

WPŁYW WYBRANYCH WSKAŹNIKÓW STABILNOŚCI DRZEW NA GRUBOŚĆ ŚCIAN CEWEK U SOSNY ZWYCZAJNEJ (*PINUS SYLVESTRIS* L.)

Tomasz Jelonek¹✉, Jarosław Gzyl², Magdalena Arasimowicz-Jelonek²,
Arkadiusz Tomczak¹, Agnieszka Remlein¹

¹Katedra Użytkowania Lasu, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
ul. Wojska Polskiego 71 A, 60-625 Poznań

²Department of Plant Ecophysiology, Adam Mickiewicz University of Poznan
Umultowska 89, 61-614 Poznań

ABSTRAKT

W pracy poddano analizie wpływ dwóch wskaźników stabilności drzew na kształtowanie się grubości ścian cewek w dwunastu drzewostanach sosnowych w wieku rębności. Uzyskane wyniki wskazują, iż stabilność drzew, określana na podstawie współczynnika smukłości oraz współczynnika wychylenia koron, jest determinowana w pewnym stopniu grubością cewek drewna późnego. Ponadto uzyskane w pracy wyniki potwierdzają złożoność procesów adaptacyjnych drzew w celu optymalizacji wzrostu i struktury, do których należy zaliczyć elementy anatomiczne. Oprócz pełnionych funkcji przewodzących oraz zapasowych, tworzą one układ biomechaniczny zapewniający przetrwanie osobnika.

Słowa kluczowe: sosna zwyczajna, ściana komórkowa, stabilność drzew, współczynnik smukłości

WSTĘP

Ogólna powierzchnia lasów w Polsce wynosi ponad 9 mln ha, z tego ponad 60% stanowi sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.). Według Raportu o stanie lasów w 2011 na rynek drzewny trafiło około 35 mln m³ drewna wielowymiarowego, przy czym znaczna większość to drewno sosnowe. Tak duży udział surowca sosnowego w produkcji leśnej oraz jego wszechstronność wykorzystania skłania do szczegółowej analizy struktury i właściwości drewna tego ważnego gatunku, a także analizy cech pojedynczych drzew i całych drzewostanów.

Proces tworzenia się tkanki drzewnej jest bardzo złożony, dlatego nie został jeszcze poznany dokładnie (Plomion i in., 2001). Drewno każdego gatunku

składa się z wielu typów komórek, które pod względem budowy są zoptymalizowane, aby zapewnić organizmowi przetrwanie. Proces tworzenia się drewna następuje według określonego wzoru genetycznego i jest determinowany przez czynniki środowiskowe (Du i Yamamoto, 2007). Oprócz uwarunkowań genetycznych, w kształtowaniu cech i właściwości drewna istotną rolę odgrywają elementy wynikające z warunków środowiskowych, kształtujących wzrost i rozwój drzew i drzewostanów oraz planowa działalność człowieka (Chaffey, 2002; Jelonek i in., 2005; 2010; Prescher i Ståhl, 1986; Tomczak i in., 2009a; 2009b; 2009c; Wodzicki, 2001; Zimmermann i Brown, 1971; Zobel i Buijtenen, 1989).

✉tomasz.jelonek@up.poznan.pl

Pod względem budowy i właściwości drewna nawet w obrębie jednego gatunku mogą występować znaczne różnice, np. w zależności od położenia geograficznego, warunków siedliskowych, wieku czy pozycji biosocjalnej drzewa w zbiorowisku (Fabijanowski, 1961; Fabisiak, 2005; Paschalis, 1980; Persson i in., 1995). Cechy i właściwości tkanki drzewnej będą się zmieniać również w pojedynczym drzewie, w zależności od jego wieku, położenia w strzale, udziału drewna młodocianego oraz dojrzałego, drewna wczesnego i późnego w słojach rocznych oraz wad drewna (Plomion i in., 2001). Różnice te są istotne nie tylko z punktu widzenia funkcjonowania drzewa, ale określają możliwości zastosowania bądź wykorzystania drewna jako produktu.

Drewno drzew iglastych jest zbudowane w około 90% z cewek pełniących funkcję zarówno przewodzącą, jak i mechaniczną. Budowa cewek została opisana dzięki zastosowaniu mikroskopii oraz technik rentgenowskich (Abe i in., 1991; 1992). Tworzenie się nowej warstwy elementów trachealnych można podzielić na dwie fazy, tj. wzrost osiowy i promieniowy komórek. Po ustaniu procesów wzrostu rozpoczyna się etap tworzenia ściany wtórnej i jej stopniowa lignifikacja. Ściany elementów anatomicznych drewna nie są jednorodne, stanowią bowiem submikroskopowy zespół pokładów będących złożonym konglomeratem chemicznym, w którym część składników jest powiązana ze sobą wiązaniami chemicznymi, a część wiązaniami fizycznymi (Kokociński, 2004).

Od dawna wiadomo, że grubość ścian komórkowych wpływa na sztywność tkanki drzewnej, a kąta ułożenia mikrofibrilli, w dominującym pokładzie S_2 , reguluje dwie główne właściwości drewna, tj. sztywność osiową (Cave, 1968; 1969) i kurczenie wzdłużne (Harris i Meylan, 1965).

U gatunków iglastych grubość i cechy biometryczne cewek wykazują zróżnicowanie w zależności od wielu czynników. W obrębie pojedynczego przyrostu lub w kolejnych przyrostach grubości czynnikiem różnicującym może być wiek kambialny (Mencuccini i in., 1997), jak również zabiegi hodowlane (Persson i in., 1995), umiejscowienie drewna w pniu (Donaldson, 1998) bądź uwarunkowania genetyczne (Donaldson i Burdon, 1995).

W pracy w pierwszej kolejności poddano analizie współczynnik wychylenia koron (D_K/H) oraz

współczynnik smukłości drzew ($H/D_{1,3}$), który w wielu badaniach nad odpornością drzew i drzewostanów na działanie obciążeń dynamicznych definiuje stabilność drzew (Erteld i Hengst, 1966; Jaworski, 2004; Jelonek i in., 2013; Peltola, 2006). W dalszej kolejności przeprowadzono analizę grubości ścian komórkowych cewek drewna wczesnego i późnego w badanych drzewach modelowych, a także zweryfikowano związek pomiędzy wskaźnikiem określającym stabilność drzewa a jego mikrostrukturą opisaną grubością ścian komórkowych.

METODYKA

Badania przeprowadzono w gospodarczych drzewostanach sosnowych w wieku rębnym (86–102 lat), wyrosłych na siedliskach optymalnych dla tego gatunku w danej krainie przyrodniczo-leśnej. Łącznie założono dwanaście powierzchni próbnych, zlokalizowanych w sześciu nadleśnictwach (rys. 1). Podczas wyboru drzewostanów uwzględniono następujące cechy: wiek, bonitacje, siedliskowy typ lasu, zwarcie, ukształtowanie terenu, przeciętną wysokość i pierśnicę.

Na każdej z dwunastu powierzchni badawczych wyznaczono 1-hektarową powierzchnię próbną, na której pomierzono pierśnicę wszystkich drzew oraz wysokości proporcjonalnie do liczebności w przyjętych stopniach grubości (2 cm). Na podstawie uzyskanej charakterystyki grubościowo-wysokościowej drzew wyznaczono trzydzieści sześć drzew (po trzy na każdej powierzchni), reprezentujących trzy pierwsze klasy według klasyfikacji podanej przez Krafta.

Po wybraniu drzew modelowych przeprowadzono rzutowanie koron w dwóch kierunkach geograficznych, tj. N–S i E–W. Na podstawie uzyskanych rzutów określono, z dokładnością do 10 cm, średnicę koron (D_K). Drzewa modelowe ścięto i w pierwszej kolejności zmierzono ich wysokości (H). Na podstawie uzyskanych danych biometrycznych obliczono współczynnik smukłości ($H/D_{1,3}$), który jest stosunkiem wysokości drzewa (H) do jego pierśnicy ($D_{1,3}$) oraz współczynnik wychylenia korony (D_K/H), będący stosunkiem średniej średnicy korony (D_K) do wysokości drzewa (H).

Następnie z każdego drzewa modelowego pobrano krążek z wysokości równej pierśnicy. Z średnicy zorientowanej w kierunku północ – południe pobrano z ostatnich pięciu przyrostów rocznych materiał



Rys. 1. Lokalizacja badań
Fig. 1. Location of the study

do określenia grubości ścian cewek drewna. Grubości ścian komórkowych mierzono w połowie długości ścian promieniowych piętnastu kolejnych cewek drewna wczesnego oraz późnego na podstawie zdjęcia z kamery AxioCam MRc5 firmy Zeiss z użyciem oprogramowania AxioVision firmy Zeiss, podobnie jak w badaniach, które przeprowadzali Seo i in. (2012).

Uzyskany materiał empiryczny analizowano metodami statystycznymi z zastosowaniem pakietu Statistica 10PL. Badane cechy miały rozkład zbliżony do normalnego, dlatego do testowania różnic i zależności stosowano testy parametryczne.

WYNIKI

W pracy poddano analizie stabilność drzew opisaną współczynnikiem smukłości ($H/D_{1,3}$) oraz współczynnikiem wychylenia koron (D_K/H) w relacji do grubości ścian cewek drewna wczesnego (D_w) oraz drewna

późnego (D_p). Średnia smukłość badanych sosen wyniosła 77 i wahała się w przedziale od 51 do 102 (tab. 1). Zmienność smukłości kształtowała się na poziomie 17%, a skośność rozkładu wyniosła zaledwie 0,16. Współczynnik wychylenia koron przyjmował wartości w przedziale od 11 do 33 i średnio wyniósł 22. Jego zmienność (23%), podobnie jak skośność rozkładu (0,23), była nieco wyższa niż w przypadku współczynnika

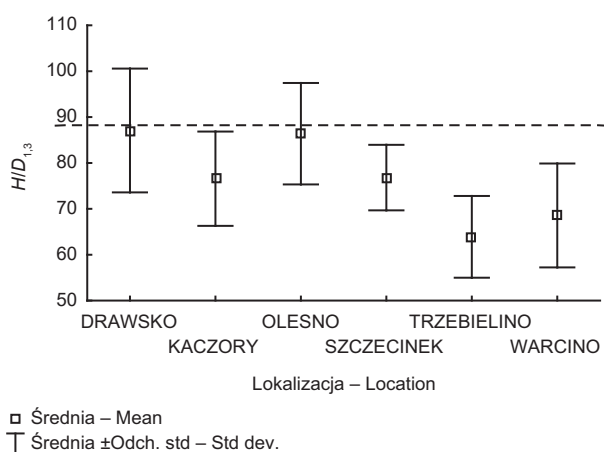
Tabela 1. Charakterystyka statystyczna wskaźników stabilności badanych drzew

Table 1. Statistical characteristics of stability indexes for analysed trees

	\bar{x}	M	Min	Max	S	CV	Ad
$H/D_{1,3}$	76,56	76,52	51,02	102,33	13,02	17,01	0,16
D_K/H	21,63	21,01	10,78	33,04	4,99	23,09	0,23

smukłości. Mediany obu opisywanych współczynników były zbliżone do uzyskanych średnich (tab. 1).

Największą stabilnością, opisaną współczynnikiem $H/D_{1,3}$, cechowały się drzewostany wyrosłe na terenie Nadleśnictwa Trzebielino oraz Warcino, gdzie średnie współczynniki smukłości wyniosły odpowiednio 64 oraz 69. Drzewostany zlokalizowane na terenie Nadleśnictwa Drawsko i Olesno znalazły się na granicy uznawanej za stabilne, tj. około 90, chociaż odchylenia standardowe znacznie wykraczały poza ten obszar (rys. 2).



Rys. 2. Współczynnik smukłości sosy zwyczajnej
Fig. 2. Slenderness factor in Scots pine

Największą zmiennością omawianego współczynnika cechowały się drzewostany wzrastające na terenie Nadleśnictwa Drawsko i Warcino, gdzie współczynniki zmienności wyniosły odpowiednio 16% i 17%.

Drugi z analizowanych wskaźników stabilności, tj. współczynnik wychylenia korony, odbiegał od trendu stwierdzonego dla współczynnika smukłości. Największą jego wartość stwierdzono u sosen wyrosłych w drzewostanie położonym na terenie Nadleśnictwa Kaczory (26), najmniejszą zaś (17) w drzewostanie zlokalizowanym na południu Polski, w Nadleśnictwie Olesno (rys. 3). Najmniejszą zmienność współczynnika D_K/H (12%, 13%) stwierdzono w drzewostanach zlokalizowanych w dwóch Nadleśnictwach, tj. Szczecinek i Warcino, natomiast największą (29%) w drzewostanie rosnącym na terenie Nadleśnictwa Drawsko.



□ Średnia – Mean
┌ Średnia ± Odch. std – Std. dev.

Rys. 3. Współczynnik wychylenia korony sosny zwyczajnej
Fig. 3. Crown inclination index in Scots pine

Uzyskane wyniki wskazują, iż występuje relacja pomiędzy omawianymi wskaźnikami stabilności. Wzrost jednego współczynnika powoduje obniżenie wartości drugiego. Wynika z tego, iż wzrost smukłości drzew powoduje obniżenie współczynnika D_K/H , czyli zwiększenie statyki drzewa poprzez zmniejszenie wychylenia korony w stosunku do wysokości drzewa.

W kolejnym etapie poddano analizie grubość ścian cewek drewna wczesnego oraz późnego. Średnio u badanych sosen grubość ścian cewek drewna wczesnego wyniosła 2,11 μm i mieściła się w przedziale od 1,16 μm do 2,50 μm (tab. 2). Natomiast ściany cewek drewna późnego były ponad czterokrotnie grubsze, a uzyskane wyniki dla tej grupy cechowały się znacznie większą zmiennością. Wyniosła ona blisko 16%, podczas gdy w przypadku cewek drewna wczesnego

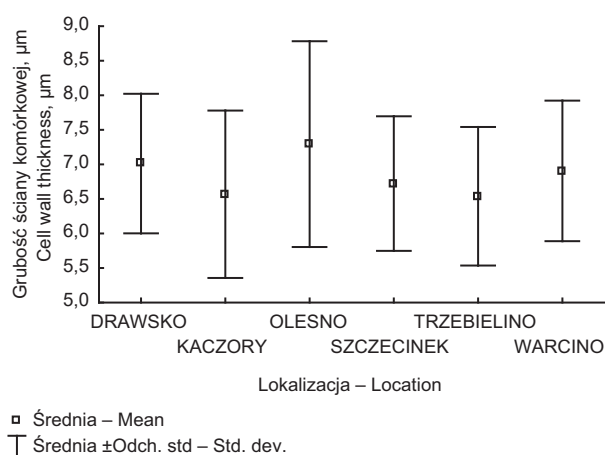
Tabela 2. Charakterystyka statystyczna grubości ścian cewek badanych drzew

Table 2. Statistical characteristics of tracheid wall thickness in analysed trees

	\bar{x}	M	Min	Max	S	CV	Ad
D_w	2,11	2,14	1,61	2,50	0,21	9,75	-0,45
D_p	6,84	6,91	4,82	9,02	1,08	15,82	0,07

D_w – drewno wczesne – early wood.

D_p – drewno późne – late wood.



Rys. 4. Grubość ścian cewek drewna późnego u sosny zwyczajnej

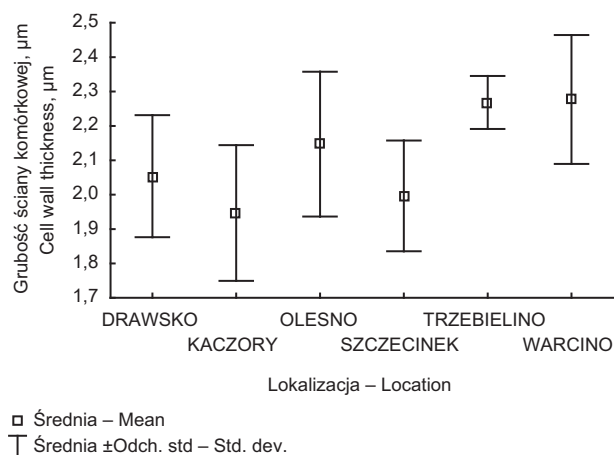
Fig. 4. Tracheid wall thickness in late wood of Scots pine

niecałe 10%. Skośność rozkładu grubości ścian cewek drewna późnego była zbliżona do zera, natomiast grubości ścian cewek drewna wiosennego ujemna (–0,45), co świadczy o przewadze w badanej grupie wartości wyższych od średniej.

Analizy zmienności grubości ścian cewek na poszczególnych powierzchniach badawczych wykazały między nimi nieznaczne zróżnicowanie cewek drewna letniego i stosunkowo duże cewek drewna wiosennego. Najgrubsze ściany komórkowe w strefie drewna późnego stwierdzono na powierzchni zlokalizowanej w Nadleśnictwie Olesno – 7,29 µm. W badanym nadleśnictwie stwierdzono również największą zmienność omawianej cechy, która wyniosła aż 20,4%. Z kolei najcieńsze ściany cewek stwierdzono w drzewostanie wyrosłym na terenie Nadleśnictwa Kaczory (6,56 µm; rys. 4).

W drewnie wczesnym tracheidy o statystycznie istotnie ($p < 0,05$) najgrubszych ścianach stwierdzono w drzewostanach wyrosłych na terenie Nadleśnictwa Warcino (2,27 µm) oraz Trzebielino (2,28 µm), najcieńsze zaś na terenie Nadleśnictwa Kaczory, gdzie średnia grubość cewek wyniosła 1,95 µm (rys. 5). Na uwagę zasługuje bardzo mała zmienność grubości ścian cewek drewna wczesnego (3,4%) u sosen na terenie Nadleśnictwa Trzebielino (rys. 5).

W dalszej kolejności przeprowadzono analizę zależności pomiędzy badanymi w pracy współczynnikami



Rys. 5. Grubość ścian cewek drewna wczesnego u sosny zwyczajnej

Fig. 5. Tracheid wall thickness in early wood of Scots pine

oraz cechami elementów anatomicznych. Analizy korelacji wewnątrzgrupowych badanych cech wykonano na poziomie istotności $p < 0,05$.

Statystycznie istotną zależność stwierdzono pomiędzy omawianymi w pracy wskaźnikami stabilności. Współczynnik korelacji dla wspomnianej zależności był ujemny i wyniósł –0,64. Ponadto statystycznie istotna zależność (0,46) wystąpiła między współczynnikiem smukłości ($H/D_{1,3}$) a grubością ścian cewek drewna późnego. Znacznie słabszą zależność (0,40) stwierdzono pomiędzy współczynnikiem wychylenia korony (D_k/H) a grubością ścian cewek drewna późnego. Zaobserwowano również ujemną zależność między współczynnikiem wychylenia korony oraz współczynnikiem smukłości a grubością ścian cewek drewna wczesnego. Nie stwierdzono natomiast zależności między grubością ścian cewek występujących w drewnie późnym a grubością ścian komórkowych drewna wczesnego.

DYSKUSJA

Na stabilność mechaniczną drzewa pod obciążeniem statycznym oraz dynamicznym ma wpływ jego wielkość i architektura (James i in., 2006). Dlatego w badaniach nad odpornością drzew i drzewostanów na działanie wiatru najczęściej stabilność drzew definiuje się współczynnikiem smukłości (Erteld i Hengst,

1966; Jaworski, 2004; Peltola, 2006; Zajączkowski, 1991;). Smukłość sosny w Polsce waha się od 50 do 150 (Orzeł, 2007; Rymer-Dudzińska, 1992) i maleje wraz z wiekiem drzewa, osiągając w wieku rębności wartość około 70. W pracy analizowano dwa wskaźniki stabilności, tj. współczynnik smukłości ($H/D_{1,3}$) i wychylenie korony (D_k/H). Badane sosny cechowały się średnią smukłością wynoszącą 77 i współczynnikiem wychylenia korony osiągającym 22. Można zatem uznać, że badane drzewostany należały do grupy uznanej za stabilne, wyjątkiem mogą być jedynie powierzchnie zlokalizowane na terenie Nadleśnictwa Drawsko i Olesno, gdzie średnia smukłość drzew wyniosła odpowiednio 87 i 86. Zauważono odwrotnie proporcjonalną zależność omawianych wskaźników. Taki schemat zależności wydaje się uzasadniony, ponieważ jak podaje Meyer (1985) na stabilność drzewa będą miały wpływ trzy elementy, tj. moment zginający wywołany siłą wiatru, moment wywołany masą korony oraz moment wywołany masą pnia. Wynika więc, iż stabilność drzewa jest warunkowana nie tylko obciążeniami dynamicznymi oraz masą strzały, ale też, w znacznej mierze, architekturą jego korony. W tym wypadku bardziej smukłe drzewa, w celu zapewnienia sobie odpowiedniej statyki, optymalizowały architekturę, zmniejszając wychylenie korony i powodując zmniejszenie momentu gnącego wywołanego masą korony, a tym samym obniżenie obciążeń dynamicznych, które wywiera wiatr na drzewo.

W literaturze często podkreśla się wzajemne relacje pomiędzy architekturą drzewa, tj. jego wielkością (masą), alokacją biomasy a różnymi funkcjami pnia, który jednocześnie przenosi obciążenia masy własnej, masy korony, czynników zewnętrznych oraz pełni funkcje fizjologiczne (Brüchert i Gardiner, 2006; Mencuccini i in., 1997; Peltola, 2006).

W takim ujęciu budowa tkanki drzewnej rośliny jest ściśle związana z wymaganiami biomechanicznymi, polegającymi na odpowiednim rozmieszczeniu masy przy właściwej skali elementów anatomicznych (Schniewind, 1962). Zakładając, że drzewa dążą do wykształcenia optymalnej pod względem pełnionych funkcji struktury, przy jednoczesnej minimalizacji nakładów jej wytworzenia (Mencuccini i in., 1997), można przypuszczać na tej podstawie, że dochodzi do wielu naturalnych biomodyfikacji struktury tkanki drzewnej na różnych poziomach jej struktury.

W pracy poddano analizie pod względem strukturalnym grubości ścian cewek drewna wczesnego oraz późnego. Badane sosny średnio charakteryzowały się grubością ścian cewek drewna wczesnego na poziomie 2,1 μm i drewna późnego na poziomie 6,8 μm . Uzyskane rezultaty są zbieżne z wynikami podawanymi dla tego gatunku w literaturze (Hannrup i in., 2001; Martín i in., 2010; Verkasalo, 1992). Fabisiak i in. (1992) przeprowadzili badania grubości ścian cewek sosen III klasy wieku wyrosłych w optymalnych dla tego gatunku warunkach siedliskowych. We wspomnianych badaniach grubość ścian cewek zwiększała się do około 12 przyrostu od rdzenia, a następnie obniżała się nieznacznie, natomiast średnie wartości grubości ścian cewek drewna wczesnego wyniosły około 3,5 μm oraz około 5 μm dla cewek drewna późnego.

Różnice w grubości ścian cewek między wynikami uzyskanymi a podawanymi przez Fabisiaka i in. (1992) mogą wynikać w pierwszej kolejności z wieku badanych drzew. Fabisiak i in. (1992) badali sosnę znajdującą się w III klasie wieku, natomiast w pracy były to drzewa w wieku rębnym (około 100 lat). Ponadto występujące różnice mogą mieć podłoże w zmianach o charakterze adaptacyjnym. Jak podaje Schniewind (1962), zmiany cech elementów anatomicznych wynikają bezpośrednio z nakładania się na siebie dwóch występujących w drzewach układów, tj. fizjologicznego i mechanicznego, co jest przykładem optymalizacji wzrostu drzew i dostosowania się do różnych wymagań (Brüchert i Gardiner, 2006).

Stwierdzona zależność między grubością ścian cewek drewna późnego a współczynnikiem smukłości drzew znajduje uzasadnienie w podkreślanych w literaturze relacjach, które występują pomiędzy formą drzewa a cechami i właściwościami tkanki drzewnej (Cannell, 1993; Pretzsch, 1995). Analiza czynnikowa wykazała, że grubość ścian cewek drewna późnego w ponad 30% jest wyjaśniana pierśnicą drzewa, a jedynie nieco w ponad 12% jego wysokością przy jednoczesnym bardzo silnym związku pierśnicy z wysokością drzewa (współczynnik korelacji 0,763). Najprawdopodobniej wynika to z faktu, że powierzchnia poprzeczna przekroju jest ściśle związana ze strefą konduktywnie hydrauliczną, którą tworzą cewki drewna wczesnego strefy bielastej.

Należy poddać dyskusji wystąpienie istotnych zależności między współczynnikiem wychylenia korony

a ścianami cewek drewna wczesnego, które pełni w strzale przede wszystkim funkcje fizjologiczne. Być może stwierdzona zależność ma właśnie podłoże fizjologiczne i wynika z relacji występujących pomiędzy koroną a częścią przewodzącą pnia. Analizowany bowiem w pracy współczynnik wychylenia korony jest pochodną jej wielkości, a ta z kolei jest związana z przewodnością hydrauliczną pnia, a dokładniej z powierzchnią przewodzącą pnia (Jelonek i in., 2012), co dodatkowo znajduje uzasadnienie w teorii „rur” (Shinozaki i in., 1964). Najprawdopodobniej wraz ze zwiększaniem rozmiarów korony dochodzi do zwiększenia powierzchni przewodzącej i być może zmniejszenia, przy zachowaniu odpowiedniej skali, grubości ścian cewek na korzyść ich średnicy, a tym samym wydajności w przewodzeniu wody oraz soli mineralnych w górę strzały.

Uzyskane w pracy wyniki potwierdzają złożoność procesów adaptacyjnych drzew w celu optymalizacji ich wzrostu i struktury tkanki drzewnej. Podkreślają jednocześnie znaczenie elementów anatomicznych tkanki drzewnej, które nie tylko pełnią funkcje przewodzące oraz zapasowe, ale również tworzą układ biomechaniczny zapewniający przetrwanie (Mattheck i Bethge, 1998; Niklas i in., 2006).

WNIOSKI

1. Drzewostany, w których prowadzono badania można uznać za stabilne. Współczynnik smukłości ($H/D_{1.3}$) badanych sosen wahał się w przedziale od 51 do 102, natomiast współczynnik wychylenia koron (D_k/H) osiągał od 11 do 33.

2. Średnia grubość ściany cewek drewna późnego u badanych drzew wyniosła 6,84 μm , natomiast średnia grubość ścian cewek drewna wczesnego – 2,11 μm .

3. Stwierdzono statystycznie istotne zależności pomiędzy analizowanymi w pracy współczynnikami stabilności drzew. Współczynnik korelacji dla tej zależności wyniósł $-0,641$.

4. Stwierdzono dodatnie zależności między badanym w pracy współczynnikiem stabilności drzew a grubością ścian cewek drewna późnego oraz ujemne w przypadku cewek drewna wczesnego. Jednocześnie analiza czynnikowa wykazała, że na kształtowanie się grubości ścian cewek drewna późnego znacznie większy wpływ ma pierśnica drzewa aniżeli jego wysokość.

5. Ujemny znak zależności pomiędzy współczynnikiem wychylenia koron a grubością ścian cewek drewna wczesnego może mieć związek z relacją między koroną drzewa a przewodnością hydrauliczną strzały i być procesem o charakterze adaptacyjnym drzew w celu optymalizacji wzrostu i struktury.

PIŚMIENNICTWO

- Abe, H., Ohtani, J., Fukazawa, K. (1991). FE-SEM observation on the microfibrillar orientation in the secondary wall of tracheids. Bull. Int. Assoc. Wood Anat., 12, 431–438.
- Abe, H., Ohtani, J., Fukazawa, K. (1992). Microfibrillar orientation of the innermost surface of conifer tracheid walls. Bull. Int. Assoc. Wood Anat., 13, 411–417.
- Brüchert, F., Gardiner, B. (2006). The effect of wind exposure on the tree aerial architecture and biomechanics of Sitka spruce (*Picea sitchensis*, Pinaceae). Am. J. Bot., 93, 1512–1521.
- Cannell, M. G. R. (1993). Competition for light: detection, measurement, and quantification, Can. J. For. Res., 23, 1969–1979.
- Cave, I. D. (1968). The anisotropic elasticity of the plant cell wall. Wood Sci. Technol., 2, 268–278.
- Cave, I. D. (1969). The longitudinal Young's modulus of radiata pine. Wood Sci. Technol., 3, 40–48.
- Chaffey, N. (2002). Wood formation in trees: Cell and molecular biology techniques. London: Taylor & Francis Books.
- Donaldson, L. A., Burdon, R. D. (1995). Clonal variation and repeatability of microfibril angle in *Pinus radiata*. New Zeal. J. For. Sci., 25, 164–174.
- Du, S., Yamamoto, F. (2007). An overview of the biology of reaction wood formation. J. Integr. Plant Biol., 49, 131–143.
- Erteld, W., Hengst, E. (1966). Waldertragslehre. Radebeul: Neumann.
- Fabijanowski, J. (1961). Kilka uwag o badaniach dotyczących rasy sosny zwyczajnej w Polsce oraz o sośnie mazureńskiej. Sylwan, 4, 21–27.
- Fabisiak, E. (2005). Zmienność podstawowych elementów anatomicznych i gęstości drewna wybranych gatunków drzew. Roczn. AR Pozn. Rozpr. Nauk., 369.
- Fabisiak, E., Helińska-Raczkowska, L., Raczkowski, J. (1992). Kształtowanie się grubości ścian cewek sosny (*Pinus sylvestris* L.). Pr. Kom. Techn. Drewn. PTPN, 13, 25–32.

- Hannrup, B., Danell, O., Ekberg, I., Moëll, M. (2001). Relationships between wood density and tracheid dimensions in *Pinus sylvestris* L. Wood Fiber Sci., 33, 173–181.
- Harris, J. M., Meylan, B. A. (1965). The influence of microfibril angle on longitudinal and tangential shrinkage in *Pinus radiata*. Holzforchung, 5, 144–153.
- James, K., Haritos, N., Ades, P. K. (2006). Mechanical stability of trees under dynamic loads. Am. J. Bot., 93, 1522–1530.
- Jaworski, A. (2004). Podstawy przyrostowe i ekologiczne odnawiania oraz pielęgnacji drzewostanów. Warszawa: PWRiL.
- Jelonek, T., Pazdrowski, W., Arasimowicz-Jelonek, M., Tomczak, A. (2010). Właściwości drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) pochodzącej z gruntów porolnych. Sylwan, 154(5), 299–311.
- Jelonek, T., Pazdrowski, W., Walkowiak, R., Tomczak, A. (2012). Model biomasy igliwia sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) wyrosłej w warunkach gruntów porolnych i leśnych. Leśn. Pr. Bad., 73(2), 97–106.
- Jelonek, T., Tomczak, A., Jakubowski, M., Pazdrowski, W. (2005). Properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) timber growing on former arable and forest land. Acta Sci. Pol., Silv. Colendar. Rat. Ind. Lignar., 4(2), 35–47.
- Jelonek, T., Walkowiak, R., Jakubowski, M., Tomczak, A. (2013). Wskaźniki stabilności drzew w drzewostanach sosnowych uszkodzonych przez wiatr. Sylwan, 157(5), 323–329.
- Kokociński, W. (2004). Drewno. Pomiar właściwości fizycznych i mechanicznych. Poznań: Kat. Nauki Drewn. AR.
- Martín, J. A., Esteban, L. G., de Palacios, P., García Fernández, F. (2010). Variation in wood anatomical traits of *Pinus sylvestris* L. between Spanish regions of provenance. Trees, 24, 1017–1028.
- Mattheck, C., Bethge, K. (1998). The structural optimization of trees. Naturwissenschaften, 85, 1–10.
- Mayer, H. (1985). Baumschwingungen und sturmgefährdung des waldes. München: Meteorologisches Institut, Universität München.
- Mencuccini, M., Grace, J., Fioravanti, M. (1997). Biomechanical and hydraulic determinants of tree structure in Scots pine: anatomical characteristics. Tree Physiol., 17(2), 105–113.
- Niklas, K. J., Spatz, H.-S., Vincent, J. (2006). Plant biomechanics: an overview and prospectus. Am. J. Bot., 93(10), 1369–1378.
- Orzeł, S. (2007). A comparative analysis of slenderness of the main tree species of the Niepolomice forest. EJPAU, 10(2), #13. Pobrano z <http://www.ejpau.media.pl/volume10/issue2/art-13.html>
- Paschalis, P. (1980). Zmienność jakości technicznej drewna sosny pospolitej we wschodniej części Polski. Sylwan, 1, 29–43.
- Peltola, H. (2006). Mechanical stability of trees under static loads. Am. J. Bot., 93, 1501–1511.
- Persson, B., Persson, A., Stahl, E. G., Karlsmats, U. (1995). Wood quality of *Pinus sylvestris* progenies at various spacings. For. Ecol. Manag., 76, 127–138.
- Plomion, C., Leprovost, G., Stokes, A. (2001). Wood formation in trees. Plant Physiol., 127, 1513–1523.
- Prescher, F., Ståhl, E. G. (1986). The effect of provenance and spacing on stem straightness and number of spike knots of Scots pine in South and Central Sweden. Stud. For. Suecica, 172, 12.
- Pretzsch, H. (1995). Zum Einfluß des Baumverteilungsmusters auf den Bestandeszuwachs. Allg. Forst- u. J.-Ztg., 166, 190–201.
- Rymer-Dudzińska, T. (1992). Smukłość drzew w drzewostanach sosnowych, Sylwan, 11, 35–44.
- Schniewind, A. P. (1962). Horizontal specific gravity variation in tree stems in relation to their support function. For. Sci., 8, 111–118.
- Seo, J.-W., Eckstein, D., Jalkanen, R. (2012). Screening various variables of cellular anatomy in Scots pines in subarctic Finland for climatic signals. IAWA J., 4, 417–429.
- Tomczak, A., Pazdrowski, W., Jelonek, T., Grzywiński, W. (2009a). Jakość drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Część I. Charakterystyka wybranych cech i właściwości drewna wpływających na jego jakość. Sylwan, 153(6), 363–372.
- Tomczak, A., Pazdrowski, W., Jelonek, T., Grzywiński, W. (2009b). Jakość drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Część II. Naturalne warunki (czynniki) produkcji i ich rola w kształtowaniu jakości drewna. Sylwan, 153(7), 435–441.
- Tomczak, A., Pazdrowski, W., Jelonek, T., Grzywiński, W. (2009c). Jakość drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Część III. Wpływ postępowania gospodarczego na jakość drewna. Sylwan, 153(8), 519–527.
- Verkasalo, E. (1992). Silva Relationships of the modulus of elasticity and the structure of Finnish Scots pine wood. Fennica, 26(3), 155–168.
- Wodzicki, T. J. (2001). Natural factors affecting wood structure. Wood Sci. Technol., 35, 5–26.
- Zajączkowski, J. (1991). Odporność lasu na szkodliwe działanie wiatru i śniegu. Warszawa: Wyd. Świat.
- Zimmermann, M. H., Brown, C. L. (1971). Trees: Structure and function. Berlin: Springer.
- Zobel, B. J., van Buijtenen, J. P. (1989). Wood variations: Its causes and control. Springer Series in Wood Science. Berlin: Springer.

THE INFLUENCE OF THE SELECTED RATIOS OF TREES STABILITY ON THE WALL THICKNESS OF TRACHEIDS IN THE SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.)

ABSTRACT

The study comprised an analysis of two tree stability indexes, i.e. slenderness factor ($H/D_{1.3}$) and crown inclination index (D_k/H) of thirty six pines coming from twelve mature stands growing at different sites. Apart from stability for each tree tracheid wall thickness was determined at breast height in early and late wood. Results showed that examined trees belong to a group considered to be stable (Figs. 2, 3), while investigated stability indexes are negatively correlated (-0.64). Next tracheid wall thickness was determined in early wood to be $2.11 \pm 0.21 \mu\text{m}$ and for late wood at $6.84 \pm 1.08 \mu\text{m}$. No significant differences were found between examined plots in terms of investigated indexes or tracheid wall thickness in late wood. In contrast, statistically significant dependencies were observed between the analysed indexes and tracheid wall thickness in early and late wood. Slenderness factor was most strongly correlated with tracheid wall thickness in late wood. Moreover, a dependence was also found between crown inclination index and tracheid wall thickness in early wood, which most probably may be explained by the relationship between the tree crown, which width was one of the variables in D_k/H and hydraulic functions of anatomical elements. With an increase in the crown inclination index the mean tracheid wall thickness decreased, most probably leading to an increase in their lumen, which has a positive effect on their efficiency in conductivity of water and minerals.

Key words: Scots pine, cell wall, trees stability, slenderness ratio