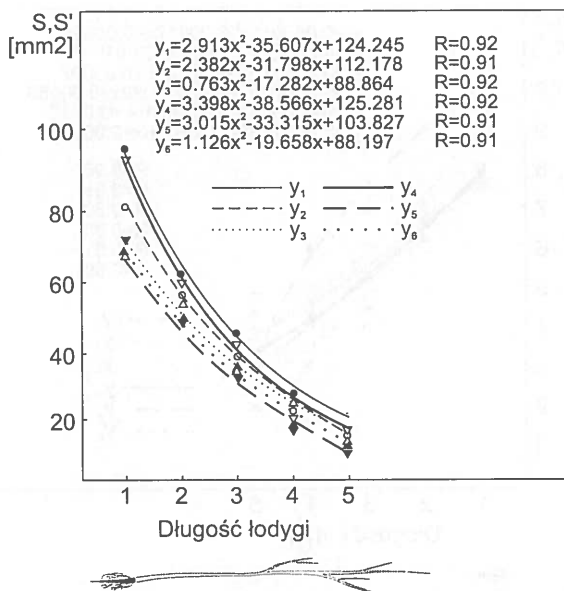


Rys. 10. Rozkład wartości sztywności wzdłuż łodygi rzepaku odm. Jupiter w czasie wegetacji roślin [IV] (objaśnienia jak na Rys.7).

Fig. 10. Distribution of the values of the rigidity along the stem of Jupiter rape during plant growth, explanations as Fig. 7 [IV].

Jantar 326 - 864 kg/m³, Jet Neuf 331 - 878 kg/m³. Stwierdzono zatem, że łodygi odmiany Jupiter charakteryzowały się najmniejszymi wartościami tych parametrów w porównaniu z odmianą Jantar i Jet Neuf. Na Rys. 11 i 12 przedstawiono przykład przebiegu zmienności powierzchni przekroju poprzecznego łodygi i gęstości w fazach fenologicznych dla odmiany Jupiter.

Natomiast charakterystyka substancji szkieletowych analizowanych odmian przedstawia się następująco. Określona procentowa zawartość ligniny, celulozy i hemicelulozy w łodygach wynosi: lignina dla odmiany Jupiter 13,6 - 27,9%, Jantar 11,0 - 17,9%, Jet Neuf 7,0 - 15,5%; celuloza dla odmiany Jupiter 7,2 - 16,9%, Jantar 24,7 - 32,6%, Jet Neuf 15,0 - 29,9% i hemiceluloza; odmiana Jupiter 7,3 - 15,5%, Jantar 12,6 - 14,9%, Jet Neuf 8,0 - 15,3%. Powyższe wyniki wskazują na dwukrotnie większą zawartość ligniny oraz dwukrotnie mniejszą zawartość celulozy u odmiany Jupiter w porównaniu z odmianą Jantar i Jet Neuf. Charakterystyka analizowanych odmian na podstawie składu chemicznego w łodygach była analogiczna do uzyskanej na podstawie innych parametrów strukturalnych tj. powierzchni przekroju poprzecznego i gęstości. Natomiast odmiany te nie różniły się istotnie zawartością



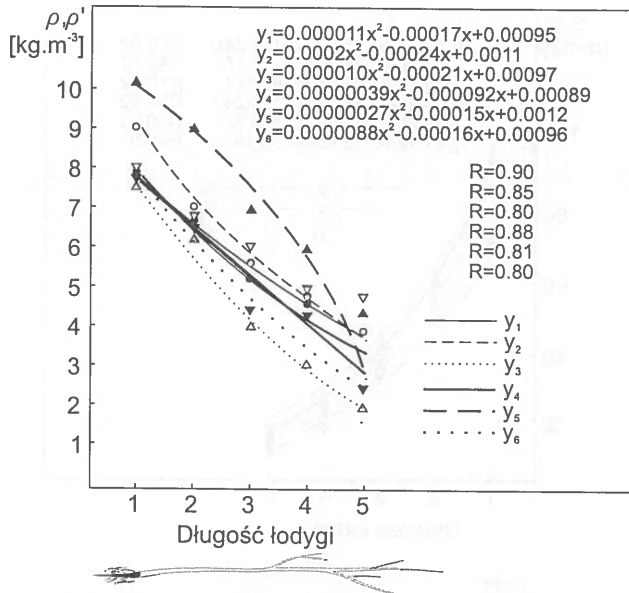
Rys. 11. Rozkład wartości powierzchni przekroju poprzecznego łodygi rzepaku odm. Jupiter w poszczególnych fazach fenologicznych [VI] (objaśnienia jak na Rys. 6).

Fig. 11. Distribution of the values of the cross-section area unit along the stem of Jupiter rape in successive phenophases, explanations as Fig. 6 [VI].

hemicelulozy w łodygach. Stwierdzono, zatem także na podstawie budowy łodygi różnice międzyodmianowe [VI].

Kolejna wielkość wyznaczana w procesie cięcia statycznego maksymalne naprężenie ścinające (τ_{\max}) wykazała silną odwrotnie proporcjonalną zależność zmienności od powierzchni przekroju poprzecznego łodygi. Wartości współczynników korelacji dla rozważanych odmian zawierały się w następujących przedziałach, $\tau_{\max} \times S, S'$: Jupiter $r = -0,48$ do $-0,60$, Jantar $r = -0,54$ do $-0,73$, Jet Neuf $r = -0,62$ do $-0,72$. Stwierdzono brak zależności zmienności tego parametru od gęstości łodygi. Przebieg zmienności maksymalnego naprężenia ścinającego na długości łodygi podczas wzrostu i dojrzewania roślin przedstawiono dla odmiany Jupiter (Rys. 8).

Wyznaczana w badaniach statycznych sztywność EI łodyg analizowanych odmian rzepaku zawierała się w następujących przedziałach zmienności: Jupiter $0,136 - 0,014 \text{ Nm}^2$, Jantar $0,147 - 0,021 \text{ Nm}^2$, Jet Neuf $0,141 - 0,019 \text{ Nm}^2$. Stwierdzono zależność zmienności sztywności od powierzchni przekroju poprzecznego i gęstości łodygi. Badania te wykazały różnice międzyodmianowe [V].



Rys. 12. Rozkład wartości gęstości wzdłuż łodygi rzepaku odm. Jupiter w poszczególnych fazach fenologicznych [VI]. (objaśnienia jak na Rys. 6).

Fig. 12. Distribution of the values of the density along the stem of Jupiter in successive phenophases, explanations as Fig. 6 [VI].

Przykład zmienności sztywności zarówno wzdłuż łodygi jak i w fazach fenologicznych przedstawiono dla odmiany Jupiter (Rys. 10).

Stwierdzono, że zmienność wyznaczonych w procesie statycznego zginania maksymalnych naprężeń zginających (σ_{\max} , σ'_{\max}) zarówno na długości łodygi jak i w czasie rozwoju rośliny istotnie zależy od gęstości, a współczynniki korelacji dla badanych odmian są następujące: Jupiter $r=0,19 - 0,74$, Jantar $r=0,33 - 0,81$, Jet Neuf $r=0,62 - 0,98$. Graficznie przedstawiono zmienność naprężeń zginających wzdłuż łodygi podczas rozwoju i wzrostu roślin dla odmiany Jupiter (Rys. 9).

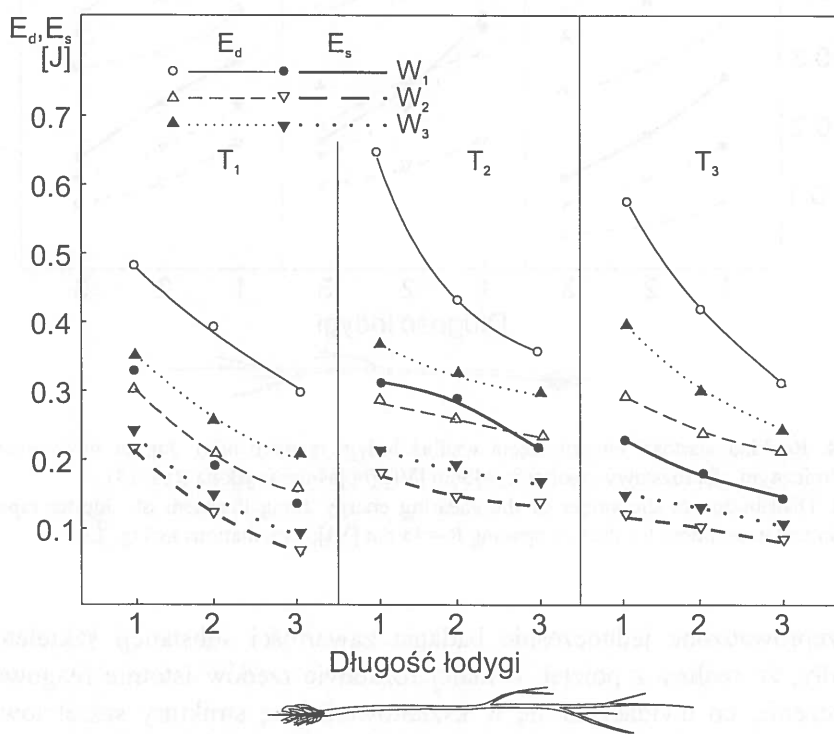
4.2. Wyniki badań z doświadczenia o zróżnicowanej rozstawie rzędów i obsadzie roślin/m² (agrotechnicznego)

W badaniach właściwości mechanicznych łodyg odmiany Jupiter z doświadczenia agrotechnicznego interpretację wyników przedstawiono za pomocą energii cięcia uzyskanej w teście dynamicznym i statycznym (II i VI).

Stwierdzono istotny wpływ rozstawu rzędów jak i obsady roślin/m² na zmienność parametrów mechanicznych łodyg.

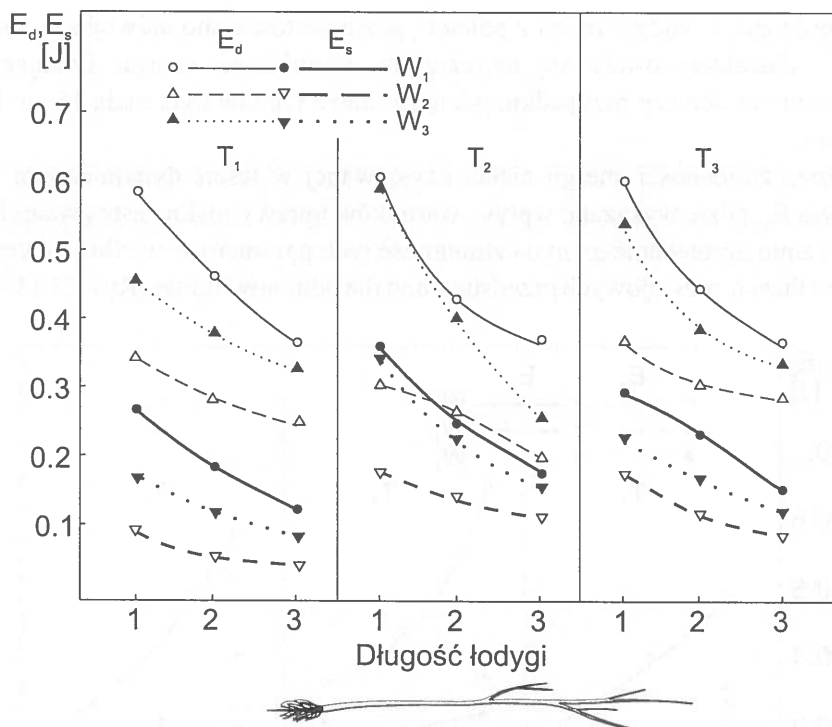
Stwierdzono, że łodygi roślin z poletek, gdzie zastosowano największą obsadę roślin/m², charakteryzowały się najniższymi wartościami energii ścinających. Spostrzeżenie to dotyczy przypadku, gdzie rozstawa rzędów była mała 15 cm jak i duża 45cm.

Przebieg zmienności energii cięcia uzyskiwanej w teście dynamicznym E_d i statycznym E_s , gdzie wykazano wpływ warunków uprawy roślin zastosowanych w doświadczeniu agrotechnicznym na zmienność tych parametrów wzdłuż łodygi jak również w fazach rozwojowych przedstawiono dla odmiany Jupiter (Rys. 13 i 14).



Rys. 13. Rozkład wartości energii cięcia wzdłuż łodygi rzepaku odm. Jupiter w doświadczeniu agrotechnicznym, dla rozstawy rzędów $R_1=15\text{cm}$ (\circ, \bullet - E_d, E_s dla $W_1=120$ nasion/m², Δ, ∇ - E_d, E_s dla $W_2=240$ nasion/m², $\blacktriangle, \blacktriangledown$ - E_d, E_s dla $W_4=480$ nasion/m² [VI].

Fig. 13. Distribution of the values of the shearing energy along the stem of Jupiter rape in the agrotechnical experiment during rape vegetation and row spacing $R_1=15\text{cm}$ (\circ, \bullet - E_d, E_s for $W_1=120$ seeds per m², Δ, ∇ - E_d, E_s dla $W_2=240$ seeds per m²; $\blacktriangle, \blacktriangledown$ - E_d, E_s for $W_4=480$ seeds per m²) [VI].



Rys. 14. Rozkład wartości energii cięcia wzdłuż łodygi rzepaku odm. Jupiter w doświadczeniu agrotechnicznym, dla rozstawy rzędów $R_2=45\text{cm}$ [VI] (objaśnienia jak na Rys. 13).

Fig. 14. Distribution of the values of the shearing energy along the stem of Jupiter rape in the agrotechnical experiment for the row spacing $R_2=45\text{ cm}$ [VI], explanations as Fig. 13.

Przeprowadzone jednocześnie badania zawartości substancji szkieletowych dowiodły, że rośliny z poletek o małej rozstawie rzędów istotnie reagowały na zagęszczenie, co uwidacznia się w kształtowaniu się struktury szkieletowej ich łodyg, zawierały więcej ligniny i mniej celulozy, zaś zawartość hemicelulozy nie zmieniała się istotnie.

Wartości liczbowe procentowej zawartości substancji szkieletowych w łodygach przedstawiały się następująco. Łodygi roślin przy rozstawie rzędów $R_1=15\text{ cm}$ zawierają nieco mniej hemicelulozy (12,3 – 15,1%) w porównaniu z rozstawą rzędów $R_4=45\text{ cm}$ (14,6 – 16,4%). Duże zagęszczenie roślin nie wpływa istotnie na procentową zawartość hemicelulozy w łodygach, a nawet powoduje obniżenie ich zawartości pod koniec dojrzewania. Z kolei łodygi odmiany Jupiter zawierają bardzo dużo celulozy, której procentowa zawartość przy małej rozstawie rzędów (15 cm)

jest nieznacznie wyższa (28,7 – 33,6%), aniżeli przy dużej rozstawie rzędów (45 cm) (24,6 – 31,2%). Podczas zagęszczania roślin, szczególnie przy małej rozstawie rzędów zawartość celulozy w łodygach nieznacznie zmniejsza się, zaś przy dużej rozstawie rzędów jest bardziej stabilna, a w miarę dojrzewania roślin obniża się. Analizując zaś, procentową zawartość ligniny w łodygach odmiany Jupiter stwierdzono, że jest porównywalna do hemicelulozy, przy małej rozstawie rzędów (15 cm) jest wyższa (10,6 – 15,3%) aniżeli przy dużej rozstawie (45 cm) (11,8 – 13,5%). Na poletkach, gdzie zastosowano skrajne gęstości wysiewu nasion uzyskano dużą stabilność zawartości ligniny podczas rozwoju roślin. Natomiast przy średnim zagęszczeniu roślin łodygi zawierały najwięcej ligniny w przypadku małej rozstawy rzędów (15 cm).

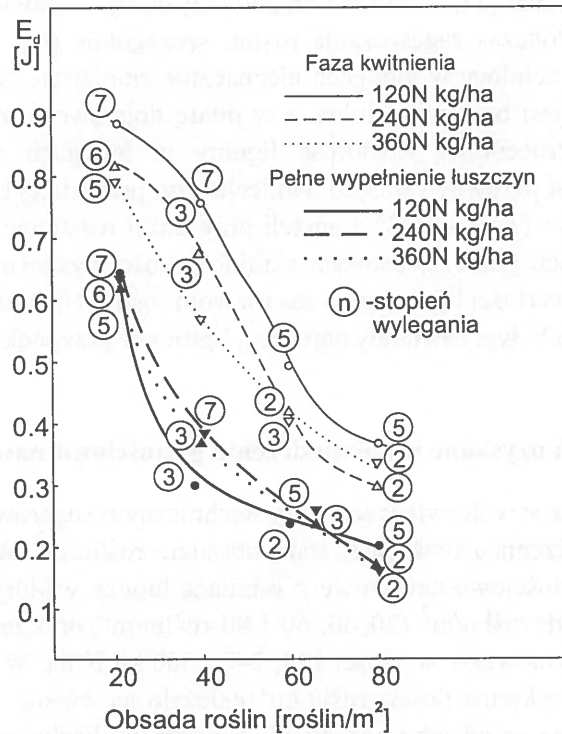
4.3. Wyniki badań uzyskane w doświadczeniu gęstościowo-nawozowym

Wnioski uzyskane w doświadczeniu agrotechnicznym sugerowały konieczność założenia doświadczenia o konkretnej, stałej obsadzie roślin/m². Wykonano, zatem doświadczenie gęstościowo-nawozowe z odmianą Jupiter, w którym zaplanowano zróżnicowaną obsadę roślin/m² (20, 40, 60 i 80 roślin/m²) oraz zastosowano różne dawki nawozu azotowego w ilości 120, 240 i 360 kg N/ha. W celu utworzenia doświadczenia z konkretną ilością roślin/m² należało na wiosnę kilka razy przeliczyć ilość roślin na poletkach i pozostawić zamierzoną liczbę roślin/m². Poletka przygotowano w trzech powtórzeniach.

Ten etap badań bazował na spostrzeżeniach uzyskanych w poprzednich doświadczeniach. Stwierdzono zatem, że dotychczasowe badania pozwoliły poznać zmienność właściwości mechanicznych wzdłuż łodygi, w których ujawnił się punkt charakterystyczny. Dlatego też w badaniach prowadzonych dla łodyg roślin pochodzących z doświadczenia gęstościowo-nawozowego został wybrany jeden punkt pomiarowy na łodydze, znajdujący się w pobliżu pierwszego odgałęzienia.

Oceny wylegania roślin dokonywano w skali 10-stopniowej, gdzie 10 oznacza brak wylegania, zaś 1 najbardziej zaawansowane wyleganie (łodyga tuż przy ziemi). Wyleganie nastąpiło na skutek silnego deszczu i wiatru w połowie maja i miało charakter paraboliczny [VII]. Stwierdzono zatem, że łodygi roślin, które wyległy były zgięte w kształcie paraboli i maksimum ich krzywizny przybliżało się do ziemi wraz ze wzrostem stopnia wylegania.

Wyniki analizy wpływu zróżnicowanej obsady roślin (zagęszczenie/m²) na wyleganie i zmienność właściwości mechanicznych łodyg wykazały istotny wpływ zagęszczenia roślin/m² na zmienność parametrów mechanicznych [VII, IX-XI, XIII].

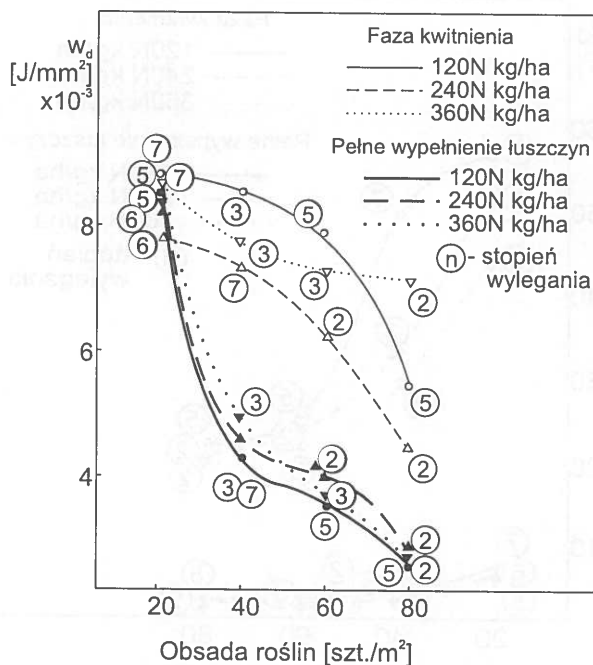


Rys. 15. Zmienność wartości energii cięcia (E_d) łądy odm. Jupiter dla różnej obsady roślin i dawki azotu w dwóch fazach fenologicznych VII]. (n) - stopień wylegania w skali od 1 do 10).

Fig.15. The variability of shearing energy (E_d) of Jupiter rape stalk for different sowing density and nitrogen fertilization at two phenological phases [VII]. (n) - 10-step scale of plants lodging).

Jednocześnie stwierdzono, że zagęszczenie roślin/ m^2 różnicuje rośliny pod względem odporności na wyleganie. Badania te dowiodły, że średnie wartości parametrów mechanicznych zmniejszyły się w miarę zagęszczania roślin/ m^2 , zaś stopień ich wylegania pogłębiał się.

Należy wspomnieć, że prace rolnicze wskazują wpływ zagęszczenia roślin i dawki nawozu azotowego na podatność roślin na wyleganie [16,37,38,63,64]. Analiza właściwości mechanicznych łądy rzepaku ozimego pochodzących z doświadczeń o zróżnicowanych warunkach gęstościowo-nawozowych potwierdziła ten związek. Oznacza to, że charakterystyka wytrzymałościowa łądy rzepaku wskazuje także wpływ zmiennej agrotechniki na odporność roślin na wyleganie.



Rys. 16. Zmienność wartości energii cięcia przypadającej na jednostkę przekroju poprzecznego (w_d) łodyg odmiany Jupiter dla różnej obsady [VII]. (Objaśnienia jak na Rys. 15).

Fig. 16. The variability of shearing energy per unit of cross section area (w_d) of Jupiter rape stalk for different sowing density and nitrogen fertilization at two phenological phases [VII], explanations as Fig. 15.

Graficznie przedstawiono przebieg zmienności właściwości mechanicznych łodyg odmiany Jupiter z doświadczenia gęstościowo-nawozowego wyrażanych za pomocą sztywności (EI), energii cięcia dynamicznego (E_d) i energii cięcia dynamicznego przypadającej na jednostkę przekroju poprzecznego (w_d) (Rys. 15-17).

Orientacyjne wartości niektórych spośród analizowanych parametrów mechanicznych uzyskane pod wpływem zawyżonych dawek azotu w ilości 120, 240, 360 kg/ha przedstawiają się następująco: E_d – 0,36-0,66 J, 0,14-0,64 J, 0,14-0,64 J w czasie kwitnienia oraz 0,36-0,88J, 0,28-0,82 J, 0,31-0,79 J podczas całkowitego wypełnienia łuszczyń. Z kolei średnie wartości EI łodyg roślin z poletek, gdzie zastosowano poszczególne dawki nawozu azotowego zawierały się w następujących przedziałach: 0,83-3,65 Jmm^2 , 0,78-3,71 Jmm^2 , 0,67-2,84 Jmm^2 podczas kwitnienia

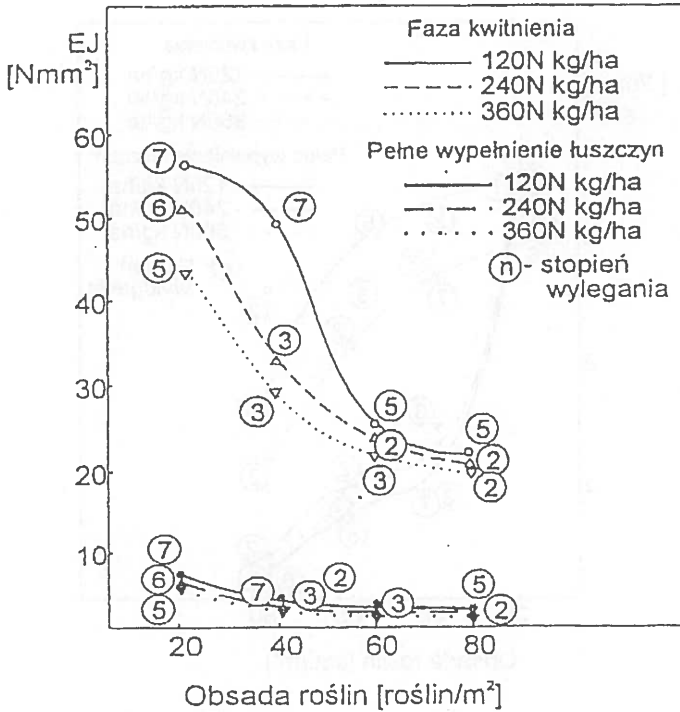


Fig. 17. Zmienność sztywności (EJ) łodyg odmiany Jupiter dla różnej obsady roślin i dawki azotu w dwóch fazach fenologicznych VII (n - stopień wylegania w skali od 1 do 10).

Fig. 17. The variability of the rigidity (EJ) of Jupiter rape stalk for different sowing density and nitrogen fertilization at two phenological phases VII (n - 10 step scale of plants lodging).

oraz 23,58-56,08 Jmm², 22,74-52,65 Jmm² i 22,77-45,03 Jmm² w czasie całkowitego wypełnienia łuszczyn.

W niniejszych badaniach stwierdzono, że rośliny z poletek o obsadzie 20 roślin/m² były najbardziej odporne na wyleganie, zaś rośliny z poletek o obsadzie 80 roślin/m² najsilniej wylegały. Stwierdzono, że zwiększenie dawki azotu powodowało silniejszy proces wylegania roślin, powodowało również przybliżenie do ziemi maksimum paraboli. Badania te jednocześnie wykazały, że wyleganie roślin pogłębiało się w miarę zagęszczania roślin/m². Stwierdzono tę zależność dla roślin uprawianych na poletkach, na których zastosowano rozważane poziomy nawożenia azotowego i stopień wylegania wynosił przy 120 kg N/ha: 6-7 dla 20 i 40 roślin/m², 5 dla 60 i 80 roślin/m²; przy 240 kg N/ha: 4-6 dla 20 roślin/ha, 3-4 dla 40 roślin/m², 2

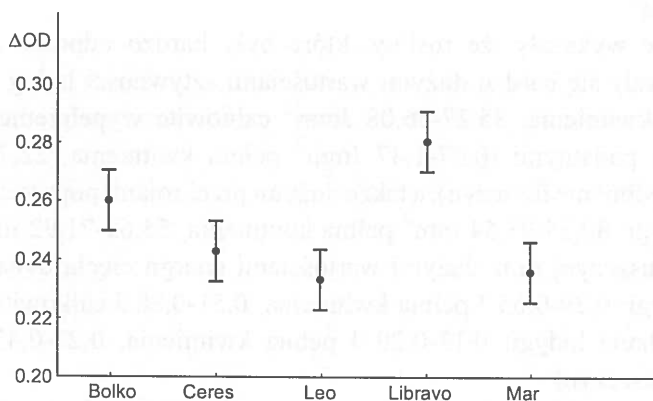
dla 60 i 80 roślin/m²; przy 360 kg N/ha: 5 dla 20 roślin/m², 2-3 dla 40 i 60 roślin/m² i 2 dla 80 roślin/m².

Badania te wykazały, że rośliny, które były bardzo odporne na wyleganie charakteryzowały się bardzo dużymi wartościami sztywności łodyg EI (0,69-3,71 Jmm² pełnia kwitnienia, 35,27-56,08 Jmm² całkowite wypełnienie łuszczyń) w porównaniu z podatnymi (0,67-1,47 Jmm² pełnia kwitnienia, 22,77-27,3 Jmm² całkowite wypełnienie łuszczyń), a także dużymi przekrojami poprzecznymi łodyg S (odporne łodygi: 80,58-93,54 mm² pełnia kwitnienia, 55,63-71,92 mm² całkowite wypełnienie łuszczyń) oraz dużymi wartościami energii cięcia dynamicznego Ed (odporne łodygi: 0,29-0,65 J pełnia kwitnienia, 0,51-0,88 J całkowite wypełnienie łuszczyń; podatne łodygi: 0,13-0,29 J pełnia kwitnienia, 0,27-0,47 J całkowite wypełnienie łuszczyń).

Porównując uzyskane wyniki z wynikami właściwości mechanicznych łodyg roślin uprawianych w warunkach standardowych stwierdzono jednoznacznie, że odporność roślin jest ściśle związana z charakterystyką wytrzymałościową łodyg. Stwierdzono, że wartości średnie łodyg roślin uprawianych w warunkach standardowych były wysokie i lokalizowały się w pobliżu wartości średnich uzyskanych dla łodyg roślin dość rzadko rosnących tzn. około 40 roślin/m² przy zastosowanej dawce azotu prowokującego wyleganie 120 kg/ha oraz 20 roślin/m², gdy nawożenie azotowe wynosiło 240 kg/ha.

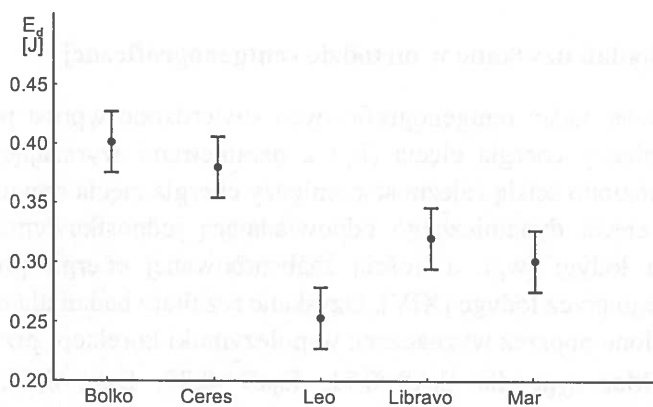
4.4. Wyniki badań uzyskane w metodzie rentgenograficznej

Na podstawie badań rentgenograficznych stwierdzono wprost proporcjonalną korelację pomiędzy energią cięcia (E_d) a parametrami wyrażającymi strukturę łodygi. Dowiedziono ścisłą zależność pomiędzy energią cięcia dynamicznego (E_d) oraz energią cięcia dynamicznego odpowiadającą jednostkowemu przekrojowi poprzecznemu łodygi (w_d), a ilością zaabsorbowanej energii promieniowania rentgenowskiego przez łodygę [XIV]. Uzyskane rezultaty badań dla odmiany Mar i Libravo określone poprzez wyznaczone współczynniki korelacji przedstawiają się następująco: Mar $r_{0,05}$ dla $E_d \times S = 0,71$, $E_d \times S' = 0,79$, $E_d \times \rho = 0,56$, $E_d \times \rho' = 0,48$, $E_d \times \Delta OD = 0,54$; Libravo $r_{0,05}$ dla $E_d \times S = 0,53$, $E_d \times S' = 0,61$, $E_d \times \rho = 0,71$, $E_d \times \rho' = 0,67$, $E_d \times \Delta OD = 0,77$). Z kolei wyniki uzyskanej zależności międzyodmianowej na podstawie energii cięcia oraz wielkości określającej absorpcję promieniowania rentgenowskiego przez łodygę dla odmiany Bolko, Leo, Mar, Libravo i Ceres przedstawiono graficznie (Rys.18-20).



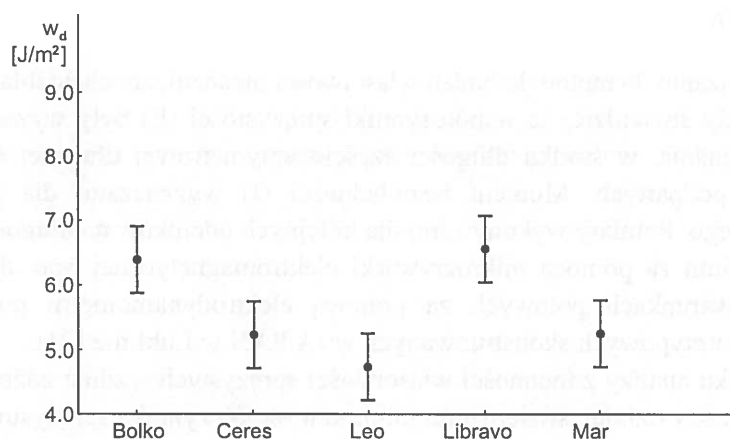
Rys. 18. Średnie wartości ΔOD i 95% półprzedziały ufności Tukey'a dla odmian rzepaku ozimego [XIV].

Fig. 18. Mean values and the 95% Tukey HSD intervals of ΔOD stems for the varieties of the winter rape [XIV].



Rys. 19. Średnie wartości E_d i 95% półprzedziały ufności Tukey'a dla odmian rzepaku ozimego [XIV].

Fig. 19. Mean values and the 95% Tukey HSD intervals of E_d stems for the varieties of the winter rape [XIV].



Rys. 20. Średnie wartości w_d i 95% półprzedziały ufności Tukey'a dla odmian rzepaku ozimego [XIV].

Fig. 20. Mean values and the 95% Tukey HSD intervals of w_d stems for the varieties of the winter rape [XIV].

5. DYSKUSJA

W nawiązaniu do metodyki badań właściwości mechanicznych źdźbła pszenicy ozimej należy stwierdzić, że współczynniki sprężystości (E) były wyznaczane w procesie zginania, w środku długości sześciocentymetrowej długości odcinków podwójnie podpartych. Moment bezwładności (I) wyznaczano dla przekroju cylindrycznego. Pomiary wykonywano dla kolejnych odcinków na długości źdźbła w laboratorium za pomocą mikrozrywarki elektromagnetycznej oraz dla całego źdźbła w warunkach polowych za pomocą elektrodynamometru polowego, aparatów prototypowych skonstruowanych w IA PAN w Lublinie [91].

W wyniku analizy zmienności właściwości sprężystych wzdłuż źdźbła dwóch odmian pszenicy ozimej, stwierdzono minimum współczynnika sprężystości, które zlokalizowane było na jednej trzeciej wysokości źdźbła od ziemi. Stwierdzono, że wartość współczynnika sprężystości wyznaczonego w procesie zginania odcinków źdźbła dla dwóch odmian pszenicy ozimej zmienia się w zakresie 50% wielkości, zaś dla całego źdźbła w granicach 60%.

Jednocześnie badania te dowiodły, na podstawie współczynnika sprężystości, występowanie istotnych różnic pomiędzy fazami fenologicznymi u rozpatrywanych odmian, a także stwierdzono istotne różnice międzyodmianowe. Należy nadmienić, że analizowane odmiany wykazywały zróżnicowaną podatność na wyleganie ocenioną w wyniku badań COBOR-u. Dlatego też uzyskane rezultaty wskazywały sensowność rozpoczynania badań właściwości mechanicznych łodyg innych roślin.

Jak już wspomniano łodyga rzepaku charakteryzuje się nieregularnym przekrojem poprzecznym, a zatem nie można było wyznaczać współczynnika sprężystości tak jak w przypadku źdźbła zbóż.

Rezultatem badań zawartych w niniejszej publikacji jest zastosowanie szerokiego zakresu metod pomiarowych oraz wskazanie najbardziej odpowiednich parametrów mechanicznych przydatnych do testowania łodyg rzepaku pod względem wytrzymałościowym z jednoczesnym uwzględnieniem zróżnicowanych warunków uprawy roślin i faz rozwojowych.

Zastosowanie testu statycznego w badaniach łodyg rzepaku pozwoliło uzyskać parametry mechaniczne łodyg poddawanych procesowi zginania i cięcia przy użyciu precyzyjnej aparatury wytrzymałościowej, która pozwalała śledzić cały proces zginania lub ścinania łodygi rzepaku i bardzo dokładnie zarejestrować zakres odkształceń sprężystych oraz moment wystąpienia trwałego odkształcenia. Z kolei w teście dynamicznym za pomocą aparatu pracującego na zasadzie młota wahadłowego rejestrowano stratę energii kinetycznej równoważną energii cięcia

łodygi rzepaku. Jednocześnie w obydwu testach z uwagi na możliwość dokonania precyzyjnego pomiaru nieregularnej powierzchni przekroju poprzecznego łodygi metodą optyczną, wyznaczano ilość pracy niezbędnej do przecięcia jednostkowego przekroju poprzecznego łodygi, która niewątpliwie wskazuje gęstość tkanki mechanicznej w poszczególnych wysokościach łodygi. Parametr ten okazał się szczególnie przydatny do testowania właściwości mechanicznych łodyg rzepaku, wskazał istnienie ekstremum na łodydze odmian rzepaku ozimego, które zlokalizowane jest w pobliżu pierwszego odgałęzienia łodygi.

Rezultaty badań, uzyskane w teście statycznego zginania, który przybliżył ocenę odporności łodygi w naturalnych warunkach wzrastających roślin, a także w teście statycznego i dynamicznego cięcia, które jednocześnie wskazują zakres pracy cięcia występującej podczas zbiorów, przyczyniły się do otrzymania charakterystyki wytrzymałościowej łodyg. Niniejsze badania wykazały dużą zmienność analizowanych parametrów mechanicznych zarówno wzdłuż łodygi, jak i w fazach fenologicznych. Stwierdzono istotne różnice międzyodmianowe [I-VI].

Rezultatem opracowanej metodyki badań właściwości mechanicznych łodyg rzepaku jest możliwość wyznaczenia maksymalnych naprężeń zginających, poprzez mierzalne powierzchnie przekroju poprzecznego łodygi (σ_{\max} , σ'_{\max}) [V].

Należy nadmienić, że zastosowanie metody optycznej do określenia powierzchni przekroju poprzecznego łodygi naturalnej oraz po usunięciu substancji miękiszowej pozwoliło opisowo wyznaczyć wskaźnik wytrzymałości zginanej łodygi rzepaku a następnie określić maksymalne naprężenia zginające.

Osiągnięciem tych badań jest wskazanie przydatności maksymalnego naprężenia zginającego wyrażonego poprzez mierzalne powierzchnie przekroju poprzecznego do testowania właściwości mechanicznych łodyg odmian rzepaku ozimego. Stwierdzono istotne różnice międzyodmianowe.

W wyniku konfrontacji charakterystyk wytrzymałościowych łodyg rzepaku uzyskanych w teście statycznego i dynamicznego cięcia przy pomocy parametru E_s i E_d stwierdzono, że obydwie energie identycznie charakteryzują właściwości mechaniczne odmian rzepaku ozimego. Powyższe stwierdzenie wskazuje na równorzędną możliwość stosowania testu statycznego i dynamicznego. Dlatego też w późniejszych badaniach posługiwano się jedynie testem dynamicznym.

Z kolei praca niezbędna do przecięcia jednostkowego przekroju poprzecznego łodygi w_s , a w szczególności w_d wskazały istnienie punktu charakterystycznego na długości łodygi w pobliżu pierwszego odgałęzienia rośliny, w którym to miejscu stwierdzono silne minimum. Wynik ten pozwolił ograniczyć kolejne badania dotyczące właściwości mechanicznych łodyg odmian, uprawianych w zróżnicowanych

warunkach agrotechnicznych, do przeprowadzania eksperymentu, w jednym charakterystycznym miejscu na wysokości łodygi. Wynik ten jest udokumentowany budową geometryczną łodygi.

Stwierdzono, że rezultaty badań dotyczące zmienności w_d na długości łodygi roślin rzepaku przedstawiają podobny przebieg zmienności wzdłuż łodygi do wielkości S'/S , uzyskując minimum wartości w pobliżu pierwszego odgałęzienia (S' - powierzchnia przekroju poprzecznego łodygi po usunięciu substancji miękiszowej), wykonanymi przez Skubisz i in. [95]. Wniosek ten wskazuje zależność energii cięcia przypadającej na jednostkę przekroju poprzecznego łodygi od jej geometrii.

Podobną charakterystykę do w_d wzdłuż łodygi rzepaku wykazała prędkość przechodzenia fali podłużnej w metodzie ultradźwiękowej, zastosowanej przez Skubisz i in. [95], a także poprzeczne naprężenie łodygi wyznaczane w procesie poprzecznego ściskania przez Skubisz i Blahovec [101], gdzie również wystąpiło głębokie minimum. W ten sposób istnienie charakterystycznego punktu na długości łodygi rzepaku zostało wyraźnie potwierdzone.

Analiza właściwości mechanicznych łodyg odmian rzepaku podczas rozwoju roślin wskazała maksimum wartości energii cięcia dynamicznego przypadającej na jednostkę przekroju poprzecznego łodygi (w_d) w czasie dojrzałości technicznej nasion. Wniosek ten został potwierdzony w późniejszych badaniach Skubisz i Rudko [102] prowadzonych równocześnie dla łuszczyń, który pozwolił sugerować termin zbioru rzepaku w dojrzałości technicznej, jako bardziej korzystny w porównaniu z dojrzałością pełną. Podczas dojrzałości technicznej łodygi rzepaku charakteryzują się największą wytrzymałością na ścinanie. Oznacza to, że jednostkowa gęstość tkanki mechanicznej w przekroju poprzecznym łodyg rzepaku ozimego jest największa w czasie dojrzałości technicznej nasion.

Wiadomo, że skład chemiczny łodygi zmienia się w czasie rozwoju roślin [112,113]. Badania omawiane w niniejszej publikacji wskazują, że łodygi rzepaku są silniejsze podczas dojrzałości technicznej nasion w porównaniu z dojrzałością pełną.

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano również charakterystykę strukturalną łodyg odmian rzepaku ozimego. Na podstawie zawartości substancji szkieletowych w łodygach: ligniny, celulozy i hemicelulozy stwierdzono różnice międzyodmianowe [VI]. Badania te potwierdziły przebieg charakterystyk strukturalnych uzyskanych na podstawie powierzchni przekrojów poprzecznych łodygi (S, S') i gęstości (ρ, ρ') dla analizowanych odmian.

Wyniki badań zawarte w przedstawionych pracach wykazały, że określone w zastosowanych testach mechanicznych właściwości wytrzymałościowe łodyg

odmian rzepaku zależą od ich strukturalnych parametrów. Stwierdzono istotne współczynniki korelacji pomiędzy analizowanymi parametrami mechanicznymi i strukturalnymi łądyg.

Na podstawie analizowanych parametrów mechanicznych odmian rzepaku ozimego w czasie rozwoju roślin stwierdzono istotne różnice, które wskazują na możliwość wykorzystania opracowanej metodyki w hodowli odmian. Uzyskano zatem, że parametry mechaniczne określone w procesie zginania i cięcia nadają się do testowania odmian. Badania te wykazały przydatność wyznaczanych parametrów mechanicznych dla hodowców nowych odmian rzepaku. Badania te również wskazały zakres energii cięcia łądyg rzepaku, który stanowi informację dla technologów zbioru.

Końcowym efektem realizacji celu niniejszych badań jest możliwość dokonania oceny odporności roślin na wyleganie na podstawie charakterystyki wytrzymałościowej łądyg. Przyczyniły się do tego faktu, zarówno szeroki zakres zastosowanych metod badawczych pozwalających określić parametry mechaniczne łądyg rzepaku, jak również zastosowanie zmiennych elementów agrotechniki (doświadczenie gęstościowo-nawozowe). Dotychczasowe prace, znane z literatury, wykonywane, w celu określenia właściwości wytrzymałościowych łądyg roślin, jednocześnie nie uwzględniały wszystkich tych aspektów. Badania te potraktowane kompleksowo przyczyniły się do oceny odporności roślin na wyleganie.

W wyniku tych badań stwierdzono zróżnicowanie właściwości mechanicznych łądyg spowodowane warunkami uprawy roślin. Stwierdzono istotny wpływ zagęszczenia roślin/m² zarówno na wyleganie roślin jak i zmienność charakterystyki wytrzymałościowej łądyg rzepaku. Badania te dowiodły, że rośliny w siewie rozrzedzonym posiadają najkorzystniejsze parametry mechaniczne łądyg pod względem odporności na wyleganie i charakteryzują się trzykrotnie większą sztywnością łądyg (EI) i dużymi wartościami energii cięcia dynamicznego (E_d) [VII, IX-XI, XIII].

Wyniki badań z doświadczeń uprawowo-nawozowych pozwoliły przeanalizować zmienność właściwości mechanicznych łądyg na odcinku od gleby do pierwszego odgałęzienia. Wyniki te sugerują, że obsada roślin 40/m² jest najbardziej korzystna, gdyż rośliny są silne zarówno pod względem charakterystyki wytrzymałościowej łądyg jak również odporne na wyleganie.

Jak wynika z przeglądu prac rolniczych dotyczących charakterystyki odmian rzepaku pod względem jakości i ilości uzyskiwanego plonu, obsada 40 roślin/m² jednocześnie stanowi dolną granicę możliwości pozostawienia roślin/m² na wiosnę, ze względu na opłacalność przewidywanego plonu [16,17,107].

Należy nadmienić, że dołączona w ostatnim etapie badań metoda rentgenograficzna przyczyniła się zarówno do pogłębienia oceny struktury łądyg, jak również wykazała możliwość określenia właściwości wytrzymałościowych łądyg odmian rzepaku. Równoczesne zastosowanie testu dynamicznego i metody rentgenograficznej w badaniach łądyg, wykazały, że wielkość określająca absorbcję promieniowania rentgenowskiego przez łądygę (ΔOD) istotnie koreluje z energią cięcia dynamicznego (E_d), a szczególnie silnie z pracą niezbędną do przecięcia jednostkowego przekroju poprzecznego łądygi (w_d), która określa niewątpliwie gęstość tkanki mechanicznej [VIII,XIV].

Osiągnięciem tych badań jest wykazanie przydatności metody rentgenograficznej do oceny właściwości wytrzymałościowych łądyg odmian rzepaku ozimego.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że opracowanie metodyki badań właściwości mechanicznych łądyg rzepaku z równoczesnym uwzględnieniem faz rozwojowych roślin oraz zmiennej agrotechniki, przyczyniło się do uzyskania rezultatów wskazujących na możliwość wykorzystania jej w hodowli nowych odmian. Analiza odmian na podstawie właściwości mechanicznych łądyg wykazała istotne różnice międzyodmianowe, a także pomiędzy fazami fenologicznymi w obrębie odmian oraz pozwoliła poznać zmienność parametrów mechanicznych wzdłuż łądygi. Tak więc, niniejsze badania poza tym, że przyczyniły się do poznania charakterystyki wytrzymałościowej łądyg odmian rzepaku wykazały też aspekt praktyczny.

Rozkład energii cięcia na długości łądygi stwarza możliwość uzyskania zakresu wartości energii cięcia, które w praktyce występują przy zbiorze mechanicznym roślin, a zatem badania te dostarczają informacji technologom zbioru.

Ostatecznym rezultatem tych badań, wynikającym z postawionego celu, jest stwierdzenie zależności pomiędzy parametrami mechanicznymi łądyg a odpornością roślin na wyleganie. Niniejsze badania poza tym, że dostarczają informacji hodowcom roślin, pozwoliły wskazać korzystne zagęszczenie roślin rzepaku/m² zarówno pod względem właściwości mechanicznych łądyg jak i odporności roślin na wyleganie (około 40 roślin/m²), a tym samym stanowią informację dla technologii uprawy.

W badaniach tych stwierdzono, że wysokość dawki azotu na poletkach przy korzystnym zagęszczeniu roślin/m² (w ilości 40/m²), w których jednocześnie uzyskiwano charakterystykę wytrzymałościową łądyg rzepaku odpornych na wyleganie, wynosiła 120 N kg/ha.

Przedstawione w pracach aspekty metodyczne w odniesieniu do badania właściwości mechanicznych łądyg rzepaku mogą być wykorzystane w podobnych badaniach innych roślin.

6. WNIOSKI

Przeprowadzone badania, których wyniki podano w 14. pracach pozwoliły określić właściwości mechaniczne łodyg odmian rzepaku, wyrażonych za pomocą parametrów mechanicznych wyznaczanych w procesie statycznego zginania oraz statycznego i dynamicznego cięcia, jak również pozwoliły dokonać wyboru najbardziej korzystnych parametrów mechanicznych łodyg rzepaku do oceny ich wytrzymałości pod kątem odporności roślin na wyleganie.

1. Opracowana metodyka badań właściwości mechanicznych łodyg roślin rzepaku uwzględnia następujące parametry: sztywność (EI), maksymalne naprężenie zginające (σ_{\max}), maksymalne naprężenie ścinające (τ_{\max}), energię cięcia statycznego (E_s) i dynamicznego (E_d) oraz pracę niezbędną do przecięcia jednostkowej powierzchni przekroju poprzecznego łodygi w badaniach statycznych (w_s) i dynamicznych (w_d).

2. Istnieje duża zmienność parametrów mechanicznych łodyg rzepaku ozimego zarówno wzdłuż łodygi jak i w fazach wzrostowych. Badania wykazały różnicowanie międzyodmianowe.

3. Energia cięcia wyznaczona w badaniach dynamicznych (E_d) i statycznych (E_s) porównywalnie ocenia różnice międzyodmianowe. Stwierdzono wysoką dodatnią korelację pomiędzy energią cięcia wyznaczaną w teście dynamicznym i statycznym. Wniosek ten sugeruje możliwość wyboru rodzaju testu cięcia łodygi rzepaku. Jednocześnie powyższe stwierdzenie wskazuje na korzystniejsze użycie testu dynamicznego cięcia, który nie wymaga przeliczeń. W niniejszych badaniach, wniosek ten, istotnie przyczynił się do dokonania wyboru testu cięcia (dynamicznego) podczas testowania obszernego materiału z doświadczeń uprawowo-nawozowych.

4. Energia cięcia dynamicznego przypadająca na jednostkę przekroju poprzecznego łodygi (w_d) osiągała minimum wartości w pobliżu pierwszego odgałęzienia (w 2-im lub 3-im odcinku badawczym). Wielkość ta wskazała miejsce charakterystyczne na długości łodygi. Powyższe stwierdzenie umożliwia ograniczenie ilości miejsc pomiarowych na wysokości łodygi. Dlatego też w doświadczeniu gęstościowo-nawozowym badania wytrzymałościowe wykonywano w miejscu charakterystycznym łodygi.

5. Metoda wyznaczania naprężeń zginających wyrażonych poprzez mierzone powierzchnie przekroju poprzecznego łodygi (σ_{\max} , σ'_{\max}) pozwala testować mechaniczne właściwości łodyg roślin rzepaku. Wniosek ten wskazuje na możliwość wyznaczania maksymalnych naprężeń zginających dla łodyg o przekroju poprzecznym nieregularnym.

6. Stwierdzono istotną zależność pomiędzy właściwościami mechanicznymi łodyg a odpornością roślin rzepaku na wyleganie. Rośliny, które były odporne na wyleganie charakteryzowały się bardzo dużymi wartościami sztywności łodyg (EI), a także dużymi przekrojami poprzecznymi łodyg (S) oraz dużymi wartościami energii cięcia dynamicznego (E_d).

7. Na zmienność właściwości mechanicznych łodyg rzepaku istotny wpływ wywierały: rozstawa rzędów oraz obsada roślin na m^2 . Zagęszczenie roślin/ m^2 zwiększało stopień wylegania roślin oraz zmniejszało średnie wartości analizowanych parametrów mechanicznych. Osada roślin/ m^2 w ilości 40 jest najbardziej korzystna pod względem charakterystyki wytrzymałościowej łodyg rzepaku odpornych na wyleganie.

8. Zastosowanie metody rentgenograficznej znacznie poszerzyło możliwości wyznaczania podatności łodyg rzepaku na ścinanie i przyczyniło się do bardziej szczegółowej oceny wpływu budowy strukturalnej łodyg na ich właściwości wytrzymałościowe. Występuje istotna korelacja pomiędzy parametrami wyrażającymi absorpcję promieniowania rentgenowskiego przez łodygę a parametrami określającymi właściwości mechaniczne łodyg.

7. PIŚMIENNICTWO

1. **Ahlgrimm H.J.:** Kraft-Dehnungsverhalten von Einzelgrashalmen, Landbauforschung Volkenrode, Bd. 24, H. 2, 105-110, 1974.
2. **Ahlgrimm H.J.:** Der Einfluss physiologischer und morphologischer Faktoren auf die Festigkeit von Pflanzenshalmen am Beispiel von Wiesenlieschgras. Doktorarbeit aus dem Institut für Landmaschinenforschung der FAL. Braunschweig-Volkenrode. 1977.
3. **Ahlgrimm H. J.:** The strength properties of grass stalks subjected to tensile-, shear- and bending forces. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 203, 123-144, 1978.
4. **Ahlgrimm H. J.:** Die Wirkung einiger physiologischer und morphologischer Parameter auf die Halmfestigkeit. Grundlagen der Landtechnik, 2, 1979.
5. **Akritidis C. B.:** The Mechanical Characteristics of Maize Stalks in Relation to the Characteristics of Cutting Blade. J. Agric. Engng. Res., 19, 1974.
6. **Anikeeva L. A.:** Polysaccharides in the cell walls of some short-strawed winter wheat varieties. Povysk. Prod. Ustoi. Zern. Kult. Alma-Ata, 236-240, 1979.
7. **Bashford L. I., Maranville J. W., Week S. A., Campbell R.:** Mechanical properties affecting lodging of sorgghum. Trans. ASAE, 19, 962-966, 1976.
8. **Beckmann A., Kromer K. H.:** Evaluation of test standards for measuring the fibre content and strength values of flax. Zemedelska Technika, 41(3), 121-124, 1995.
9. **Baier A.:** Investigations into lodging resistance of cereal crops and methods for its estimation. Bayer. Landw., J. b. 42, 643-666, 1965.
10. **Bauer F.:** Some recent indirect methods for determining lodging resistance in wheat. Z Acker und Pflbau., 118, 70-80, 1964.
11. **Blahovec J., Patočka K., Reznicek R.:** Mechanical properties of cereal stems and winter rape stalks. In: Physical Properties of Agricultural Materials, (Ed. R. Reznicek). University of Agricultural, Prague, 29-103, 1984.
12. **Blahovec J., Skubisz G.:** Mechanické vlastnosti lodyhy a korene ozime repky. Zemedelska Technika, 36 (LXIII), 5, 257-268, 1990.
13. **Burmistrova M. F. i in.:** Fiziko-miechaniceskije svojstva sielskochozajstwiennych rastienij, GJSL, Moskwa 1956.
14. **Bury M., Songin W.:** Plonowanie rzepaku ozimego w zależności od niektórych czynników agrotechnicznych w warunkach produkcyjnych województwa szczecińskiego. Zesz. Probl. IHAR "Wyniki badań za rok 1989", 235-240, 1989.
15. **Chigantsev N. P.:** Sources of lodging resistance in barley. Sb. Nauch. Trud. po Prikl. Bot. Genet. Selek., 95, 108-110, 1985.
16. **Dembiński F.:** Rośliny oleiste. PWRiL, Warszawa, 1975.
17. **Dembiński F.:** Jak uprawiać rzepak i rzepik. PWRiL Warszawa, 1983.
18. **Doliński R.:** Wpływ środowiska na parametry mechaniczne i cechy geometryczne źdźbła czternastu odmian pszenicy ozimej. Hodowla pszenicy. Prace Grupy Problemowej. Wyd. IHAR, Radzików, 47-89, 1986.
19. **Doliński R., Tarkowski Cz., Bichta J.:** Badania nad odziedziczalnością wybranych cech fizycznych źdźbła pszenicy ozimej. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 383, 133-142, 1989.
20. **Doliński R.:** Inheritance of elastic properties of the stem sclerenchyma in winter wheat hybrids (*Triticum aestivum* L.). Genet. Pol., 31, 199-204, 1990.
21. **Doliński R., Tarkowski Cz., Bichta J.:** Variability and heritability of some chosen mechanical properties and morphological features of hexaploid winter triticale stalk. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 399, 35-42, 1993.

22. **Doliński R.:** Zmienność, odziedziczalność i współzależność właściwości mechanicznych i cech morfologicznych źdźbła pszenicy zwyczajnej (*Triticum aestivum* L.) warunkujących odporność na wyleganie. WAR Lublin. Seria Wydawnicza-Rozprawy Naukowe 177, 1- 68, 1995.
23. **Duncan J., Supuka J.:** Prispěvek k studiu modulov pružnosti v smyku G internodii stieblí jácmena odrod Dvoran a Sladar. Acta technol. Agric. Sb. Vys. Sk. Pol.-hosp. Nitre Prevadz-ekon. Fakul., 11, 115-121, 1973.
24. **Evans P. S.:** Leaf strength studies of pasture grasses. II: Strength, cellulose content and sclerenchyma tissue proportions of eight grasses grown as single plants. Journ. of Agric. Scien., 69, 175-181, 1967.
25. **Evans P. S.:** A study of leaf strength in four ryegrass varieties. New Zeland Journ. of Agric. Res., 7, 508-513, 1974.
26. **Gawda H.:** Attempt at applying the ultrasound method for determining the Young's modulus of cereal stalk. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 203, 145-152, 1978.
27. **Gawda H., Haman J.:** An ultrasonic method of determining Young's modulus in cereal plants. ASAE, 26, 250-254, 1983.
28. **Gawda H.:** Badania submikroskopowej struktury ścian komórkowych roślin zbożowych. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 316, 49-67, 1987.
29. **Gawda H., Trębacz H.:** Ocena właściwości mechanicznych łodyg lnu metodą ultradźwiękową. Materiały Konferencji Naukowej nt. Mechaniczne Właściwości Materiałów Rolniczych, Lublin, 73-75, 1997.
30. **Gowin J.:** Some tensile and bending characteristics of wheat stalks. Zesz. Probl. Nauk Roln., 399, 87-89, 1993.
31. **Gowin J.:** Metody wyznaczania geometrii przekroju poprzecznego źdźbła zbóż. Materiały Konferencji Naukowej nt. Mechaniczne Właściwości Materiałów Rolniczych, Lublin, 69-72, 1997.
32. **Grafius J. E., Brown H. M.:** Lodging resistance in oats. Agron. J., 46, 414-418, 1954.
33. **Grafius J. E.:** Observations on the lodging resistance formula. Agron. J., 50, 263-264, 1958.
34. **Haman J., Szot B., Korejtko J., Grundas S.:** Opory i energia statycznego źdźbła pszenicy i żyta. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 203, 191-199, 1978.
35. **Heyland J. V.:** Untersuchungen uber rlauf der Einlagerung von Gerustsubstanzen Hinblich auf die Standfestigkeit. Zeit. f. Acker.-u Pflanzenb., 101, 335-346, 1956.
36. **Hess D. C., Shands H. L.:** Lodging response of certain selections of oats (*Avena sativa* L.) and their hybrid progenies. Crop Sci., 6, 574-577, 1966.
37. **Horodyski A., Muśnicki Cz., Orłowska T.:** Wpływ rozstawy i ilości wysiewu na plonowanie różnych typów odmian rzepaku ozimego. Zesz. Probl. IHAR "Wyniki badań nad rzepakiem ozimym 1985", 123-135, 1985.
38. **Jasińska Z., Malarz W., Budzyński W., Majkowski K.:** Wpływ rozstawy rzędów i ilości wysiewu na rozwój i plon rzepaku ozimego. Roczn. Nauk Roln. Ser. A, 108, 1, 135-147, 1988.
39. **Jeżowski S.:** Variation, correlation and heritability of characters determining lodging of spring barley (*Hordeum vulgare* L.). II. Analysis of relationship between lodging grade and some morphological characters of spring barley varieties. Genet. Pol. 22, 45-61, 1981a.
40. **Jeżowski S.:** Variation, correlation and heritability of characters determining lodging of spring barley (*Hordeum vulgare* L.). III. Analysis of relationship between lodging grade and selected morphological and physical indices of the stem. Genet. Pol. 22, 149-162, 1981b.
41. **Jeżowski S., Adamski T., Surma M.:** Diallel analysis of characters determining lodging resistance of barley (*Hordeum vulgare* L.). I. An estimate of parental forms and physical characters of the stem. Genet. Pol., 28, 333-340, 1987a.

42. **Jeżowski S., Surma M., Adamski T.:** Diallel analysis of characters determining lodging resistance of barley (*Hordeum vulgare* L.). III. A genetic analysis of lodging grade and physical properties of the stem. *Genet. Pol.*, 29, 275-280, 1988.
43. **Jeżowski S., Adamski T., Surma M.:** Analiza dialleliczna cech determinujących odporność na wyleganie jęczmienia (mieszkańców F2). II. Dziedziczenie stopnia wylegania oraz cech fizycznych źdźbła. *Hodowla Rośl. Nasienn.* 4, 1-3, 1992.
44. **Jeżowski S., Surma M., Adamski T.:** Parametry genetyczne wybranych cech morfologicznych i fizycznych źdźbła linii DH jęczmienia. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, 223, 213-221, 1993.
45. **Jeżowski S.:** Analiza genetyczna cech determinujących odporność na wyleganie jęczmienia jarego (*Hordeum vulgare* L.). Instytut Genetyki Roślin PAN, monografia, Nr 4, Poznań 1996.
46. **Kaczorowski T.:** Zjawisko wylegania zbóż z punktu widzenia mechaniki źdźbła. *JUNG. Puławy*. 1970.
47. **Kalman L.:** Morphological and static parameters of maize ears. *Noveny-termeles.* 23, 4, 313-319, 1974.
48. **Kirilov J. I.:** Metod ocenki ustojivosti sortov zernovych kultur k prikorenevomu poleganiju. *Selek. Semenov.*, 2, 70-72, 1957.
49. **Koper R., Gowin J.:** Photoelastic investigation of the static of stress in the cross-section of the straw stalk. *Zesz. Probl. Nauk Roln.*, 203, 201-206, 1978.
50. **Kurzyk T.:** Dependence of mechanical properties on some parameters of Jara wheat stalks. *Proceedings of the 4-th ICPPAM, Rostock*, 437-441, 1989.
51. **Kurzyk T., Gowin J., Koper R.:** Determination of physical properties of stalks of some selected wheat varieties. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 389, 79-88, 1991.
52. **Kurzyk T.:** Zależność właściwości mechanicznych źdźbeł pszenicy od wilgotności. *Materiały Konferencji Naukowej nt. Mechaniczne Właściwości Materiałów Rolniczych, Lublin*, 31-32, 1997.
53. **Kurzyk T.:** Comparison of wheat stalks mechanical properties tests carried out by means of ultrasonic and strength testing methods. *Proceedings of International Conference, Trends in Agricultural Engineering, Prague*, 63-67, 1999.
54. **Kurzyk T.:** Porównawcza ocena właściwości mechanicznych źdźbeł pszenicy Tercja badanych metodami ultradźwiękową i wytrzymałościową. *Probl. Inżyn. Roln.*, 4(26), 34-40, 1999.
55. **Liaskovskij M. I., Kalinin F. L.:** Dynamics of phenolic compounds and lignin in the stem of winter wheat and development of lodging resistance. *Fizjol. Bioch. Kult. Rast.* 9, 359-365, 1977.
56. **Lu R., Bartsch J. A., Ruina A.:** Mechanical properties of the corn stalks under radial compression. *ASAE Paper No. 87-6067, ASAE St. Joseph (USA)*, 1987.
57. **Lu R., Bartsch J. A., Ruina A.:** Mechanical properties of the corn stalks under radial compression. *ASAE Paper No. 87-6067, ASAE St. Joseph (USA)*, 1987b.
58. **Mc Ronald D.M., Mc Nulty P.B.:** Mechanical and properties of grasses. *Transactions of the ASAE*, 23, 816-821, 1980.
59. **Meicenheimer R. D.:** Analysis of *Linum usitatissimum* stem tissues. *American Journal of Botany.* 72, 6, 805- 809, 1985.
60. **Miczyński J.:** Strength computation of statical corn stalk loading. *Zesz. Probl. Nauk Roln.*, 203, 207-213, 1978.
61. **Mohsenin N. N.:** Physical properties of plant and animal materials. *Gordon and Breich Science Publishers, New York-London-Paris*, 1970.
62. **Moustafa S. M. A., Stout B.A., Bradley W. A.:** Elastic and inelastic Stability of a Biological Structure. *Journ. Agric. Engng. Res.*, 13, 1, 64-82, 1968.
63. **Muller Z.:** Testing of mechanical properties in fibrous products. *Zesz. Probl. Nauk Roln.*, 203, 339-347, 1978.

64. **Muller Z., Skubisz G.:** Repceszar hajlitasi torovizgalatanak eredmenyel, MTA-MEM Agrar Muszaki Bizottsag, Kutatasi es Fejlesztési Tanacsokozas, Godollo, 1990.
65. **Multamaki K.:** On the factors affecting resistance to lodging in some varieties of spring cereals. Valt. Maatalouskoet. Julk. Publ., 195, 19, 1962.
66. **Murphy H. C., Petr F., Frey K. J.:** Lodging resistance studies in oats. I Comparing methods of testing and sources for straw strength. Agron. J., 50, 609-611, 1958.
67. **Muśnicki Cz., Horodyski A., Muśnicka B.:** Kształtowanie się cech morfologicznych i właściwości fizjologicznych u nowych odmian rzepaku ozimego oraz ich wpływ na ilość i jakość plonów. Zesz. Probl. IHAR "Wyniki badań nad rzepakiem ozimym, lata 1980-1982", 133-140, 1982.
68. **Muśnicki Cz., Jasińska B., Horodyski A.:** Reakcje podwójnie ulepszonych odmian rzepaku ozimego na zagęszczenie roślin w łanie. Zesz. Probl. IHAR, "Wyniki badań za rok 1990", cz. II, 5-16, 1990.
69. **Muśnicki Cz., Jodłowski M.:** Wpływ nawożenia azotowego na plonowanie różnych typów odmian rzepaku ozimego. Zesz. Probl. IHAR "Wyniki badań nad rzepakiem ozimym 1985", 135-145, 1985.
70. **Muśnicki Cz., Muśnicka B.:** Wpływ terminu siewu na plonowanie różnych typów odmian rzepaku ozimego. Zesz. Probl. IHAR "Wyniki badań nad rzepakiem ozimym 1985", 107-122, 1985.
71. **Muśnicki Cz., Toboła P., Muśnicka B.:** Wpływ niektórych czynników agrotechnicznych i siedliskowych na jakość plonu rzepaku ozimego. IHAR Rośliny Oleiste, Tom XX, 459-468, 1999.
72. **Neenan M., Spencer-Smith J. L.:** An analysis of the problem of lodging with particular reference to wheat and barley. J. Agric. Sci. Camb., 85, 495-507, 1975.
73. **Nelson C.:** A mechanical method for measuring resistance of wheat. Agron. J., 52, 611-612, 1962.
74. **Oda K., Suzuki M., Udegawa T.:** Varietal Analysis of Physical Characters in wheat and Barley Plants Relating to Lodging Index. Bulletin of the National Institute of Agricultural Sciences. Tokyo. D, 15, 55-91, 1966.
75. **Oh Y. S.:** Study on characteristics relating varieties and promising lines of naked barley. Res. Reports. Rural Dev. Adm. Korea Rep. Crops: 139-147, 1985.
76. **Persson S.:** Mechanics of cutting plant material. St. Joseph, Michigan: ASAE, 1987.
77. **Pinthus M. J.:** Lodging in wheat, barley, and oats: the phenomenon, its causes, and preventive measures. Adv. in Agron., 25, 209-263, 1973.
78. **Pravdiva N. P.:** Dynamics of carbohydrate metabolism in winter wheat varieties in relation to lodging resistance. Vest. Kijev. Univ. Biol. 22, 9-13, 1980.
79. **Prince R. P., Wolf D.B., Bartok J. W.:** The Physical Property Measurement of Forage Stalks. Bulletin 388, Agricultural Experimentation Station, University of Connecticut. Storre, 1965.
80. **Przeszlakowska M.:** Skład chemiczny źdźbła zbóż i jego znaczenie w odporności na wyleganie. Post. Nauk Roln. 2, 41-55, 1975.
81. **Putz P.:** Physical properties data base for food and agricultural products. Proc. 4th ICPPAM, Rostock 1989.
82. **Ruebenbauer T.:** Zagadnienie odporności na wyleganie w hodowli zbóż. Post. Wiedzy Roln. 4, 26-29, 1952.
83. **Reznicek R., Blahovec J., Patočka K., Szot B.:** Mechanical properties of the stalks of winter rape. II. International Conference on Physical Properties of Agricultural Materials. Proceedings, Hunday, 39, 1980.
84. **Reznicek R.:** Physical Properties of Agricultural Materials. University of Agricultural, Prague, 1984.
85. **Sager D., Putz P.:** Mechanical properties of flax fibres. Int. Agrophysics, 8(4), 681-684, 1994.

86. **Schultzke D., Heyter F., Seidler K. H.:** Eine Methode zur Measung der Halmstabilitat. Saat. U. Pfl. Gut., 15 (5), 76-78, 1974.
87. **Seko H.:** Studies on lodging in rice plants. Bull., Kyushu Natl. Agric. Exp. Stn. 7, 419-499, 1962.
88. **Siemienow W.F.:** Uprugost stieblej sielskochozjajstwiennych kultur. Miechanizacja i Elietri-fikacja Socjalisticzieskowo Sielskowo Chozjajstwa, 1, 44-45, 1971.
89. **Skopik P.:** Relationship between the change of the cellulose and lignin contents in the haulm of spring barley and lodging rate of the same variety. Rostl. Vyroba 42, 265-273, 1969.
90. **Skubisz G.:** The determination of the Young's modulus of a stalk of winter wheat on the basis of field and laboratory measurements. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 203, 215-224, 1978.
91. **Skubisz G.:** Zagadnienie sprężystości źdźbła zbóż. Zeszyty Agrofizyki, 38, 1982.
92. **Skubisz G.:** Czynniki wpływające na zmienność parametrów mechanicznych źdźbła rodów pszenicy ozimej 2708 i 831. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 321, 161-173, 1987.
93. **Skubisz G., Tys J.:** An evaluation of the mechanical properties of winter rape stems. 7 International Rapeseed Congress, Poznań, 1987.
94. **Skubisz G.:** An assessment of the variability of the mechanical properties of the stalk of winter wheat cultivated under natural and artificial conditions. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 378, 97-107, 1989.
95. **Skubisz G., Tys J., Blahovec J.:** Mechanical properties of the stems of winter rape. Int. Agrophysics, 5(3-4), 205-220, 1989.
96. **Skubisz G., Muller Z.:** Determination of the physical properties of wheat stalks. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 389, 97-103, 1991.
97. **Skubisz G., Muller Z.:** Results of bending-breaking investigation of rape stalk. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 397, 65-68, 1991.
98. **Skubisz G.:** Metody i aparatura do badań agrofizycznych. Ed.: Gliński J., Konstankiewicz K., II. Materiał roślinny, Problemy Agrofizyki, 65, 7-18, 1991.
99. **Skubisz G., Vielikanov L.:** Określenie właściwości mechanicznych łodyg rzepaku ozimego. I Zjazd Naukowy PTF, Referaty i doniesienia, Lublin, 87-88, 1997.
100. **Skubisz G.:** Ocena podatności łodyg rzepaku na ścinanie. Materiały Konferencji Naukowej nt. Mechaniczne Właściwości Materiałów Rolniczych, Lublin, 72-73, 1997.
101. **Skubisz G., Blahovec J.:** A method for rapid quasi static testing of the mechanical properties of plant stalks. Zemedelska Technika, 48 (3), 93-97, 1997.
102. **Skubisz G., Rudko T.:** Ocena właściwości mechanicznych wysuszonych łodyg i łuszczyn rzepaku. Rośliny Oleiste, XIX, 523-528, 1998.
103. **Skubisz G.:** Studies on the Mechanical Properties of Black Currant Bush Shoots. Flow and Deformation in Biology and Environment, Czech University of Agriculture in Prague, 133-136, 1998.
104. **Skubisz G.:** Opracowanie metodyki określania właściwości mechanicznych łodyg grochu. II Zjazd Naukowy PTF, Doniesienia, Lublin, wrzesień 2000.
105. **Smirnova N. G.:** Rentgenograficheskoe izuchenie siemian listviennych dreviesnych rastienii. Nauka, Moskwa 1978.
106. **Sowa W.:** Badania nad odpornością na wyleganie słomy czterech odmian jęczmienia ozimego. HRAiN., 5, 99-115, 1962.
107. **Spahr K.:** Untersuchungen uber die Standfestigkeit von Sommergerste. Zeit. f. Acker-u. Pflanzenb., 110, 299-331, 1960.
108. **Suggs C. W., Splinter W. E.:** Mechanical Properties of Tobacce Stalks. Transactions of the ASAE, 8, 3, 361-364, 1965.
109. **Surewicz W.:** Podstawy technologii mas włóknistych. WNT Warszawa 1971.

110. **Szczygielski T., Owczarek E., Wyszyński Z.:** Wzrost, rozwój i plonowanie rzepaku ozimego w różnych warunkach przyrodniczych i agrotechnicznych. Zesz. Probl. IHAR "Wyniki badań za rok 1990", cz. II, 17-32, 1990.
111. **Szot B.:** The role of soil conditions in the formation of some mechanical properties of cereals. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 203, 69-81, 1978.
112. **Ślusarczyk M.:** Zmienność występowania substancji szkieletowych u różnych gatunków i odmian zbóż. Praca doktorska IUNG Puławy, 1971.
113. **Ślusarczyk M.:** Zagadnienie odporności zbóż na wyleganie. Nowe Roln., 5, 37-44, 1973.
114. **Śpievok D.:** Über die Biegesteifigkeit von Futterhalmen. Deutsche Agrartechnik, Ed. 20, H. 10, 457-459, 1970.
115. **Timoszenko S. P., Gere J. B.:** Teoria stateczności sprężystej. Arkady, Warszawa, 1963.
116. **Uctum S., Hungerbuhler K.:** Statische Berechnung der Standfestigkeit von Getreide unter Berücksichtigung der Wirkung von CCC. Zeit. f. Acker-u. Pflanzenb., 128, H. 1, 1-16, 1968.
117. **Vaidyla S. M., Ram M.:** Lodging indices for barley. Sci. Cult., 48, 315-316, 1982.
118. **Walkowski T. i zespół:** Rzepak Ozimy, IHAR Poznań, 1999.
119. **Wąs L.:** Metody oceny sztywności słomy u pszenic. HRAiN., 14, 214-242, 1970.
120. **Zenisceva L., Stankova J.:** Príspevek k morfológickym a anatomickým vlastnostem odolnosti k polehani. Rostl. Vyr., 7, 673-686, 1962.
121. **Żebrowski J.:** Zmienność cech strukturalnych i właściwości mechanicznych źdźbła roślin zbożowych w świetle badań rentgenograficznych i ultrasonograficznych. Praca doktorska. SGGW Katedra Fizyki, Warszawa, 1984.
122. **Żuk D.:** Proces cięcia źdźbeł zbóż. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej. Prace Naukowe, Mechanika, 95, 1986.
123. **Żuk D.:** Badania procesu cięcia źdźbeł zbóż. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 415, 1994.
124. **Żuk D.:** Zmienność wybranych właściwości źdźbeł pszenicy w świetle badań mikroskopowych. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 425, 305-310, 1996.

8. STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono rezultaty badań zawarte w 14 opublikowanych artykułach naukowych. Badania dotyczyły określenia i oceny właściwości mechanicznych łodyg odmian rzepaku ozimego. Zastosowano szeroki zakres metod pomiarowych oraz zróżnicowane warunki uprawy roślin uwzględniając również prowokowanie wylegania roślin. Wykonano pomiary w poszczególnych fazach fenologicznych rozwoju roślin. W badaniach uwzględniano także określenie parametrów strukturalnych łodyg rzepaku, które poza tym, że były niezbędne do wyznaczania parametrów mechanicznych przyczyniły się również do oceny zróżnicowanej budowy łodyg.

Uzyskane rezultaty pozwoliły w miarę upływu lat badawczych wyeliminować niektóre spośród zastosowanych metod do określania charakterystyki wytrzymałościowej łodyg rzepaku, a jednocześnie wskazać wybór jednej wielkości, która okazała się również bardziej prosta do wyznaczenia, zarówno w czasie wykonywania eksperymentu, jak również nie wymagająca wyliczania. W niniejszych badaniach stwierdzono zamiennność testu statycznego i dynamicznego w przypadku określania energii cięcia łodyg. Powyższy wniosek pozwolił w końcowym etapie badań posługiwać się energią cięcia dynamicznego, w celu dokonania oceny zmienności właściwości mechanicznych łodyg roślin. Dlatego też w chwili, gdy zastosowano metodę rentgenograficzną do analizy łodyg rzepaku, używano już tylko testu dynamicznego do charakterystyki wytrzymałościowej łodyg.

Badania te pozwoliły sformułować wniosek wskazujący występowanie minimum wartości energii cięcia odpowiadającej jednostkowemu przekrojowi poprzecznemu zlokalizowanemu w pobliżu pierwszego odgałęzienia rośliny. Wynik ten przyczynił się do ograniczenia w dalszych badaniach łodyg, wykonywanie pomiarów jedynie w charakterystycznym miejscu.

W niniejszych badaniach uzyskane zostały charakterystyki wytrzymałościowe łodyg roślin, uprawianych w skrajnie zróżnicowanych warunkach zarówno pod względem dawki nawożenia azotowego prowokującego ich wyleganie, jak również zaplanowanej konkretnej gęstości roślin/m².

Rezultaty eksperymentu, w którym zastosowano szeroki zakres metod badawczych uzyskując kilka parametrów mechanicznych użytych do testowania łodyg roślin, uprawianych w zróżnicowanych warunkach agrotechnicznych, wykazały zależność odporności roślin rzepaku na wyleganie od właściwości mechanicznych łodyg.

W ostatnich latach, korzystając z rezultatów niniejszej metodyki badań właściwości mechanicznych łodyg rzepaku, opracowano metodę wyznaczania parametrów mechanicznych pędów czarnej porzeczki, stosując test statyczny [103] oraz metodę badań właściwości mechanicznych łodyg odmian grochu określanych w teście statycznym i dynamicznym [104].

Rezultatem tych ostatnich badań są stwierdzone istotne różnice międzyodmianowe, które równocześnie wskazały przydatność zastosowanych metod badawczych do oceny właściwości mechanicznych analizowanych obiektów.

S ł o w a k l u c z o w e: łodyga rzepaku, sztywność, maksymalne naprężenie zginające, maksymalne naprężenie ścinające, energia cięcia statycznego, energia cięcia dynamicznego, energia cięcia przypadająca na jednostkę przekroju poprzecznego łodygi, gęstość łodygi, parametr ΔOD .

9. SUMMARY

METHODS AN ASSESSMENT OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE STEMS OF WINTER RAPE

The author presents the results of studies which were the subject matter of 14 published papers. The studies were concerned with the determination and assessment of the mechanical properties of the stems of winter rape varieties. A broad range of test methods, as well as a variety of plant growth conditions were applied, including provoked plant lodging. Measurements were taken at the particular phenological phases of the plants. Also, the studies took under consideration the determination of the structural parameters of rape stems, which, apart from being indispensable for the determination of the mechanical parameters, helped in the assessment of the differentiated stem structure.

The results of the studies permitted, with the passage of time, to eliminate certain of the methods used for the determination of the strength characteristics of rape stems, and to indicate the choice of one value which proved to be easier to determine, also in the course of an experiment, and did not require calculations. The studies showed variability of static and dynamic tests in the case of stem shearing energy determinations. That conclusion, at the final stages of the experiments, permitted the application of the dynamic shearing energy in the assessment of the variability of the plant mechanical properties. Therefore, when the X-ray tests were applied for rape stem analysis, only the dynamic test was used for the strength characterisation of the stems.

The studies permitted the formulation of the conclusion indicating the occurrence of a minimum of the shearing energy corresponding to the stem unit cross-section located at the first branching. That in turn permitted, in further studies on rape stems, the limitation of measurements to the characteristic spot.

The studies provided strength characteristics for stems of plants grown under extremely varied conditions, both as to the dosage of nitrogen fertilisation applied, provoking their lodging, and to the planned specific sowing density (number of plants per square meter).

The results of the experiment involving a broad spectrum of investigative methods, which provided a number of mechanical parameters used in the testing of rape plant stems grown under varied agrotechnical conditions, showed the relation between the resistance of rape plants to lodging and the mechanical properties of their stems.

In recent years, basing on the results of this method for the study of the mechanical properties of rape stems, a new method was developed for the determination of the mechanical properties of black currant shoots, using the static test [103], as well as new method for the study of the mechanical properties of the stems of pea varieties, determined by means of the static and dynamic tests [104].

The result of that last study is the determination of significant intervarietal differences which also confirmed the applicability of the methods applied for the assessment of the mechanical properties of the objects under study.

Key words: rape stems, rigidity, maximum bending stress, maximum shearing strength, shearing energy in static test, dynamic shearing energy, shearing energy corresponding to the stem unit cross-section, natural stem density, parameter of ΔOD .