

Związki między wybranymi cechami drzewa a niektórymi właściwościami drewna młodocianego sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.)

Relationships between selected tree characteristics and the properties of juvenile wood in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)

Arkadiusz Tomczak

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Katedra Użytkowania Lasu, ul. Wojska Polskiego 71A, 60–625 Poznań
Tel. +48 61 848–7756; e-mail: arkadiusz.tomczak@up.poznan.pl

Abstract. The aim of this study was to determine relationships between selected properties of juvenile wood and characteristics of the stem and crown of Scots pine. Analyses were conducted in northern Poland in eight mature pine monocultures. Nine trees were selected in each experimental site and their stems were divided into five sections. The centers of the sections were established at a height of 1.3 m from the tree base and at points corresponding to 20, 40, 60 and 80% tree height. Samples were taken from these locations, and these samples were prepared for analyses of basic density, compressive strength along the grain and static bending, as well as the modulus of elasticity during bending. The mean height of the investigated group of trees was 26.0 m with an average diameter breast high of 33.6 cm. The mean crown depth was 7.8 m and crown diameter was 3.6 m, and the mean basic density (Q_u) of juvenile pine wood was 416 kg/m³. The average compressive strength along the grain (CS) was determined to be 22.3 MPa, while static bending strength (BS) was 45.8 MPa. The recorded modulus of elasticity (MOE) was 4726 MPa.

Both in general terms and when dividing stems into sections, the wood properties correlated with tree characteristics to various degrees. All indexes were negative indicating that trees of greater dimensions produce juvenile wood of inferior quality. Properties of juvenile wood formed during various periods of tree life were mostly related to diameter breast high and crown depth. They were also correlated with tree height, but only to a limited extent. In contrast, properties of wood from the middle stem sections were significantly correlated with crown diameter.

Key words: basic density, strength perpendicular to grain, bending strength, modulus of elasticity, breast height diameter, tree height, crown length, crown diameter

1. Wstęp

Właściwości drewna są pochodną przede wszystkim jego struktury (Verkasalo 1992; Hanrup et al. 2001). Struktura drewna, z pominięciem cech uwarunkowanych genetycznie, to z kolei wypadkowa warunków wzrostu i rozwoju drzewa, w tym między innymi siedliskowego typu lasu i postępowania gospodarczego (Pazdrowski et Spława-Neyman 1997). W tym szczególnym układzie interakcji cechy (wymiary) pnia i korony zajmują miejsce pośrednie między warunkami wzrostu

i rozwoju drzewa a strukturą i właściwościami drewna. Według Jelonka (2013) między gęstością drewna a cechami pnia i korony sosny zwyczajnej nie ma związku. Relacje z cechami pnia i korony autor ten stwierdza natomiast w przypadku wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien i na zginanie statyczne, przy czym w stosunku do pierśnicy i długości korony są to zależności odwrotnie, a w stosunku do wysokości drzewa i szerokości korony – wprost proporcjonalne. Wąsik (2000), analizując związki między wybranymi parametrami korony a cechami makrostruktury drewna daglezi zi-

lonej, stwierdził, że drzewa o koronie dłuższej i szerszej miały istotnie szersze przyrosty roczne niż przyrosty drzew o koronach krótszych i węższych. U iglastych większa szerokość przyrostu rocznego grubości oznacza mniejszy udział drewna późnego i gorsze parametry techniczne drewna (Fabisiak 2005). Mniejsza korona to również mniejszy ciężar spoczywający na pniu. Przekrój poprzeczny pnia może mieć więc odpowiednio mniejszą powierzchnię niż u drzew o koronie dużej i ciężkiej. Jest to efekt procesu polegającego na wykształceniu maksymalnie wytrzymałej struktury przy jak najmniejszym wkładzie energii/materii (Zajączkowska 2006).

Według wielu badaczy wpływ korony drzewa na kształtowanie się struktury i właściwości drewna jest szczególnie wyraźny w drewnie młodocianym (Pazdrowski et al. 2000; Amarasekara et al. 2002; Jakubowski 2004; Mansfield et al. 2007). Drewno młodociane to tkanka drzewna położona w centralnej części przekroju poprzecznego pnia, w granicach do kilkunastu przyrostów rocznych grubości (Mutz et al. 2004; Fries et al. 2009). Drewno młodociane charakteryzuje się mniejszym udziałem celulozy, większym kątem nachylenia fibryl w ścianach komórkowych, mniejszym udziałem drewna późnego. Wszystkie te cechy wpływają na właściwości mechaniczne, dlatego drewno młodociane jest pod względem mechanicznym słabsze niż drewno dojrzałe (Zobel et al. 1998; Pazdrowski 2004). W przypadku sosny różnica gęstości umownej drewna młodocianego i drewna dojrzałego wynosi około 25 kg/m^3 , wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien drewna młodocianego jest mniejsza o około 3 MPa, a wytrzymałość na zginanie statyczne mniejsza o około 7 MPa (Tomczak et al. 2012). Drewno młodociane na przekroju podłużnym pnia występuje na całej jego długości, dlatego część wierzchołkowa drzewa może być zbudowana wyłącznie z tego typu tkanki. Drewno dojrzałe, które otacza młodociane pierścieniem, pojawia się u podstawy pnia. Z wiekiem jego zasięg rośnie i u drzew dojrzałych wynosi około 85% wysokości drzewa (Tomczak et al. 2007a). Z cechami pnia – pierśnicą, wysokością i miąższością, silnie koreluje udział drewna młodocianego oraz udział drewna dojrzałego (Tomczak et al. 2005; Tomczak et al. 2006). O szczególnym wpływie korony na tworzenie się tkanki drzewnej może świadczyć też fakt, że w przypadku jej częściowej redukcji (podkrzesaniu) udział drewna juwenilnego w pniu drzewa był niższy niż u drzew kontrolnych, u których nie zredukowano aparatu asymilacyjnego (Pazdrowski et al. 2007). Jak twierdzi Hejnowicz (2002), drewno młodociane powstaje w pobliżu liści. Okres jego tworzenia w pniu zależy od tego, jak nisko zbiega korona drzewa. Podobnie twierdzi Kučera (1994), który wiąże fakt formowania się drewna

młodocianego z dynamiką rocznego przyrostu drzewa na wysokość.

Między drewnem młodocianym z części odziomkowej i z części wierzchołkowej pnia występują wyraźne różnice w budowie makrostrukturalnej (Tomczak et al. 2007b). Są one prawdopodobnie związane ze zmianami, jakie zachodzą w układzie biomechanicznym drzewa w trakcie jego wzrostu i rozwoju oraz tendencją do wykształcenia maksymalnie wytrzymałej struktury (związanej z rozmiarami drzewa, w szczególności z rozmiarami w wieku dojrzałym) przy jak najmniejszym koszcie energetycznym. Mając na uwadze powyższe przypuszczenie w pracy założono, że wybrane właściwości drewna młodocianego oraz niektóre cechy pnia i korony są ze sobą skorelowane.

2. Metodyka badań

Wybór oraz pomiary na powierzchniach próbnych

Badania przeprowadzono w północnej części Polski (RDLP Szczecinek), w 8 dojrzałych monokulturach sosnowych. Drzewostany wybrane do badań wyrosły w warunkach boru mieszanego świeżego i charakteryzowały się I bonitacją oraz zwarciem przerywanym, zadrzewieniem od 0,7 do 1,1. Ich wiek mieścił się między 82 a 89 lat, przeciętna pierśnica zawierała się między 31 a 37 cm, a wysokość między 24 a 27 m.

W każdym drzewostanie założono powierzchnie próbne, na których pomierzono cechy wszystkich drzew rosnących, tj. wysokość (m), pierśnicę w dwóch przeciwnych kierunkach (cm), wysokość osadzenia pierwszej żywej gałęzi (m) oraz średnicę koron w dwóch przeciwnych kierunkach (m). Pomiary wysokości oraz osadzenia pierwszej żywej gałęzi wykonano za pomocą wysokościomierza Nikon Forestry z zaokrągleniem do 0,1 m. Pierśnicę w korze ($d_{1,3}$) zmierzono średnicomierzem, z zaokrągleniem do 0,5 cm dwukrotnie, a wynik uśredniono. Średnicę korony (d_k) określono na podstawie dwóch uśrednionych pomiarów, wykonanych dalmierzem z dokładnością do 0,1 m. Po uzyskaniu danych z pomiaru wysokości oraz osadzenia żywej korony obliczono długość żywej korony (l_k), odejmując od wysokości drzewa (h_d) wysokość osadzenia pierwszej żywej gałęzi zwartej korony.

Wybór drzew modelowych oraz materiału do badań laboratoryjnych

Na podstawie charakterystyki drzew rosnących na powierzchniach próbnych metodą dendrometryczną Uricha I wybrano drzewa modelowe. Ze względu na różnicowanie drzew pod względem wysokości,

grubości i wielkości korony przy wyborze drzew modelowych posłużyła klasyfikacja Krafta (1884). Do badań wybrano drzewa bez wyraźnych anomalii w kształcie pnia oraz z symetrycznie rozwiniętą koroną. Na każdej powierzchni wyselekcjonowano po 9 drzew, łącznie badaniem objęto 72 drzewa modelowe.

Po ścięciu drzew pnie drzew modelowych zostały podzielone na pięć sekcji. Środek pierwszej sekcji wyznaczono w odległości 1,3 m od podstawy pnia, a kolejnych w punktach odpowiadających 20, 40, 60, 80% długości strzały. Z tych miejsc pobrano materiał, z którego wykonano próby do badań wybranych właściwości drewna. Próby obejmowały część pnia leżącą między rdzeniem a obwodem, na dwóch przeciwległych promieniach zorientowanych względem stron świata w kierunku wschód – zachód. Pierwsza próbka oddalona była od rdzenia o 1 cm. Pobrane próbki zostały kolejno ponumerowane. W dalszych etapach uwzględniono tylko dwie próby położone najbliżej rdzenia, ze środkami próbek w odległości 2 i 4 cm od rdzenia. Takie postępowanie umożliwiło przeprowadzenie badań na materiale pochodzącym wyłącznie z młodocianej części przekroju poprzecznego pnia.

Badania laboratoryjne

Zbadano cztery właściwości drewna: gęstość umowną (Q_u), wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien (CS), wytrzymałość na zginanie statyczne (BS), moduł elastyczności przy zginaniu (MOE). Gęstość umowną (kg/m^3) określono na próbkach o wymiarach $20 \times 20 \times 30$ mm, jako stosunek masy w stanie absolutnie suchym do objętości w stanie maksymalnego spęcznienia ($w > 30\%$). Maksymalne spęcznienie błon (wilgotność drewna ponad 30%) uzyskano poprzez zanurzenie próbek w wodzie, aż do momentu osiągnięcia przez nie stabilności wymiarowej, tj. do czasu, gdy przyrost poszczególnych wymiarów próbki mierzony w odstępie 72 godzin był równy lub mniejszy niż 0,2 mm. Masę próbek określono przy użyciu wagi laboratoryjnej, z dokładnością 0,001 g. Do określenia wymiarów liniowych próbek wykorzystano suwmiarkę, wyniki zaokrąglając do 0,1 mm (PN-77/D-04101).

Właściwości mechaniczne określono na podstawie prób wytrzymałościowych. Aby uzyskane wyniki były zbliżone do właściwości drewna, jakimi charakteryzują się pnie drzew rosnących, analizy wykonane zostały przy wilgotności wyższej niż 30% – powyżej punktu nasycenia włókien. Wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien (MPa) określono na próbkach o znormalizowanych wymiarach $20 \times 20 \times 30$ mm, natomiast wytrzymałość na zginanie statyczne (MPa) i moduł elastyczności przy zginaniu (MPa) na próbkach o wymiarach $20 \times 20 \times 300$ mm według procedur zawartych w normach:

PN-63/D-04117; PN-77/D-04103; PN-79/D-04102, z opisaną powyżej modyfikacją dotyczącą wilgotności drewna.

Analizy statystyczne

Każdą z właściwości drewna oraz cech drzewa scharakteryzowano podstawowymi miarami położenia i rozproszenia: średnią medianą, kwartylami, wartościami minimalną i maksymalną, odchyleniem standardowym oraz współczynnikiem zmienności. Analizie poddano łącznie 1320 prób do ustalenia wartości Q_u i CS oraz 1278 prób do ustalenia wartości BS i MOE . Każdy z tych zbiorów został dodatkowo podzielony na pięć podzbiorów, reprezentujących poszczególne strefy pnia i odpowiednio scharakteryzowany statystycznie. Związki między cechami drzewa a właściwościami drewna określone zostały za pomocą współczynników korelacji. Przyjęto, że wartość współczynnika od 0,0 do 0,2 to korelacja bardzo słaba, 0,2–0,4 to korelacja słaba, 0,4–0,6 korelacja umiarkowana, 0,6–0,8 silna i od 0,8 do 1,0 bardzo silna. Obliczenia wykonano za pomocą pakietu statystycznego Statistica (Statsoft, Inc.)

3. Wyniki badań

Charakterystyka cech drzew i właściwości drewna młodocianego

Średnia wysokość drzew badanej grupy wynosiła 26,0 m (mediana 25,8 m). Przeciętna pierśnica równała się 33,6 cm (mediana 33,5 cm). Długość korony wynosiła 7,8 m, a szerokość 3,6 m, wartości mediany dla tych cech to odpowiednio 8,1 m i 3,8 m. Najmniejszą zmiennością cechowała się wysokość, a największą – szerokość korony. Cechy korony charakteryzowały się większą zmiennością niż cechy pnia (tab. 1).

Średnia gęstość umowna (Q_u) drewna młodocianego sosny wynosiła $416 kg/m^3$. Przeciętna wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien (CS) określona została na poziomie 22,3 MPa, wytrzymałość na zginanie statyczne (BS) – 45,8 MPa. Wartość modułu elastyczności (MOE) wyniosła 4726 MPa. Wartości mediany wszystkich cech były bardzo zbliżone do wartości średnich. Najmniejszy współczynnik zmienności odnotowano w odniesieniu do Q_u , największy w przypadku MOE (tab. 2).

Na przekroju podłużnym pnia średnia wartość gęstości umownej wahała się od 385 do $473 kg/m^3$ (różnica $88 kg/m^3$ – 18,6%), przy czym najwyższą wartość stwierdzono na poziomie pierśnicy, najniższą na poziomie odpowiadającym 60% wysokości drzewa. Mediana opisująca Q_u miała wartość zbliżoną do średniej, współczynnik zmienności wahał się od około 7 do około

Tabela 1. Charakterystyka statystyczna cech drzew

Table 1. Statistical characteristics of the trees features

Cecha Feature	Średnia Mean	Mediana	Min	Maks	Q ₂₅	Q ₇₅	SD	VC (%)
h_d (m)	26,0	25,8	18,5	33,8	23,8	28,3	2,8	10,85
$d_{1,3}$ (cm)	33,6	33,5	21,0	45,0	29,5	40,0	6,9	20,67
l_k (m)	7,8	8,1	2,9	14,2	6,0	9,6	2,3	30,10
d_k (m)	3,8	3,6	1,6	7,9	2,6	5,0	1,6	40,65

h_d – wysokość drzewa; $d_{1,3}$ – pierśnica; l_k – długość korony; d_k – szerokość korony; Q₂₅ – dolny kwartył; Q₇₅ – górny kwartył; SD – odchylenie standardowe; VC – współczynnik zmienności

h_d – tree height; $d_{1,3}$ – d.b.h.; l_k – crown length; d_k – crown diameter; SD – standard deviation; Q₂₅ – lower quartile; Q₇₅ – upper quartile; VC – variability coefficient

Tabela 2. Charakterystyka statystyczna właściwości drewna

Table 2. Statistical characteristics of the wood features

Cecha Feature	Średnia Mean	Mediana	Min	Maks	Q ₂₅	Q ₇₅	SD	VC
Qu (kg/m ³)	416	415	356	501	397	432	29	7,00
CS (MPa)	22,3	22,4	16,5	27,9	20,9	23,8	2,4	10,59
BS (MPa)	45,8	46,4	33,0	60,5	41,6	49,6	6,0	13,17
MOE (MPa)	4726	4667	3089	6567	4260	5288	732	15,49

Qu – gęstość umowna; CS – wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien; BS – wytrzymałość na zginanie statyczne; MOE – moduł elastyczności; Q₂₅ – dolny kwartył; Q₇₅ – górny kwartył; SD – odchylenie standardowe; VC – współczynnik zmienności

Qu – basic density; CS – strength perpendicular to grain; BS – bending strength; MOE – modulus of elasticity; SD – standard deviation; Q₂₅ – lower quartile; Q₇₅ – upper quartile; VC – variability coefficient

Tabela 3. Charakterystyka właściwości drewna młodocianego wzdłuż pnia

Table 3. Statistical characteristics of features of the juvenile wood from different height levels of stem

Właściwość Feature	Poziom Height level*	Średnia Mean	Mediana	Min	Maks	Q ₂₅	Q ₇₅	SD	VC
Qu (kg/m ³)	$d_{1,3}$	473	475	358	613	446	504	51	10,72
	20%	423	421	333	619	389	447	44	10,38
	40%	399	398	335	499	380	420	33	8,37
	60%	385	385	339	454	364	403	28	7,34
	80%	396	392	325	564	366	415	42	10,68
CS (MPa)	$d_{1,3}$	24,79	24,65	14,82	35,50	21,96	27,70	4,08	16,47
	20%	23,19	23,17	16,31	30,34	21,47	25,34	2,89	12,45
	40%	22,16	22,12	16,21	31,50	20,64	23,61	2,88	12,99
	60%	20,66	20,47	15,90	28,84	18,63	21,93	2,67	12,90
	80%	20,17	20,07	14,81	29,16	17,97	21,67	2,86	14,16
BS (MPa)	$d_{1,3}$	53,51	53,57	34,54	73,76	47,34	58,33	8,64	16,15
	20%	48,57	48,53	31,32	64,09	44,77	54,64	7,66	15,76
	40%	46,00	45,85	29,43	67,13	40,35	50,28	7,44	16,18
	60%	41,70	40,95	30,23	62,16	37,23	45,12	6,43	15,42
	80%	39,52	38,36	26,23	56,37	35,16	44,30	6,32	16,00
MOE (MPa)	$d_{1,3}$	5556	5688	3196	7924	5043	6110	1041	18,74
	20%	5086	5143	2846	7523	4560	5744	934	18,37
	40%	4755	4734	2921	8734	4106	5181	972	20,43
	60%	4290	4292	2931	6959	3801	4628	745	17,36
	80%	3872	3859	2357	5409	3477	4394	671	17,32

* odległość pobrania próbki drewna od podstawy pnia: $d_{1,3}$ – 1,3 m; 20%, 40%, 60%, 80% – odpowiedniej długości strzały
the distance of wood sample of the base of the stem: $d_{1,3}$ – of 1.3 m, 20%, 40%, 60%, 80% – of the length of stem

Oznaczenia jak w tab. 2 / Symbols as in the Table 2

Tabela 4. Współczynniki korelacji między cechami drzew i właściwościami drewna młodocianego (w zestawieniu zaprezentowano współczynniki statystycznie istotne przy $p < 0,05$)Table 4. Correlation between the trees features and the juvenile wood features (coefficients only statistically significant at $p < 0.05$ are listed)

Poziom Height level	Właściwości drewna młodocianego Features of juvenil wood	Cechy drzew / Features of trees			
		h_d	$d_{1,3}$	l_k	d_k
Średnia dla całego pnia Average for all stem	<i>Qu</i>		-0,4366	-0,3408	
	<i>CS</i>	-0,3133	-0,5895	-0,4592	-0,2396
	<i>BS</i>		-0,5064	-0,4048	
	<i>MOE</i>	-0,2341	-0,5922	-0,4655	-0,275
$d_{1,3}$	<i>Qu</i>				
	<i>CS</i>	-0,2369	-0,4343	-0,3275	
	<i>BS</i>		-0,2906		
	<i>MOE</i>		-0,4422	-0,3257	
20%	<i>Qu</i>	-0,2606	-0,4968	-0,3017	
	<i>CS</i>	-0,2495	-0,5494	-0,3394	
	<i>BS</i>		-0,4362	-0,327	-0,2893
	<i>MOE</i>		-0,5447	-0,4165	-0,2817
40%	<i>Qu</i>		-0,3952	-0,2891	-0,2839
	<i>CS</i>	-0,3173	-0,4125	-0,3537	-0,2252
	<i>BS</i>		-0,3943	-0,307	-0,2652
	<i>MOE</i>		-0,4496	-0,3453	-0,302
60%	<i>Qu</i>		-0,3109	-0,3044	-0,2591
	<i>CS</i>	-0,2393	-0,4282	-0,3519	-0,2913
	<i>BS</i>		-0,4117	-0,2922	-0,2574
	<i>MOE</i>		-0,382	-0,2767	-0,3787
80%	<i>Qu</i>				
	<i>CS</i>				
	<i>BS</i>				
	<i>MOE</i>		-0,2466		

h_d - wysokość drzewa, $d_{1,3}$ - pierśnica w korze, l_k - długość żywej korony, d_k - średnica korony. Pozostałe oznaczenia jak w tab. 3
 h_d – tree height, $d_{1,3}$ – DBH inside bark, l_k – length of alive crown, d_k – crown diameter. Other symbols as in the Table 3.

11%. Wartość *CS* mieściła się w granicach 20,2–24,8 MPa (różnica 4,6 MPa – 18,6%), *BS* między 39,5 a 53,5 MPa (różnica 14,0 MPa – 26,1%), *MOE* między 3872 a 5556 MPa (różnica 1684 MPa – 30,3%). Wartości właściwości mechanicznych drewna, w odróżnieniu od wartości *Qu*, malały systematycznie wraz ze wzrostem odległości miejsca pomiaru od podstawy pnia. Wartości mediany były również bardzo zbliżone do średnich. Wyników nie zakłócały więc próby o wartościach odstających. Wśród właściwości mechanicznych największą zmiennością charakteryzował się *MOE*, najmniejszą – *CS* (tab. 3).

Związki między cechami drzew i właściwościami drewna młodocianego

Analizując związki między cechami drzew a właściwościami drewna określonymi jako wartości przeciętne dla całego pnia, stwierdzono, że właściwościami, które związane były istotnie z wszystkimi branyymi pod uwagę

cechami drzew były *CS* i *MOE*. Obie właściwości najsilniej korelowały z $d_{1,3}$. *Qu* korelowała umiarkowanie z $d_{1,3}$ i słabo z l_k , natomiast *BS* umiarkowanie korelowała zarówno z $d_{1,3}$ jak i l_k . Cechami drzewa, które istotnie ($p < 0,05$) korelowały z wszystkimi właściwościami drewna, były pierśnica i długość korony (tab. 4).

Badając związki między cechami drzew a właściwościami drewna w różnych częściach strzał, stwierdzono, że na poziomie pierśnicy najsilniejszy związek, istotny statystycznie ($p < 0,05$), był między $d_{1,3}$ i *MOE* (korelacja umiarkowana). W tej części strzały *Qu* nie korelowała z żadną cechą drzewa, *CS* było słabo skorelowane z h_d , umiarkowanie z $d_{1,3}$ i słabo z l_k . *BS* było słabo skorelowane z $d_{1,3}$, *MOE* umiarkowanie z $d_{1,3}$ i słabo z l_k (tab. 4). W części strzały odpowiadającej 20% wysokości drzewa z pierśnicą najsilniej związana była *CS*, a z długością korony *MOE*. Od wysokości drzewa istotnie współzależały *Qu* i *CS*, a od szerokości korony *BS* i *MOE* ($p < 0,05$) (tab. 4).

W punkcie odpowiadającym 40% wysokości drzewa $d_{1,3}$ i l_k statystycznie istotnie ($p < 0,05$) korelowały z wszystkimi analizowanymi właściwościami drewna. Słaby związek korelacyjny był między h_d i CS oraz między d_k a Qu , BS i MOE (tab. 4). W punkcie wyższym (60% wysokości drzewa) $d_{1,3}$ oraz l_k i d_k istotnie ($p < 0,05$) korelowały z wszystkimi właściwościami. Z $d_{1,3}$ najsilniej związane było CS (najwyższa wartość współczynnika korelacji przy $p < 0,05$) i nieco słabiej BS (mniejsza wartość współczynnika). Z szerokością korony najsilniej był skorelowany MOE , a najslabiej Qu (tab. 4).

W najwyżej położonej części strzały (80% wysokości drzewa) właściwości drewna w najmniejszym stopniu korelowały z analizowanymi cechami drzew. Istotny współczynnik korelacji ($p < 0,05$) stwierdzono jedynie między $d_{1,3}$ i MOE (tab. 4).

4. Dyskusja

W celu sprawdzenia przypuszczenia, że niektóre cechy pnia i korony sosny zwyczajnej są skorelowane z właściwościami drewna młodocianego, przeanalizowano między innymi gęstość umowną, wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien, na zginanie statyczne oraz wartość modułu elastyczności przy zginaniu. Z cech drzew wybrano: pierśnicę, wysokość drzewa, długość i szerokość korony. W przypadku gęstości umownej jej ogólną wartość określono na poziomie 416 kg/m^3 , czyli porównywalnym do wyników, jakie uzyskali Tomczak et al. (2010) i Gryc et al. (2011). Przeciętna wytrzymałość drewna młodocianego sosny zwyczajnej na ściskanie wzdłuż włókien wyniosła 22,3 MPa, wytrzymałość na zginanie statyczne – 45,8 MPa, wartość modułu elastyczności – 4726 MPa. Zbliżone wartości wytrzymałości drewna młodocianego uzyskali między innymi Pikk i Kask (2004) oraz Tomczak i Jelonek (2012). Badane drzewa charakteryzowały się pierśnicą rzędu 34 cm, wysokością wynoszącą 26 m, koroną długą na 7,8 m, średnicą korony wynoszącą 3,8 m. Są to wymiary pnia i korony typowe dla sosny w tym wieku (Kaźmierczak 2009; Turski et al. 2012).

Analizowane właściwości drewna, zarówno w ujęciu ogólnym, jak i przy podziale pnia na części, w różnym stopniu korelowały z cechami drzew. Wszystkie współczynniki miały wartość ujemną, co oznacza, że wraz ze wzrostem wymiarów drzew właściwości drewna młodocianego ulegają pogorszeniu. Zróżnicowanie właściwości drewna młodocianego wynika ze zróżnicowania dynamiki przyrostu drzew na grubość. Zazwyczaj drzewa grubsze, wyższe, o większych koronach, zajmujące w drzewostanie korzystniejszą pozycję bioso-

cialną, przyrastają szybciej niż drzewa cieńsze, niższe i o mniejszych koronach (Lemke 1966, 1968).

Jednym z założeń przeprowadzonej analizy było skorelowanie właściwości drewna młodocianego z różnych części pnia, czyli wykształconego w różnych okresach życia drzewa, z jego wymiarami w wieku dojrzałym. Pomimo pozornego braku związku okazało się, że właściwości drewna młodocianego wykształconego w różnych okresach życia drzewa korelują z cechami biometrycznymi drzewa w wieku dojrzałym, a w szczególności z pierśnicą oraz długością korony. Pierśnica jest pochodną przyrostu drzewa na grubość. Od dynamiki tego procesu będą w znacznej mierze zależeć wartości parametrów technicznych. Długość korony to w przypadku sosny cecha, uważana za jeden z istotniejszych wskaźników stabilności drzewa (Jelonek et al. 2013). Z uwagi na fakt, że elementami układu biomechanicznego drzewa są zarówno cechy biometryczne drzew, jak i właściwości drewna, stwierdzone korelacje wydają się być efektem naturalnych, genetycznie uwarunkowanych schematów rozwojowych. Różnicowanie się drzew pod względem cech biometrycznych (biosocjalnym) rozpoczyna się już w bardzo wczesnym okresie rozwoju drzewostanu. Ewentualny spadek lub awans pozycji biosocjalnej dotyczy około 40% drzew (Beker 2008). Można więc założyć, że u większości drzew w drzewostanie, już od wczesnych faz rozwojowych wykształcana jest tkanka drzewna o strukturze i parametrach odpowiednich dla rozmiarów drzewa dojrzałego.

Drewno młodociane często nazywane jest drewnem formowanym w tej części pnia, którą obejmuje żywa część korony (crown-formed wood; Paul 1957). Tomczak i in. (2007), analizując zasięg drewna dojrzałego na przekroju podłużnym pnia sosny zwyczajnej, doszli do wniosku, że do szacowania zasięgu drewna dojrzałego można wykorzystać średnicę korony, a długość korony jest w tym wypadku nieprzydatna. W przypadku właściwości drewna predykcję można oprzeć zarówno na średnicy jak i długości korony.

Rozwój drzewa to stały wzrost jego wymiarów i masy. Pod wpływem masy, szczególnie korony, pień poddawany jest silnym naprężeniom statycznym i dynamicznym. Naprężenia wywołują reakcję kambium, która prowadzić może do zamian w strukturze i właściwościach drewna, a także zmian w kształcie pnia (Telewski 1995; Robertson 1991; Tomczak et al. 2012), obejmujących przede wszystkim jego dolną część. W części wierzchołkowej naprężenia statyczne i dynamiczne są mniejsze. Mając na uwadze zasadę tworzenia maksymalnie wytrzymałej struktury przy jak najmniejszym wydatku energetycznym, wytłumaczyć można, między innymi, osiową zmienność właściwości drewna młodocianego. Wartości wszystkich parametrów technicznych generalnie malały wraz ze wzrostem odległości od

podstawy pnia, co jest również swoistą cechą ogólnej zmienności drewna w pniu sosny zwyczajnej (Helińska-Raczkowska et Fabisiak 1994; Repola 2006; Ikonen et al. 2008; Witkowska et Lachowicz 2013).

Jak wskazują uzyskane wyniki, pomiędzy cechami drzew a właściwościami tkanki drzewnej występuje wiele zależności. Właściwości drewna młodocianego sosny korelują głównie z pierśnicą i długością korony, a w części środkowej pnia także ze średnicą korony, które dość istotnie wpływają na stabilność drzew. Z powyższych relacji wynikać więc może fakt, że drewno młodociane jest istotnym elementem układu biomechanicznego drzewa. Jest jedną z licznych modyfikacji drewna, czy też procesów optymalizujących budowę organu, którego głównym zadaniem jest przenoszenie obciążeń statycznych i dynamicznych oraz transport wody. W tym sensie pień drzewa przypomina belkę złożoną, która zbudowana jest z tkanki o różnych właściwościach, zależnych od etapu rozwoju (rozmiarów) drzewa, w którym się formowała.

5. Wnioski

Właściwości drewna, analizowane zarówno w ujęciu ogólnym, jak i przy podziale pnia na części, w różnym stopniu korelowały z cechami drzew. Wszystkie współczynniki miały wartość ujemną, co oznacza, że drzewa o większych wymiarach wykształcają drewno młodociane o gorszych właściwościach.

Właściwości drewna młodocianego wykształconego w różnych okresach życia drzewa związane były szczególnie z pierśnicą oraz długością korony. W niewielkim stopniu korelowały z wysokością drzewa. Natomiast ze średnicą korony istotnie korelowały właściwości drewna ze środkowej części pnia.

Podziękowania

Praca została wykonana ze wsparciem finansowym Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu NN 309108240 “Wpływ obciążenia drzew przez wiatr na zróżnicowanie wybranych parametrów technicznych drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.).

Literatura

Amarasekara H., Denne M. P. 2002. Effects of crown size on wood characteristics of Corsican pine in relation to definitions of juvenile wood, crown formed and core wood. *Forestry*, 75(1): 51–61.

- Beker C. 2008. Zmiana struktury biosocjalnej w niepielęgnowanych drzewostanach sosnowych. *Sylwan*, 5: 44–51.
- Gryc V., Vavrčik H., Horn K. 2011. Density of juvenile and mature wood of selected coniferous species. *Journal of Forest Science*, 57 (3): 123–130.
- Hanrup B., Danell Ö., Ekberg I., Moëll M. 2001. Relationship between wood density and tracheid dimension in *Pinus sylvestris* L. *Wood and Fiber Science*, 32(2): 173–181.
- Helińska-Raczkowska L., Fabisiak E. 1994. Zmienność wybranych cech budowy drewna młodocianego drewna sosny wzdłuż wysokości drzew. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu*, 262: 3–13.
- Fabisiak E. 2005. Zmienność podstawowych elementów anatomicznych i gęstości drewna wybranych gatunków drzew. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, Rozprawy Naukowe*, 369: 1–176
- Fries A., Ericsson T. 2006. Estimating genetic parameters for wood density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Silvae Genetica*, 55 (2): 84–92.
- Hejnowicz Z. 2002. Anatomia i histogeneza roślin naczyniowych. Warszawa, PWN. ISBN 83-01-13825-4.
- Ikonen V.-P., Peltola H., Wilhelmsson L., Kilpeläinen L., Väisänen H., Nuutinen T., Kellomäki S. 2008. Modelling the distribution of wood properties along the stems of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) as affected by silvicultural management. *Forest Ecology and Management*, 256: 1356–1371.
- Jakubowski M. 2004. Proportion of juvenile and mature wood in stems of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) versus the volume of tree crowns. *Annals of Warsaw Agriculture University – SGGW, Forestry and Wood Technology*, 55: 254–258.
- Jelonek T., Walkowiak R., Jakubowski M., Tomczak A. 2013. Wskaźniki stabilności drzew w drzewostanach sosnowych uszkodzonych przez wiatr. *Sylwan*, 157(5): 323–329.
- Każmierczak K. 2009. Wybrane miary przestrzeni wzrostu pojedynczego drzewa w bliskorębnym drzewostanie sosnowym. *Sylwan*, 153 (5): 298–303.
- Kraft G. 1884. Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover, Klindworth.
- Kučera B. 1994. A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in Norway spruce. *Wood and Fiber Science*, 26: 154–167.
- Lemke J. 1966. Korona jako kryterium oceny dynamiki wzrostowej drzew w drzewostanie sosnowym. *Folia Forestalia Polonica, Series A*, 12: 185–236.
- Lemke J. 1968. Związek pomiędzy wielkością korony a przyrostem drzew w drzewostanach sosnowych. *Prace Komisji Nauk Rolniczych i Komisji Nauk Leśnych PTPN*, 25: 1–48.
- Mansfield S. D., Parish R., Goudie J. W., Kang K.-Y., Ott P. 2007. The effects of crown ratio on the transition from juvenile to mature wood production in lodgepole pine in western Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(8): 1450–1459.
- Mutz R., Guillely E., Sauter U. H., Nepveu G. 2004. Modeling juvenile-mature wood transition in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using nonlinear mixed-effects models. *Annals of Forest Science*, 61: 831–841.

- Paul B. H. 1957. Juvenile wood in conifers. FPL Rep. 2094, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 6 p.
- Pazdrowski W. 2004. The proportion and some selected physical and mechanical properties of juvenile, maturing and adult wood of black pine and Scots pine. *EJPAU* 7(1) #03.
- Pazdrowski W., Jakubowski M. 2000. Objętość korony a udział drewna młodocianego w strzale sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) Materiały III Konferencji Leśnej. Warszawa, IBL, 268–273.
- Pazdrowski W., Splawa-Neyman S. 1997. Macrostructure of Scots pine wood from unripe forest stands grown in conditions of fresh forest. *Folia Forestalia Polonica, Series B*, 28: 41–46.
- Pazdrowski W., Tomczak A., Jelonek T., Duma M., Szaban J., Jakubowski M. 2007. The effects of live crown reduction during artificial pruning on share of juvenile wood tissue in stems of Scots pines (*Pinus sylvestris* L.). *Annals of Warsaw Agriculture University – SGGW, Forest and Wood Technology*, 62: 126–129.
- Pikk J., Kask R. 2004. Mechanical properties of juvenile wood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on myrtillus forest site type. *Baltic Forestry*, 10(1): 72–78.
- PN-63/D-04117 Fizyczne i mechaniczne właściwości drewna. Oznaczanie współczynnika sprężystości przy zginaniu statycznym.
- PN-77/D-04101 Drewno. Oznaczanie gęstości.
- PN-77/D-04103 Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie statyczne.
- PN-79/D-04102 Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien.
- Repola J. 2006. Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density. *Silva Fennica*, 40 (4): 673–685.
- Robertson A. 1991. Centroid of wood density, bole eccentricity, and tree-ring width in relation to vector winds in wave forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 21(1): 73–82.
- Telewski F. W. 1995. Wind-induced physiological and developmental responses in trees. In: Cottus M. P., Grace J. (eds) *Wind and Trees*: 237–263.
- Tomczak A., Jelonek T. 2012. Parametry techniczne młodocianego i dojrzałego drewna sosny zwyczajnej. *Sylwan*, 156(9): 695–702.
- Tomczak A., Jelonek T., Pazdrowski W. 2012. Ekscentryczność pni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z drzewostanów silnie eksponowanych na wiatr. *Forestry Letters*, 103: 41–46.
- Tomczak A., Jelonek T., Pazdrowski W., Duma M. 2005. Selected biometric traits of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stems as the basis for the assessment of the volume and proportion of mature wood. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 4(2): 113–121.
- Tomczak A., Jelonek T., Zoń L. 2010. Porównanie wybranych właściwości fizycznych drewna młodocianego i dojrzałego sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z drzewostanów rębnych. *Sylwan*, 154(12): 809–817.
- Tomczak A., Pazdrowski W., Jelonek T. 2007a. Distribution of intermediate and mature wood on the longitudinal cross section of the tree trunk and selected biometric traits of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Baltic Forestry*, 13(1): 116–125.
- Tomczak A., Pazdrowski W., Jelonek T., Stypuła I. 2006. Selected biometric traits of Scots pine tree stems developed in conditions of the fresh coniferous forest as the basis of the evaluation of juvenile wood volume. *Annals of Warsaw Agriculture University – SGGW, Forestry and Wood Technology*, 59: 311–315.
- Tomczak A., Pazdrowski W., Jelonek T., Stypuła I. 2007b. Vertical variability of selected macrostructural properties of juvenile wood organization in trunks of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 76(1): 27–33.
- Turski M., Jaszczak R., Deus R. 2012. Wybrane charakterystyki koron drzew i ich związek z pierśnicą oraz wysokością w drzewostanach sosnowych różnych klas wieku. *Sylwan*, 156 (5): 369–378.
- Wąsik R. 2010. Związki między wybranymi parametrami korony a cechami makrostruktury i gęstością drewna daglezi zielonej (*Pseudotsuga menziesii* var. *viridis* Franco). *Sylwan*, 154 (11): 783–790.
- Witkowska J., Lachowicz H. 2013. Zmienność gęstości umownej drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w zależności od wybranych czynników. *Sylwan*, 157(5): 336–347.
- Verkasalo E. 1992. Relationships of the modulus of elasticity and the structure of Finnish Scots pine. *Silva Fennica*, 26(3): 155–168.
- Zajączkowska U. 2006. Optymalizacja kształtu i struktury drzewa według teorii jednorodnego rozkładu naprężeń. *Sylwan*, 4: 53–58.
- Zobel B. J., Sprague J. R. 1998. Juvenile wood in forest trees. Berlin – Heidelberg – New York, Springer Verlag.

Relationships between selected tree characteristics and the properties of juvenile wood in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)

Arkadiusz Tomczak

Poznań University of Life Sciences, Department of Forest Utilisation, ul. Wojska Polskiego 71A, 60–625 Poznań, Poland.

Tel. +48 61 848 77 56; e-mail: arkadiusz.tomczak@up.poznan.pl

Abstract. The aim of this study was to determine relationships between selected properties of juvenile wood and characteristics of the stem and crown of Scots pine. Analyses were conducted in northern Poland on eight mature pine monocultures. Nine trees were selected in each experimental site and their stems were divided into five sections. The centers of the sections were established at a height of 1.3 m from the tree base and at points corresponding to 20, 40, 60 and 80% tree height. Samples were taken from these locations, and these samples were prepared for analyses of basic density, compressive strength along the grain and static bending, as well as the modulus of elasticity during bending. The mean height of the investigated group of trees was 26.0 m with an average diameter breast high of 33.6 cm. The mean crown depth was 7.8 m and crown diameter was 3.6 m, and the mean basic density (Q_u) of juvenile pine wood was 416 kg/m³. The average compressive strength along the grain (CS) was determined to be 22.3 MPa, while static bending strength (BS) was 45.8 MPa. The recorded modulus of elasticity (MOE) was 4726 MPa.

Both in general terms and when dividing stems into sections, the wood properties correlated with tree characteristics to various degrees. All indexes were negative indicating that trees of greater dimensions produce juvenile wood of inferior quality. Properties of juvenile wood formed during various periods of tree life were mostly related to diameter breast high and crown depth. They were also correlated with tree height, but only to a limited extent. In contrast, properties of wood from the middle stem sections were significantly correlated with crown diameter.

Key words: basic density, strength perpendicular to grain, bending strength, modulus of elasticity, breast height diameter, tree height, crown length, crown diameter

1. Introduction

Properties of wood result first of all from its structure (Verkasalo 1992; Hanrup et al. 2001). Structure of wood, without features conditioned genetically, is on the other hand a result of growth conditions and tree development including inter alia site type and treatments breeding (Pazdrowski and Splawa-Neyman 1997). In this special system of interactions, features (dimensions) of a stem and crown occupy a place between conditions of growth and tree's development and structure and features of wood. According to Jelonek (2013), there is no relationship between

wood density and Scots pine stem and crown features. The author states, however, the relationship of stem and crown features in case of compressive strength along fibres and static bending strength. In relation to diameter breast height (dbh) and crown length, relations mentioned above are reverse and in relation to tree's height and crown's width, they are directly proportional. Wąsik (2000), after analysing relations between chosen parameters of crown and features of Coast Douglas-fir wood macrostructure, stated that trees with longer and wider crown had significantly wider annual increments than increments of trees with shorter and narrower crowns. At coniferous, bigger width of annu-

al increment in thickness means smaller share of latewood and worse technical parameters of wood (Fabisiak 2005). Smaller crown means also smaller weight resting on stem. Stem's cross-section may have consequently smaller area than in case of trees with big and heavy crowns. It is an effect of a process depending on forming maximally durable structure with the lowest possible energy investment (Zajączkowska 2006).

According to many researches, the influence of tree's crown on structure forming and wood properties is particularly vivid in juvenile wood (Pazdrowski and Jakubowski 2000; Amarasekara and Denne 2002; Jakubowski 2004; Mansfield et al. 2007). Juvenile wood is a wood tissue placed in central part of stem's cross-section, within a dozen or so annual increments to thickness (Mutz et al. 2004; Fries and Ericsson 2009). Juvenile wood is characterised with smaller share of cellulose, bigger inclination angle of fibrils in cell walls and smaller share of latewood. All those features have influence on mechanical properties. That is why juvenile wood is mechanically weaker than mature wood (Zobel and Sprague 1998; Pazdrowski 2004). In case of pine, a difference between juvenile and mature wood default density amounts around 25 kg/m³. Compressive strength along fibres of juvenile wood is smaller by around 3 MPa, and static bending strength smaller by around 7 MPa (Tomczak and Jelonek 2012). Juvenile wood on stem's longitudinal section occurs on its whole length, that is why the top part of tree may be built exclusively from this type of tissue. Mature wood, which surrounds juvenile wood with a ring, occurs in stem's base. With age, its range increases and with mature trees, it amounts around 85% of tree's height (Tomczak et al. 2007a). The tree's features such as dbh, height and volume strongly correlate with juvenile wood share and mature wood share (Tomczak et al. 2005; Tomczak et al. 2006). A special influence of crown on forming of tree's tissue may constitute the fact that in case of its partial reduction (artificial pruning) share of juvenile wood in trees stem was lower than in control trees in which assimilation apparatus was not reduced (Pazdrowski et al. 2007). As Hejnowicz (2002) states, juvenile wood is produced under strong influence of leaves closeness. Time of its formation in stem depends on how low tree's crown reaches. Similarly states Kučera (1994), who links the fact of juvenile wood forming with dynamics of trees annual increment to height.

Between juvenile wood from butt end part and from top part of stem occur vivid differences in macro-structural construction (Tomczak et al. 2007b). They are probably connected with changes occurring in tree's bi-

omechanical system during its growth and development and with effect of tendency for forming maximally durable structure (connected with tree's dimensions, especially with dimensions in mature age) with the smallest energetic cost. Having in mind above supposition, it was assumed in study that chosen properties of juvenile wood and some features of stem and crown are correlated.

2. Research methodology

Choice and measurements on experimental plots

Research was conducted in the northern part of Poland (Szczecinek Regional Directorate of State Forests) in eight mature pine's monocultures. Forest stands chosen for research grew in conditions of fresh mixed coniferous forest and were characterised with I site index and broken-crown closure stocking from 0.7 to 1.1. Their age ranged from 82 and 89 years, average dbh ranged from 31 and 37 cm, and height between 24 and 27 m.

In each forest stand, sample plots were set, on which the features of all growing trees, i.e. height (m), dbh in two opposite directions (cm), height of first living branch seating (m) and crown's diameter in two opposite directions (m), were measured. Measurements of height and seating of first living branch were made with the use of Nikon Forestry hypsometer with rounding to 0.1 m. Dbh in bark ($d_{1.3}$) was measured twice with caliper, with rounding to 0.5 cm, and then the result was averaged. Crown's diameter (d_k) was defined on the basis of two averaged measurements, performed with rangefinder with accuracy to 0.1 m. After obtaining data, i.e. height measurement and seating of living crown, living crown length (l_k) was calculated by subtracting the height of the first living branch seating of a compact crown from the tree's height (h_d).

Choice of model trees and materials for laboratory research

On the basis of characteristics of trees growing on sample plots, chosen were model trees using Ulrich I dendrometric method. Due to trees diversity to weight, thickness and size of crown for model trees selection, Kraft's classification (1884) was used. For research, chosen were trees without any vivid anomalies in stem's shape and with symmetrically developed crown were chosen. On each plot selected were nine trees. Jointly, the research covered 72 model trees.

After cutting the trees, the stems of model trees were divided to five sections. The centre of the first section

was marked on 1.3 m from stem's base, and next in points corresponding to 20%, 40%, 60% and 80% of stem length. From those places, a material was collected on which tests were performed for studying the chosen wood properties. Test included part of stem between core and circuit, on two opposite radius-oriented east–west to world directions. First sample was set 1 cm from the core. Collected samples were numbered in sequence. In next stages, only two samples placed closest to the core, with sample centres placed 2 and 4 cm from the core, were included. Such a proceeding allowed conducting research on materials only from the juvenile part of cross-section of the stem.

Laboratory research

Four wood properties were examined: basic density (Qu), compressive strength perpendicular to grain (CS), static bending strength (BS) and modulus of elasticity in bending (MOE). Basic density (kg/m^3) was defined on samples of dimensions $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, as a relation of mass in state of absolute dry to volume in state of maximum swell ($w > 30\%$). Maximum swell of pelli-cles (wood humidity over 30%) was obtained by submergence of samples in water, until the moment of reaching dimensional stability, i.e. until the increments of particular samples' dimensions measured in 72-h gap were equal or smaller than 0.2 mm. The mass of samples was defined with the use of laboratory scale with accuracy to 0.001 g. For defying linear dimensions of samples, a slide caliper was used, rounding results to 0.01 mm (PN-77/D-04101).

Mechanical properties were defined on the basis of endurance tests. For obtained results to be close to wood properties by which growing trees stems are characterised, analysis were made at humidity higher than 30% – above fibre saturation point. Compressive strength along fibres (MPa) was defined on samples with standardised dimensions $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, whereas static bending strength (MPa) and modulus of elasticity in bending (MPa) on samples of dimensions $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ according to procedure's included in norms: PN-63/D-04117; PN-77/D-04103; PN-79/D-04102, with the above-described modification concerning wood humidity.

Statistical analysis

Each of wood properties and trees features was characterised with basic position and dispersion measures: mean, quartiles, minimum and maximum value, standard deviation and variation coefficient. Analysed were jointly 1320

samples for Qu and CS establishment and 1278 samples for BS and MOE values establishment. Each of those sets was additionally divided to five subsets, representing individual zones of stem and was, respectively, characterised statistically. Relations between trees features and wood properties defined were with the use of correlation coefficients. Adopted was that coefficient value from 0.0 to 0.2 is a very weak correlation, 0.2–0.4 weak correlation, 0.4–0.6 moderate correlation, 0.6–0.8 strong and from 0.8 to 1.0 very strong. Calculations were made with the use of statistical package Statistica (Statasoft, Inc.)

3. Research results

Trees' features characteristic and juvenile wood properties

The average height of trees of examined group was 26.0 m (median 25.8 m). Average dbh equalled 33.6 cm (median 33.5 cm). Length of crown was 7.8 m and width 3.6 m, median values for those features were, respectively, 8.1 and 3.8 m. The smallest variability was in case of height, and the biggest was in crown width. Crown's features were characterised with greater variability than stem's features (Table 1).

Average basic density (Qu) of pine's juvenile wood was 416 kg/m^3 . Average compressive strength along fibres (CS) was defined on 22.3 MPa level, and static bending strength (BS) was 45.8 MPa. The value of elasticity modulus (MOE) was 4726 MPa. Median value of all features was very close to average values. The smallest variability coefficient was stated with Qu , and the biggest in case of MOE (Table 2).

On longitudinal section of stem, the average value of basic density ranged from 385 to 473 kg/m^3 (difference $88 \text{ kg/m}^3 - 18.6\%$). The highest value was stated on dbh level and the smallest on level corresponding to 60% of tree's height. Median describing Qu had a value close to average, variability coefficient ranged from around 7 to around 11%. CS value ranged from 20.2 to 24.8 MPa (difference 4.6 MPa – 18.6%), BS between 39.5 and 53.5 MPa (difference 14.0 MPa – 26.1%) and MOE between 3872 and 5556 MPa (difference 1684 MPa – 30.3%). Values of wood mechanical properties, unlike Qu value, decreased systematically with an increase of place of measurement distance from stem's base. Median values were also very close to averages. Results were not interrupted, therefore, by samples with outlier values. As for mechanical properties, with the biggest variability was characterised MOE , with the smallest – CS (Table 3).

Table 1. Statistical characteristics of the tree features

Feature	Mean	Median	Min	Max	Q ₂₅	Q ₇₅	SD	VC (%)
h_d (m)	26.0	25.8	18.5	33.8	23.8	28.3	2.8	10.85
$d_{1.3}$ (cm)	33.6	33.5	21.0	45.0	29.5	40.0	6.9	20.67
l_k (m)	7.8	8.1	2.9	14.2	6.0	9.6	2.3	30.10
d_k (m)	3.8	3.6	1.6	7.9	2.6	5.0	1.6	40.65

h_d – tree height; $d_{1.3}$ – dbh; l_k – crown length; d_k – crown diameter; SD – standard deviation; Q₂₅ – lower quartile; Q₇₅ – upper quartile; VC – variability coefficient

Table 2. Statistical characteristics of the wood features

Feature	Mean	Median	Min	Max	Q ₂₅	Q ₇₅	SD	VC
Qu (kg/m ³)	416	415	356	501	397	432	29	7.00
CS (MPa)	22.3	22.4	16.5	27.9	20.9	23.8	2.4	10.59
BS (MPa)	45.8	46.4	33.0	60.5	41.6	49.6	6.0	13.17
MOE (MPa)	4726	4667	3089	6567	4260	5288	732	15.49

Qu – basic density; CS – strength perpendicular to grain; BS – bending strength; MOE – modulus of elasticity; SD – standard deviation; Q₂₅ – lower quartile; Q₇₅ – upper quartile; VC – variability coefficient

Table 3. Statistical characteristics of features of the juvenile wood from different height levels of stem

Feature	Height level*	Mean	Median	Min	Max	Q ₂₅	Q ₇₅	SD	VC
Qu (kg/m ³)	$d_{1.3}$	473	475	358	613	446	504	51	10.72
	20%	423	421	333	619	389	447	44	10.38
	40%	399	398	335	499	380	420	33	8.37
	60%	385	385	339	454	364	403	28	7.34
	80%	396	392	325	564	366	415	42	10.68
CS (MPa)	$d_{1.3}$	24.79	24.65	14.82	35.50	21.96	27.70	4.08	16.47
	20%	23.19	23.17	16.31	30.34	21.47	25.34	2.89	12.45
	40%	22.16	22.12	16.21	31.50	20.64	23.61	2.88	12.99
	60%	20.66	20.47	15.90	28.84	18.63	21.93	2.67	12.90
	80%	20.17	20.07	14.81	29.16	17.97	21.67	2.86	14.16
BS (MPa)	$d_{1.3}$	53.51	53.57	34.54	73.76	47.34	58.33	8.64	16.15
	20%	48.57	48.53	31.32	64.09	44.77	54.64	7.66	15.76
	40%	46.00	45.85	29.43	67.13	40.35	50.28	7.44	16.18
	60%	41.70	40.95	30.23	62.16	37.23	45.12	6.43	15.42
	80%	39.52	38.36	26.23	56.37	35.16	44.30	6.32	16.00
MOE (MPa)	$d_{1.3}$	5556	5688	3196	7924	5043	6110	1041	18.74
	20%	5086	5143	2846	7523	4560	5744	934	18.37
	40%	4755	4734	2921	8734	4106	5181	972	20.43
	60%	4290	4292	2931	6959	3801	4628	745	17.36
	80%	3872	3859	2357	5409	3477	4394	671	17.32

* - the distance of wood sample of the base of the stem: $d_{1.3}$ – of 1.3 m, 20%, 40%, 60%, 80% – of the length of stem.

Symbols as in the Table 2

Table 4. Correlation between the trees features and the juvenile wood features (coefficients only statistically significant at $p < 0.05$ are listed)

Height level	Features of juvenile wood	Features of trees			
		h_d	$d_{1,3}$	l_k	d_k
Average for all stem	<i>Qu</i>		-0.4366	-0.3408	
	<i>CS</i>	-0.3133	-0.5895	-0.4592	-0.2396
	<i>BS</i>		-0.5064	-0.4048	
	<i>MOE</i>	-0.2341	-0.5922	-0.4655	-0.275
$d_{1,3}$	<i>Qu</i>				
	<i>CS</i>	-0.2369	-0.4343	-0.3275	
	<i>BS</i>		-0.2906		
	<i>MOE</i>		-0.4422	-0.3257	
20%	<i>Qu</i>	-0.2606	-0.4968	-0.3017	
	<i>CS</i>	-0.2495	-0.5494	-0.3394	
	<i>BS</i>		-0.4362	-0.327	-0.2893
	<i>MOE</i>		-0.5447	-0.4165	-0.2817
40%	<i>Qu</i>		-0.3952	-0.2891	-0.2839
	<i>CS</i>	-0.3173	-0.4125	-0.3537	-0.2252
	<i>BS</i>		-0.3943	-0.307	-0.2652
	<i>MOE</i>		-0.4496	-0.3453	-0.302
60%	<i>Qu</i>		-0.3109	-0.3044	-0.2591
	<i>CS</i>	-0.2393	-0.4282	-0.3519	-0.2913
	<i>BS</i>		-0.4117	-0.2922	-0.2574
	<i>MOE</i>		-0.382	-0.2767	-0.3787
80%	<i>Qu</i>				
	<i>CS</i>				
	<i>BS</i>				
	<i>MOE</i>		-0.2466		

h_d – tree height, $d_{1,3}$ – DBH inside bark, l_k – length of alive crown, d_k – crown diameter. Other symbols as in the Table 3.

Relations between trees' features and juvenile wood properties

On the basis of analysis of relations between trees' features and wood properties defined as average values for whole stem stated was that properties that were relevantly connected with considered trees features were *CS* and *MOE*. Both properties correlated strongly with $d_{1,3}$, *Qu* correlated moderately with $d_{1,3}$ and weakly with l_k , whereas *BS* moderately correlated both with $d_{1,3}$ and l_k . Tree's features that relevantly ($p > 0.05$) correlated with all properties of wood were dbh and length of crown (Table 4).

Stated was, by examining relations between tree's features and wood properties in different shaft's parts, that on dbh level the strongest relation, statistically significant ($p < 0.05$), was between $d_{1,3}$ and *MOE* (moderate correlation). In this part of shaft, *Qu* did not correlate with any tree's features, *CS* was weakly correlated with h_d , moderately with $d_{1,3}$ and weakly with l_k (Table 4). In part of shaft corresponding to 20% of tree's height, with dbh the strongest connected was *CS*, and with crown length – *MOE*. The tree's height significantly co-depended *Qu* and *CS*, and on crown's width *BS* and *MOE* ($p < 0.05$; Table 4).

At point corresponding to 40% of tree's height, $d_{1,3}$ and l_k statistically significantly ($p < 0.05$) correlated with

all analysed wood properties. Weak correlation connection was between h_d and CS and between d_k and Qu , and BS and MOE (Table 4). At higher point (60% of tree's height), $d_{1,3}$, l_k and d_k significantly ($p < 0.05$) correlated with all properties. With $d_{1,3}$, the strongest correlated was CS (the highest value of correlation coefficient at $p < 0.05$) and slightly weaker BS (smaller coefficient value). With crown width, the strongest correlated was MOE , and the weakest Qu (Table 4).

In highest part of shaft (80% of tree's height), wood properties in the smallest degree correlated with analysed trees features. Significant correlation coefficient ($p < 0.05$) was only between $d_{1,3}$ and MOE (Table 4).

Discussion

The aim of this study was to define the relations that occur between juvenile wood properties and chosen features of stem and crown of Scots pine. Analysed was inter alia basic density, compressive strength along fibres, static bending strength and modulus of elasticity in bending. From tree's features chosen were: dbh, trees height, length and width of crown. In case of basic density, its general value was defined on 416 kg/m³ level, which is a comparable result to the result obtained by Tomczak et al. (2010) and Gryc et al. (2011). Average compressive strength along fibres of Scots pine juvenile wood amounts to 22.3 MPa. Static compressive strength was 45.8 MPa and modulus of elasticity was 4726 MPa. Similar values of juvenile wood strength obtained inter alia Pikk and Kask (2004) and Tomczak and Jelonek (2012). Examined trees were characterised with dbh of around 34 cm, height of 26 m, crown 7.8-m long and crown's diameter 3.8 m. These dimensions of stem and crown are typical for pine in this age (Kaźmierczak 2009, Turski et al. 2012).

Analysed wood properties, both in general approach and with stem's division to parts in different degrees, correlated with tree's features. All coefficients had negative value, which means that with the increment of tree's dimensions, the properties of juvenile wood worsen. Diversity of juvenile wood properties results from diversity of trees increment in thickness dynamics. Usually, trees thicker, higher, with larger crowns, occupying in forest stands more favourable biosocial position increase faster than thinner, smaller trees with smaller crowns (Lemke 1966, 1968).

One of the assumptions of conducted analysis was correlating properties of juvenile wood from different parts of stem, i.e. produced in different tree's life periods, with

its dimensions in mature age. Despite apparent lack of relation, it turned out that properties of juvenile wood produced in different tree's life periods correlate with trees' biometric features in mature age (in particular with dbh and crown's length). dbh is a consequence of tree's growth in thickness. The dynamics of this process will depend notably on the technical parameter values. Length of crown is, in case of pine, a feature considered to be one of the most important coefficients of tree's stability (Jelonek et al. 2013). Due to the fact that elements of tree's biomechanical system are both tree's biometric features and wood properties, stated correlations seems to be an effect of natural genetically conditioned development schemes. Trees differentiation in terms of biometric features (biosocial) starts in very early stage of forest stand's development. Possible drop of advancement of biosocial position concerns around 40% of trees (Beker 2008). It can be assumed that with the majority of trees in forest stands, starting from early development stages, produced is wood tissue with structure and parameters adequate for mature tree's dimensions.

Juvenile wood is often called a wood formed in this part of stem, which is the living part of crown (crown-formed wood; Paul 1957). Tomczak et al. (2007) analysed the scope of mature wood on longitudinal section of Scots pine stem and stated that for estimation of mature wood range, crown's diameter can be used and crown's length in this case is useless. In case of wood properties, prediction can be based also on crown's diameter and length.

Tree's development is a constant increase of its dimensions and mass. Under mass influence, especially crown's mass, the stem undergoes strong static and dynamic tensions. Those tensions cause cambium reaction, which can lead to changes in structure and wood properties and also to changes in stem's shape (Telewski 1995; Robertson 1991; Tomczak et al. 2012), including most of all its lower part. In top part, static and dynamic tensions are smaller. Knowing the rule about creating maximally durable structure with the smallest energetic expanse possible, explained can be inter alia axial variability of juvenile wood properties. Values of all technical parameters generally decreased with an increase in distance from stem's base, which is also a specific feature of general wood variability in Scots pine stem (Helińska-Raczkowska and Fabisiak 1994; Repola 2006; Ikonen et al. 2008; Witkowska and Lachowicz 2013).

As obtained results indicate, many relations occur between tree's features and properties of tissues. Properties of pine's juvenile wood correlate mainly with dbh and crown's length and in the central part of stem also with

crown's diameter, which quite significantly influences on tree's stability. From the relations mentioned above it may result that juvenile wood is a significant element of a tree's biomechanical system. It is one of the numerous wood modifications or processes optimising organ's structure, whose main task is to transfer statistic and dynamic loads and also transport water. In this sense, tree's stem is like a complex beam, which is built-up of tissue of different properties, depending on tree's development stage (dimensions) in which it was formed.

Results

Wood properties analysed both in general approach and with stem's division into parts in different degrees correlated with tree's features. All coefficients had negative values, which means that the trees of bigger dimensions form juvenile wood with worse properties.

Properties of juvenile wood formed in different periods of tree's life connected were in particular with dbh and crown's length. In small degree, they correlated with tree's height. With crown's diameter, it significantly correlated with the properties of wood from the middle part of the stem.

Acknowledgements

The study carried out with financial support of National Science Centre as a part of project NN 309108240 'Influence of load of trees by the wind to the diversity of selected technical parameters of the wood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)'.

References

- Amarasekara H., Denne M. P. 2002. Effects of crown size on wood characteristics of Corsican pine in relation to definitions of juvenile wood, crown formed and core wood. *Forestry*, 75(1): 51–61.
- Beker C. 2008. Zmiana struktury biosocjalnej w niepielęgowanych drzewostanach sosnowych [Changes in the biosocial structure of unthinned Scots pine stands]. *Sylvan*, 5: 44–51.
- Gryc V., Vavrčik H., Horn K. 2011. Density of juvenile and mature wood of selected coniferous species. *Journal of Forest Science*, 57(3): 123–130.
- Hanrup B., Danell Ö., Ekberg I., Moëll M. 2001. Relationship between wood density and tracheid dimension in *Pinus sylvestris* L. *Wood and Fiber Science*, 32(2): 173–181.
- Helińska-Raczkowska L., Fabisiak E. 1994. Zmienność wybranych cech budowy drewna młodocianego drewna sosny wzdłuż wysokości drzew. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu*, 262: 3–13.
- Fabisiak E. 2005. Zmienność podstawowych elementów anatomicznych i gęstości drewna wybranych gatunków drzew. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, Rozprawy Naukowe*, 369: 1–176.
- Fries A., Ericsson T. 2006. Estimating genetic parameters for wood density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Silvae Genetica*, 55(2): 84–92.
- Hejnowicz Z. 2002. Anatomia i histogeneza roślin naczyniowych. Warszawa, PWN. ISBN 83-01-13825-4.
- Ikonen V.-P., Peltola H., Wilhelmsson L., Kilpeläinen L., Väisänen H., Nuutinen T., Kellomäki S. 2008. Modelling the distribution of wood properties along the stems of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) as affected by silvicultural management. *Forest Ecology and Management*, 256: 1356–1371.
- Jakubowski M. 2004. Proportion of juvenile and mature wood in stems of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) versus the volume of tree crowns. *Annals of Warsaw Agriculture University – SGGW, Forestry and Wood Technology*, 55: 254–258.
- Jelonek T., Walkowiak R., Jakubowski M., Tomczak A. 2013. Wskaźniki stabilności drzew w drzewostanach sosnowych uszkodzonych przez wiatr [Indices of tree stability in Scots pine stands damaged by wind]. *Sylvan*, 157(5): 323–329.
- Kaźmierczak K. 2009. Wybrane miary przestrzeni wzrostu pojedynczego drzewa w bliskorębnym drzewostanie sosnowym. *Sylvan*, 153(5): 298–303.
- Kraft G. 1884. Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover, Klindworth.
- Kučera B. 1994. A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in Norway spruce. *Wood and Fiber Science*, 26: 154–167.
- Lemke J. 1966. Korona jako kryterium oceny dynamiki wzrostowej drzew w drzewostanie sosnowym. *Folia Forestalia Polonica, Series A*, 12: 185–236.
- Lemke J. 1968. Związek pomiędzy wielkością korony a przyrostem drzew w drzewostanach sosnowych. *Prace Komisji Nauk Rolniczych i Komisji Nauk Leśnych PTPN*, 25: 1–48.
- Mansfield S. D., Parish R., Goudie J. W., Kang K.-Y., Ott P. 2007. The effects of crown ratio on the transition from juvenile to mature wood production in lodgepole pine in western Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(8): 1450–1459.
- Mutz R., Guilley E., Sauter U. H., Nepveu G. 2004. Modeling juvenile-mature wood transition in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using nonlinear mixed-effects models. *Annals Forest Science*, 61: 831–841.
- Paul B. H. 1957. Juvenile wood in conifers. FPL Rep. 2094, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 6 p.
- Pazdrowski W. 2004. The proportion and some selected physical and mechanical properties of juvenile, maturing and adult wood of black pine and Scots pine. *EJPAU* 7 (1) #03.

- Pazdrowski W., Jakubowski M. 2000. Objętość korony a udział drewna młodocianego w strzale sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) Materiały III Konferencji Leśnej. Warszawa, IBL, 268–273.
- Pazdrowski W., Splawa-Neyman S. 1997. Macrostructure of Scots pine wood from unripe forest stands grown in conditions of fresh forest. *Folia Forestalia Polonica, Series B*, 28: 41–46.
- Pazdrowski W., Tomczak A., Jelonek T., Duma M., Szaban J., Jakubowski M. 2007. The effects of live crown reduction during artificial pruning on share of juvenile wood tissue in stems of Scots pines (*Pinus sylvestris* L.). *Annals of Warsaw Agriculture University – SGGW, Forest and Wood Technology*, 62: 126–129.
- Pikk J., Kask R. 2004. Mechanical properties of juvenile wood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on myrtillus forest site type. *Baltic Forestry*, 10(1): 72–78.
- PN-63/D-04117 Fizyczne i mechaniczne właściwości drewna. Oznaczanie współczynnika sprężystości przy zginaniu statycznym.
- PN-77/D-04101 Drewno. Oznaczanie gęstości.
- PN-77/D-04103 Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie statyczne.
- PN-79/D-04102 Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien.
- Repola J. 2006. Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density. *Silva Fennica*, 40(4): 673–685.
- Robertson A. 1991. Centroid of wood density, bole eccentricity, and tree-ring width in relation to vector winds in wave forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 21(1): 73–82.
- Telewski F. W. 1995. Wind-induced physiological and developmental responses in trees. In: Cottus M. P., Grace J. (Eds.) *Wind and Trees*: 237–263.
- Tomczak A., Jelonek T. 2012. Parametry techniczne młodocianego i dojrzałego drewna sosny zwyczajnej [Technical parameters of juvenile and mature wood in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)]. *Sylwan*, 156(9): 695–702.
- Tomczak A., Jelonek T., Pazdrowski W. 2012. Ekscentryczność pni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z drzewostanów silnie eksponowanych na wiatr [Pine (*Pinus sylvestris* L.) trunk irregularity due to exposure to wind]. *Forestry Letters*, 103: 41–46.
- Tomczak A., Jelonek T., Pazdrowski W., Duma M. 2005. Selected biometric traits of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stems as the basis for the assessment of the volume and proportion of mature wood. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 4(2): 113–121.
- Tomczak A., Jelonek T., Zoń L. 2010. Porównanie wybranych właściwości fizycznych drewna młodocianego i dojrzałego sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z drzewostanów rębnych. *Sylwan*, 154(12): 809–817.
- Tomczak A., Pazdrowski W., Jelonek T. 2007a. Distribution of intermediate and mature wood on the longitudinal cross section of the tree stem and selected biometric traits of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Baltic Forestry*, 13(1): 116–125.
- Tomczak A., Pazdrowski W., Jelonek T., Stypuła I. 2006. Selected biometric traits of Scots pine tree stems developed in conditions of the fresh coniferous forest as the basis of the evaluation of juvenile wood volume. *Annals of Warsaw Agriculture University – SGGW, Forestry and Wood Technology*, 59: 311–315.
- Tomczak A., Pazdrowski W., Jelonek T., Stypuła I. 2007b. Vertical variability of selected macrostructural properties of juvenile wood organization in stems of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 76(1): 27–33.
- Turski M., Jaszczak R., Deus R. 2012. Wybrane charakterystyki koron drzew i ich związek z pierśnicą oraz wysokością w drzewostanach sosnowych różnych klas wieku [Selected features of tree crowns and their relationship with the dbh and height in pine tree-stands of different age classes]. *Sylwan*, 156(5): 369–378.
- Wąsik R. 2010. Związki między wybranymi parametrami korony a cechami makrostruktury i gęstością drewna daglezi zielonej (*Pseudotsuga menziesii* var. *viridis* Franco) [Relationships between selected crown parameters and the macrostructure properties and density of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *viridis* Franco) Wood]. *Sylwan*, 154(11): 783–790.
- Witkowska J., Lachowicz H. 2013. Zmienność gęstości umownej drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w zależności od wybranych czynników [Variability of conventional wood density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) depending on the selected factors]. *Sylwan*, 157(5): 336–347.
- Verkasalo E. 1992. Relationships of the modulus of elasticity and the structure of Finnish Scots pine. *Silva Fennica*, 26(3): 155–168.
- Zajączkowska U. 2006. Optymalizacja kształtu i struktury drzewa według teorii jednorodnego rozkładu naprężeń [Optimization of tree structure and shape according to axiom of uniform stress]. *Sylwan*, 4: 53–58.
- Zobel B. J., Sprague J. R. 1998. Juvenile wood in forest trees. Berlin – Heidelberg – New York, Springer Verlag.