

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE I REOLOGICZNE WYBRANYCH ODMIAN BURAKA ĆWIKŁOWEGO

J. Bohdziewicz

Instytut Inżynierii Rolniczej AR, ul. Chelmońskiego 37/41, 51-630 Wrocław
e-mail: bohdziewicz@imr.ar.wroc.pl

Streszczenie: Przedstawiono wyniki badań, realizowanych w postaci testu ściskania, próbek miąższu korzeni wybranych odmian buraków ćwikłowych. Obliczono zmiany wartości modułu sprężystości: stycznego, siecznego, zastępczego (w oparciu o równanie Clapeyrona), w zależności od wielkości korzeni oraz miejsca i kierunku pobierania próbek. Na podstawie histerezy wyznaczono stopień elastyczności oraz zmiany wartości modułu sprężystości, charakteryzujące przebieg odkształcenia całkowitego, elastycznego i plastycznego. Przyjęto dwu- i cztero- parametrowy model Maxwella, w oparciu o test relaksacji naprężeń i pelzania obliczono wartości stałej czasowej i lepkości dynamicznej, charakteryzujące oba procesy.

Słowa kluczowe: burak ćwikłowy, odmiany, wytrzymałość, reologia.

WSTĘP

Wprowadzanie nowych odmian roślin uprawnych, modyfikowanych pod względem przydatności spożywczej, wywołuje zmiany tekstury materiału, może też wpłynąć na zmiany właściwości fizycznych i chemicznych; te zaś determinują przebiegi procesów technologicznych. Do właściwego scharakteryzowania materiału pochodzenia roślinnego konieczne jest wyznaczenie jego właściwości mechanicznych i reologicznych.

Spośród warzyw korzeniowych burak ćwikłowy (*Beta vulgaris L. spp. cruenta*) wyróżnia się dużym zróżnicowaniem kształtu korzenia spichrzowego, w zależności od odmiany, oraz występowaniem pierścieni w przekroju poprze-

cznym. Występują tu kręgi kambialne, zawierające drewno i łyko wtórne, podzielone pasmami miękiszu. Pierścienie te mogą mieć różną szerokość.

Badania właściwości mechanicznych i reologicznych tej grupy roślin korzeniowych rozpoczęto w latach siedemdziesiątych. Nowicki i in.[6] badali proces relaksacji naprężeń, Bieluga i Bzowska-Bakalarz [1] histerezę tkanki buraka cukrowego. Kompleksowe badania właściwości mechanicznych i reologicznych buraka cukrowego, dla różnych odmian i dawki nawożenia, realizowała w późniejszych latach Bzowska-Bakalarz [3,4,5]. W badaniach przyjęto trzy- i cztero-elementowy standardowy model reologiczny.

Badania właściwości mechanicznych buraka ćwikłowego (wyznaczenie naprężeń niszczących i modułu sprężystości) realizował Blahovec [2]. Brak jest jednak kompleksowych opracowań, dotyczących właściwości mechanicznych i reologicznych tkanki buraka ćwikłowego, uwzględniających zróżnicowanie morfologiczne w obrębie poszczególnych odmian.

MATERIAŁ I METODY

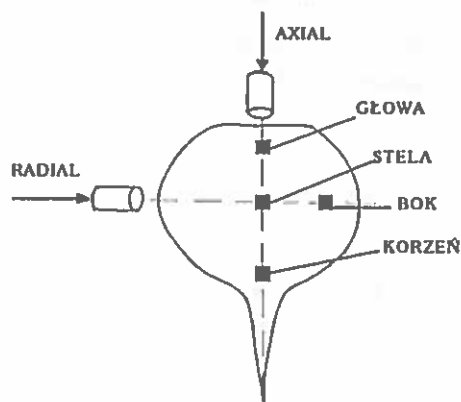
Obiektem badań były korzenie pięciu odmian buraka ćwikłowego: Czerwona Kula (kulisty); Nochowski (kulisty); Chrobry (kulisty); Okrągły Ciemnoczerwony (kulistospłaszczony); Opolski (cylindryczny). Materiał pozyskano z jednego pola, ograniczając w ten sposób wpływ zróżnicowanego oddziaływania czynników klimatycznych i agrotechnicznych.

Dla każdej odmiany przeprowadzono podział na grupy selekcyjne według średnicy korzenia. Wykorzystując standardową metodę suszarkową wyznaczono wilgotność korzeni, wyznaczano także gęstość materiału. Średnia wilgotność badanego materiału zawierała się (zależnie od odmiany) w przedziale od 84% do 87%; gęstość od 960 do 1040 kg / m³.

Ze względu na zróżnicowanie ułożenia wiązek łykodrzewnych, z korzeni pobierano próbki w kierunku osi podłużnej (axial) i w kierunku do niej prostopadłym (radial), z czterech miejsc korzenia (oznaczone jako głowa, stela, bok, korzeń), po pięć powtórzeń z każdego miejsca. Schematyczne oznaczenie miejsc i kierunku pobierania próbek z korzeni przedstawia rysunek 1.

Próbki miały kształt walca o średnicy 7 mm i wysokości $8 \pm 0,5$ mm. Aby zapewnić powtarzalność wymiarów i zmniejszyć naprężenia, powstające przy wykrawaniu próbek z korzeni, stosowano kilkuetapowy proces. W pierwszej kolejności wykonywano cięcie, aby uzyskać płaszczyznę bazową, następnie przeprowadzono cztery cięcia do niej prostopadle. Z powstałego prostopadłościanu

wykrojnikiem wycinano walec; ostatnią czynnością było osiągnięcie wymaganej wysokości walca na przyrządzie gilotypowym.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie miejsca i kierunku wycinania próbek z korzeni buraka ćwikłowego.

Fig. 1. Scheme of place and direct sampling from red beet roots.

Badania realizowano w Laboratorium Agrofizyki Instytutu Inżynierii Rolniczej Akademii Rolniczej we Wrocławiu, przy wykorzystaniu przyrządu typu Instron 5566 z głowicą o zakresie do 1 kN.

Test wytrzymałościowy

Przeprowadzono standardowe testy ściskania osiowego, przy prędkości deformacji 2 mm/min. Ze względu na istotne zróżnicowanie w przebiegu zależności $\sigma - \varepsilon$ dla poszczególnych odmian, moduł sprężystości obliczano trzema sposobami, przyjmując jako punkt odniesienia moment pojawienia się wytrzymałości doraźnej σ_{max} .

Wyznaczano: moduł styczny (tangent modulus) E_T , jako współczynnik kierunkowy prostej, aproksymującej rzeczywisty przebieg zmian naprężenia; moduł sieczny (secant modulus) E_S , jako stosunek σ_{max} do odpowiadającego mu odkształcenia ε .

Do obliczenia wartości modułu zastępczego E_C wykorzystano równanie Clapeyrona, określającego energię sprężystą ciała jako pracę sił zewnętrznych. Stosując metodę elementów skończonych obliczono pole powierzchni pod

krzywą przebiegu zmian naprężenia, a następnie potraktowano uzyskaną wartość jako iloczyn zastępczego naprężenia i rzeczywistego odkształcenia.

Badano próbki mięszu pobrane z różnych miejsc korzenia, wybrano po pięć korzeni każdej odmiany, frakcja o średnicy od 5 do 7 cm. Przeprowadzono także badania pięciu korzeni z każdej frakcji odmiany Czerwona Kula. O wyborze tej odmiany zdecydowała pełna reprezentatywność wszystkich grup selekcji wymiarowej. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabelach 1 i 2.

Pętla histerezy σ - ϵ

Badano dwie odmiany: Okrągły ciemnoczerwony i Opolski, próbki pobierane części z bocznej korzenia o średnicy 5 do 7 cm, po pięć korzeni dla powtórzeń każdego poziomu naprężeń.

Na podstawie uzyskanych wyników obliczono pracę wydatkowaną podczas odkształcenia całkowitego, elastycznego i plastycznego, wyrażoną polem powierzchni pola zawartego pod krzywą przebiegu odkształcenia. Obliczono moduł E_T , E_S , E_C dla przebiegu odkształcenia całkowitego oraz analogicznie dla przebiegu odkształcenia elastycznego. Powierzchnię pól wyznaczano metodą elementów skończonych. Wartości stopnia elastyczności S_{el} obliczono jako stosunek pracy odkształcenia elastycznego do pracy odkształcenia całkowitego.

Wyniki obliczeń stopnia elastyczności S_{el} , wartości modułu E_S , E_T , E_C , dla przebiegu pierwszej i trzeciej pętli histerezy, zamieszczono w tabeli 3.

Test relaksacji naprężeń i pelzania

Test przeprowadzono dla próbek wyciętych z części bocznej korzenia średniej wielkości. Naprężenie wstępne ustalono na poziomie 50% wartości naprężenia σ_{max} , pomiar zakończono po upływie 900 sekund. Wykorzystując specjalny program matematyczny, aproksymowano uzyskane krzywe eksperymentalne funkcją dla przebiegu : 90; 300; 900 sekund. Na podstawie uzyskanych wyników obliczano wartości modułu sprężystości E , stałej czasowej T oraz lepkości η .

Zestawienie wyników obliczeń dla trzech korzeni odmiany Czerwona Kula i Opolski, zamieszczono w tabelach 4 i 5.

Tabela 1. Zestawienie obliczonych wartości modułu sprężystości : E_T , E_S , E_C [MPa], w zależności od miejsca i kierunku wycinania próbek z korzeni wybranych odmian buraka ćwikłowego

Table 1. An analytical compilation of elastic modulus value : E_T , E_S , E_C [MPa], on dependence of place and direct of sampling from red beet roots selected cultivars

Miejsce pobrania próbek	Odmiany buraka ćwikłowego														
	Chrobry			Czerwona kula			Nochowski			Okragły ciemnoczerwony			Opolski		
	E_T MPa	E_S MPa	E_C MPa	E_T MPa	E_S MPa	E_C MPa	E_T MPa	E_S MPa	E_C MPa	E_T MPa	E_S MPa	E_C MPa	E_T MPa	E_S MPa	E_C MPa
Głowa radial	8,39	7,25	6,25	6,15	4,98	5,53	7,12	6,31	5,77	7,83	6,75	6,07	7,26	6,44	6,12
Głowa axial	9,18	7,87	6,29	6,17	4,96	5,12	6,9	6,09	5,29	7,73	6,61	5,69	6,86	5,97	6,13
Stela radial	7,12	5,89	4,67	6,82	5,3	4,62	6,82	6,07	5,16	7,8	6,25	4,38	6,92	6,01	5,1
Stela axial	8,17	6,95	4,77	6,1	4,88	4,51	7,68	6,69	5,24	7,54	6,19	4,98	7,51	6,57	5,2
Bok radial	7,67	6,63	5,44	6,39	5,88	4,97	6,62	5,82	5,25	7,8	5,94	4,73	7,23	6,4	5,04
Bok axial	8,04	7,12	5,97	6,7	5,51	4,83	6,71	5,93	5,52	7,56	6,5	5,08	7,43	6,7	5,78
Korzeń radial	7,56	6,37	5,17	6,63	5,31	4,96	7,63	6,97	5,24	7,07	5,59	5,06	6,56	5,99	5,62
Korzeń axial	7,99	6,9	5,68	7,19	5,36	4,6	7,71	6,53	5,23	8,04	6,34	5,11	7,94	7,01	5,89

Tabela 2. Zestawienie wartości modułu sprężystości : E_T , E_S , E_C [MPa], w zależności od miejsca i kierunku wycinania próbek; burak ćwik-
łowy odmiany Czerwona Kula

Table 2. Compilation of elastic modulus value: E_T , E_S , E_C [MPa], on dependence of place and direct of sampling from red beet roots Czerwona
kula cultivar

Miejsce pobrania próbek	Fracja korzeni																	
	do 40 mm			41 do 50 mm			51 do 60 mm			61 do 70 mm			71 do 80 mm			ponad 80 mm		
	E_T MPa	E_S MPa	E_C MPa	E_T MPa	E_S MPa	E_C MPa	E_T MPa	E_S MPa	E_C MPa	E_T MPa	E_S MPa	E_C MPa	E_T MPa	E_S MPa	E_C MPa	E_T MPa	E_S MPa	
Głowa radial	8,39	6,79	6,61	7,81	6,63	6,69	6,96	5,86	5,19	5,03	4,18	4,59	5,73	5,2	5,14	6,63	5,4	4,69
Głowa axial	8,87	7,32	6,65	8,17	6,58	5,82	6,42	6,19	5,75	7,06	6,54	4,76	5,13	4,28	4,99	7,33	6,15	4,44
Stela radial	8,48	7,38	6,41	8,59	7,06	5,2	7,24	6,05	5,35	5,43	4,84	4,29	6,63	6,11	4,81	6,63	5,3	4,83
Stela axial	9,09	7,94	5,83	8,53	7,25	5,25	7,16	5,9	4,61	6,53	6,07	5,28	5,61	4,87	4,15	5,38	4,91	4,76
Bok radial	8,37	7,6	6,42	8,21	6,8	5,8	5,44	5	5,31	5,8	4,88	4,78	5,41	4,53	4,84	5,86	5,34	4,99
Bok axial	8,47	7,57	6,33	8,45	6,92	5,82	6,88	5,68	5,08	6,04	5,43	4,92	6,48	5,87	4,34	7,46	6,04	4,57
Korzeń radial	8,5	7,37	6,48	7,49	6,23	5,89	5,66	5,28	5,06	5,79	5,13	4,76	5,24	4,45	5,02	5,77	5,04	4,84
Korzeń axial	9,45	8,33	7,13	9,49	7,13	5,62	6,18	5,65	4,62	6,5	6,04	5,22	6,99	5,96	4,88	5,57	5	4,5

Tabela 3. Zestawienie obliczonych wartości : stopnia elastyczności S_e , modulu sprężystości : E_T, E_S, E_C [MPa], dla pierwszej i trzeciej pętli histerezy naprężeń . Próbkę pobrane z korzeni buraka ćwikłowego odmiany Okragły ciemnoczerwony i Opolski

Table 3. An analytical compilation of value : elasticity degree S_e, E_S, E_C [MPa], in course the first and third hysteresis loops. A samples was cut from red beet roots Okragły ciemnoczerwony and Opolski cultivars

Obciąż. w % σ_{max}	Odmiana Okragły ciemnoczerwony										Odmiana (cultivar) Opolski									
	S_d [-]	E_T [MPa]	E_S [MPa]	E_C [MPa]	E_T [MPa]	E_S [MPa]	E_C [MPa]	S_d [-]	E_T [MPa]	E_S [MPa]	E_C [MPa]	E_T [MPa]	E_S [MPa]	E_C [MPa]	E_T [MPa]	E_S [MPa]	E_C [MPa]			
I - 20%	0,47	4,97	4,46	3,43	7,73	7,04	4,38	0,52	6,44	5,44	4,04	8,75	7,86	4,36						
I - 30%	0,4	6,4	5,65	4,42	10,89	8,8	4,37	0,43	6,99	6,15	4,98	9,79	8,58	4,46						
I - 40%	0,33	6,76	6,06	5,01	11,83	10,36	4,75	0,34	6,24	5,69	4,9	10,84	9,13	4,42						
I - 50%	0,29	6,97	6,61	6,01	14,32	13,1	5,38	0,26	6,2	5,61	4,67	13,5	10,87	4,69						
I - 60%	0,29	6,33	5,86	5,24	12,57	10,41	4,64	0,23	6,67	6,08	5,06	15,58	12,17	4,63						
I - 70%	0,19	6,12	6,06	5,68	17,96	16,1	5,18	0,2	6,96	6,33	5,6	16,76	11,59	4,33						
I - 80%	0,19	6,37	6,11	5,68	16,65	12,76	5,1	0,19	5,15	6,76	5,72	18,43	12,61	4,23						
I - 90%	0,17	6,55	6,25	5,63	18,68	14,02	4,67	0,21	7,78	7,21	5,79	19,64	13,45	4,53						
III 20%	0,69	7,1	6,86	4,98	7,97	7,3	4,81	0,72	8,4	8,07	5,34	9,17	8,6	4,71						
III 30%	0,68	9,36	8,99	6,68	10,58	9,6	4,99	0,68	9,98	9,39	6,34	10,7	9,68	4,66						
III 40%	0,69	11,18	9,92	6,96	12,8	11,28	5,05	0,64	10,87	9,76	6,05	11,94	10,2	4,32						
III 50%	0,64	14,49	13,76	8,17	16,08	14,42	5,45	0,62	13,18	11,52	7,21	15,08	11,99	4,12						
III 60%	0,57	12,18	10,9	7,19	13,69	11,27	4,31	0,61	15	12,73	7,38	17,03	13,14	4,7						
III 70%	0,51	18,28	16,8	7,74	20,21	17,59	5,17	0,53	14,56	11,89	7,12	16,98	12,01	4,17						
III 80%	0,51	14,65	12,49	8,25	17,03	13,18	4,57	0,52	15,51	12,38	6,89	18,92	13,4	4,13						
III 90%	0,49	16,37	13,83	8,48	18,83	14,65	4,68	0,54	15,96	12,91	6,32	19,72	13,74	4,13						

Tabela 4. Zestawienie obliczonych wartości parametrów charakterystycznych dla procesu pelzania ; próbki miąższu buraka ćwikłowego odmiany Czerwona kula i Opolski

Table 4. An analytical compilation of typical parameters of creep ; samples from red beet roots Czerwona kula and Opolski cultivars

Czas pomiaru t [s]	Model Maxwella dwu-parametrowy					Model Maxwella cztero-parametrowy						
	E_1 [MPa]	τ_1 [s]	η_1 [MPa*s]	r^2		E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	τ_1 [s]	τ_2 [s]	η_1 [MPa*s]	η_2 [MPa*s]	r^2
Odmiana Czerwona kula – kierunek radial												
pomiar 1	90	29,532	87,79	2593	0,8967	64,606	39,285	11,23	394,88	726	15513	0,9969
	300	39,177	33,26	1303	0,9266	92,623	52,486	5,99	115,77	555	6076	0,9982
	90	51,345	15,75	809	0,9666	151,064	61,592	3,09	40,77	467	2511	0,9995
pomiar 2	900	28,539	91,09	2599	0,8951	64,039	37,477	10,52	390,85	674	14648	0,9972
	300	38,062	33,36	1270	0,9355	87,823	50,617	6,04	125,03	531	6329	0,9982
	90	50,926	14,79	753	0,9664	143,546	61,437	3,13	40,28	449	2475	0,9995
pomiar 3	900	30,856	82,78	2554	0,8955	66,070	42,188	10,94	383,01	723	16158	0,9966
	300	40,652	31,85	1295	0,9386	95,113	55,102	5,78	111,77	550	6159	0,9983
	90	53,657	14,71	789	0,9664	151,573	64,567	3,10	40,02	470	2584	0,9995
Odmiana Czerwona kula – kierunek axial												
pomiar 1	900	32,139	76,97	2474	0,8955	68,520	44,946	10,17	352,90	697	15861	0,9968
	300	41,849	30,46	1275	0,9366	94,763	57,351	5,82	113,86	551	6530	0,9984
	90	55,116	14,05	774	0,9670	148,252	67,695	3,25	39,81	481	2695	0,9995
pomiar 2	900	29,285	79,11	2317	0,9032	62,180	40,629	11,93	366,24	742	14880	0,9967
	300	38,074	33,18	1263	0,9445	92,822	51,175	6,04	106,77	561	5464	0,9983
	90	49,441	16,42	812	0,9684	152,183	58,171	3,12	40,95	474	2382	0,9996
pomiar 3	900	28,600	89,48	2559	0,9008	63,943	38,232	11,19	377,67	716	14439	0,9969
	300	35,338	34,00	1201	0,9398	92,393	50,106	5,88	115,31	543	5778	0,9983
	90	49,978	16,15	807	0,9658	145,604	59,412	3,19	42,91	464	2550	0,9996

cd. Tabeli 4

Odmiana Opolski – kierunek axial												
	900	24,886	252,48	6283	0,9450	88,862	20,648	19,38	857,21	1723	17700	0,998
pomiar	300	42,173	70,91	2991	0,9568	139,875	40,805	8,80	213,95	1232	8730	0,999
1	90	66,262	24,77	1641	0,9790	218,476	65,384	5,13	69,76	1121	4561	0,999
	900	25,315	236,02	5975	0,9376	83,583	21,258	19,23	860,16	1607	18286	0,998
pomiar	300	41,858	65,89	2758	0,9558	130,615	43,042	9,02	197,72	1179	8510	0,999
2	90	64,697	23,51	1521	0,9789	218,248	65,338	4,83	62,49	1053	4083	0,999
	900	21,695	203,30	4411	0,9423	65,869	19,360	22,78	765,79	1501	14826	0,998
pomiar	300	33,776	66,63	2250	0,9663	113,217	35,479	9,96	176,69	1128	6269	0,999
3	90	51,250	26,35	1350	0,9844	189,891	49,111	5,49	67,85	1043	3332	0,999

Tabela 5. Zestawienie obliczonych wartości parametrów charakterystycznych dla procesu relaksacji naprężeń; próbki miazgi buraka ćwikłowego odmiany Czerwona kula i Opolski

Table 5. An analytical compilation of typical parameters of stress relaxation ; samples from red beet roots Czerwona kula and Opolski cultivars

Czas pomiaru t [s]	Model Maxwella dwu-parametrowy					Model Maxwella cztero-parametrowy						
	E ₁ [MPa]	T ₁ [s]	η ₁ [MPa*s]	r ²	r ²	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	T ₁ [sek.]	T ₂ [sek.]	η ₁ [MPa*s]	η ₂ [MPa*s]	r ²
Odmiana Czerwona kula – kierunek radial												
900	4,960	1835,79	9104	0,7834	0,946	4,467	4,467	16,12	3074,38	15,245	13734	0,983
300	5,121	833,90	4270	0,7654	0,772	4,721	4,721	6,29	1474,54	4,856	6961	0,986
90	5,255	362,05	1903	0,7706	0,622	4,928	4,928	2,88	675,211	1,791	3327	0,992
900	4,694	1669,73	7837	0,7508	1,049	4,144	4,144	15,75	2987,37	16,526	12378	0,983
300	4,862	721,65	3509	0,7419	0,869	4,397	4,397	7,27	1379,94	6,315	6068	0,985
90	5,010	306,76	1537	0,7729	0,692	4,639	4,639	3,31	586,999	2,287	2723	0,991
900	5,022	1539,53	7732	0,7861	1,099	4,438	4,438	17,96	2623,53	19,735	11644	0,984
300	5,207	715,77	3727	0,7800	0,887	4,742	4,742	7,12	1258,43	6,312	5967	0,987
90	5,364	315,16	1690	0,7835	0,710	4,988	4,988	3,22	585,41	2,288	2919	0,992

cd. Tabeli 5

Odmiana Czerwona kula – kierunek axial											
900	4,832	1756,91	8490	0,7643	1,015	4,319	13,02	2986,52	13,206	12898	0,984
300	4,992	777,64	3882	0,737	0,858	4,546	6,31	1462,46	5,409	6647	0,986
90	5,132	325,43	1670	0,7512	0,704	4,756	3,19	649,21	2,246	3087	0,991
900	4,710	1606,53	7567	0,7531	1,079	4,141	16,26	2890,54	17,547	11969	0,984
300	4,878	710,95	3468	0,7442	0,895	4,395	7,87	1372,40	7,048	6031	0,986
90	5,035	296,33	1492	0,7772	0,705	4,651	3,54	572,01	2,500	2660	0,991
900	4,027	1620,81	6528	0,7908	0,842	3,590	15,92	2691,97	13,410	9665	0,985
300	4,165	764,10	3182	0,7683	0,696	3,802	6,84	1360,25	4,761	5172	0,987
90	4,286	327,79	1405	0,7733	0,561	3,990	3,12	617,19	1,751	2463	0,991
Odmiana Opolski – kierunek axial											
900	5,179	1541,08	7981	0,8502	1,079	4,617	26,12	2434,40	28,187	11240	0,994
600	5,249	1216,51	6386	0,8289	1,014	4,701	21,62	2077,46	21,920	9767	0,994
300	5,361	780,78	4186	0,8111	0,899	4,845	15,63	1499,96	14,055	7267	0,993
90	5,550	333,83	1853	0,8593	0,627	5,178	6,73	619,14	4,220	3205	0,995
900	6,255	1120,04	7006	0,9287	1,187	5,657	26,12	1473,69	30,999	8337	0,996
600	6,336	958,46	6072	0,9038	1,128	5,737	21,83	1364,50	24,633	7828	0,995
300	6,480	675,51	4377	0,8829	0,960	5,964	12,72	1027,60	12,208	6128	0,994
90	6,682	343,10	2293	0,8701	0,709	6,295	5,17	564,87	3,670	3555	0,996
900	5,025	2088,38	10495	0,8342	0,842	4,589	24,87	3328,77	20,936	15276	0,991
600	5,085	1608,81	8180	0,8092	0,787	4,663	19,50	2766,68	15,354	12901	0,990
300	5,179	988,78	5121	0,8005	0,681	4,805	12,01	1806,47	8,183	8679	0,990
90	5,314	433,36	2303	0,8274	0,506	5,036	4,92	791,95	2,488	3988	0,995

Dla relaksacji naprężeń funkcja miała postać:

$$\sigma_t = \sum_{i=1}^n A_i e^{-B_i t} \quad (1)$$

natomiast dla pełzania funkcja miała postać:

$$\varepsilon_t = \sum_{i=1}^n C_i \left(1 - e^{-D_i t}\right) \quad (2)$$

dla $n = 1$ lub 2 , odpowiednio dla dwu- i cztero-parametrowego modelu Maxwella.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Zestawienie obliczonych wartości modułu sprężystości wykazuje istotne zróżnicowanie morfologiczne tkanek w obrębie korzenia. W części liścieniowej tkanka charakteryzuje się większą wytrzymałością niż np. w części środkowej korzenia. Można także zaobserwować pewne zróżnicowanie właściwości mechanicznych w zależności od układu tkanki w przekroju poprzecznym. Wytrzymałość w kierunku promieniowym jest nieco większa niż w kierunku osi podłużnej korzenia, jednakże nie ma to istotnego wpływu na wartość modułu sprężystości. W korzeniach mniejszych, gdzie jest mniej tkanek miękkiszowych, zaobserwowano zwiększenie wartości modułu sprężystości.

Jako kryterium porównawcze przyjęto zmiany wartości modułu sprężystości E_C , dla której odchylenie standardowe dla kolejnych powtórzeń nie przekraczało 10% mierzonej wartości. Wartości E_S i E_T obarczone były zbyt dużym błędem, wynikającym z rozrzutu uzyskiwanych wyników dla kolejnych powtórzeń, aby można było przeprowadzić jednoznaczne wnioskowanie. Rozrzuty te mogą wynikać z nieciągłości lub niejednorodności struktury badanego materiału.

Przyjęcie wartości modułu E_C jako kryterium porównawczego, pozwala także stwierdzić, że podczas kolejnych cykli pętli histerezy $\sigma-\varepsilon$ w całym zakresie zmian wartości naprężenia, występuje tylko pozorne umocnienie materiału.

WNIOSKI

1. Występuje wyraźne zróżnicowanie wartości modułu sprężystości w zależności od rozmiarów korzeni. Dla odmiany Czerwona Kula największą wartością modułu charakteryzują się próbki pobierane z najmniejszych

korzeni. Dla korzeni średniej wielkości odpowiednie wartości modułu, zależnie od odmiany oraz miejsca i kierunku pobrania próbek, mogą różnić się między sobą nawet o kilkadziesiąt procent.

2. Histereza $\sigma-\varepsilon$ w nieznacznym stopniu wpływa na zmianę modułu sprężystości E_C , świadczącym o ewentualnym umocnieniu materiału. Na podstawie zmiany wartości stopnia elastyczności S_{el} można stwierdzić, że występuje jedynie zjawisko plastycznego przekształcenia struktury materiału.
3. Obliczone wartości parametrów charakteryzujących proces relaksacji naprężeń są porównywalne, niezależnie od odmiany buraka, jak i kierunku pobierania próbek. W procesie pełzania występuje istotne zróżnicowanie wartości lepkości dynamicznej η , w zależności od odmiany. Dotyczy to przyjętego zarówno dwu- i cztero-parametrowego modelu Maxwella.

PIŚMIENNICTWO

1. Bieluga B., Bzowska-Bakalarz M.: Investigations of the mechanical properties of roots of same sugar beet varieties, Proceedings of the 2 International Conference, Gödöllő, 1-8, 1980.
2. Blahovec J.: Strength and elasticity of some plant materials, Proceedings of the 4th International Conference, Rostock, 60 - 66, 1989.
3. Bzowska-Bakalarz M.: Comparison of rheological models determining the physical properties of sugar beet roots, Proceedings of the 4th International Conference, Rostock, 109 - 112, 1989.
4. Bzowska-Bakalarz M.: Model reologiczny tkanki korzenia buraka cukrowego, Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych nr 408, 283 - 290, 1993.
5. Bzowska-Bakalarz M.: Właściwości mechaniczne korzeni buraków cukrowych. Rozprawa habilitacyjna, 1994..
6. Nowicki W., Banasik P., Kołodziejczyk P.: Creep process of beet roots subject to axial compression, Transactions of the International Conference, Lublin, 403 - 406, 1976.

MECHANICAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES
OF RED BEET SELECTED CULTIVARS

J. Bohdziewicz

Institute of Agricultural Engineering, Agricultural University
ul. Chelmońskiego 37/41, 51-630 Wrocław
e-mail: bohdziewicz@imr.ar.wroc.pl

Summary: A paper presents results of research by compression test for samples of flesh red beet roots selected cultivars. An elastic tangent modulus, secant modulus and equivalent modulus (basis on Clapeyron's equation), on dependance of root's quantity; sampling place and direct, were calculated. Basis on hysteresis were determined : degree of elasticity and elastic modulus values as characteristic properties of total, elasticity and plasticity strain. Basis on Maxwell model were determined rheological properties: elastic modulus, dynamic viscosity and time-constant, as characteristic in course of relaxation and creep test.

Keywords: red beet, cultivars, strength, rheology