

JERZY A. BALEJKO

BADANIE METODĄ DYNAMICZNĄ ZMIAN WŁAŚCIWOŚCI LEPKOSPREŻYSTYCH MIĘSA WYWOŁANYCH OGRZEWANIEM

Streszczenie

Przeanalizowano reologiczne właściwości mięsa surowego oraz mięsa poddanego ogrzewaniu w zróżnicowanej temperaturze, stosując dynamiczną metodę jednoosiowej kompresji sinusoidalnej. Próbkę mięśnia *longissimus dorsi* poddano ścisłaniu prostopadle do kierunku włókien w komorze termostatu ograniczającej swobodne odkształcenia próbek tylko do jednego kierunku działania penetratora. Testy przeprowadzono na 30-procentowym poziomie deformacji, w temperaturze 20, 40, 60 i 80°C. Zbadano zmiany właściwości lepkich reprezentowanych przez składową rzeczywistą zespolonego modułu sprężystości oraz zmiany zachowań lepkich za pomocą współczynnika lepkości dynamicznej. Przedstawiono również dynamikę zmian stopnia sprężystości mięśnia odzwierciedlającego zmiany strukturalne w badanym materiale wywołane przez odkształcenie.

Stwierdzono, że zmiany maksymalnych wartości naprężeń występujących podczas cykli 30-procentowej deformacji mięśnia *longissimus dorsi* (LD) w temp. 20, 40, 60 i 80°C, można opisać równaniem $\tau = a \cdot t^c$. Współczynniki determinacji, opisujące dopasowanie krzywych teoretycznych do wyników eksperymentalnych, w większości przypadków osiągały wartość nie niższą niż $R = 0,97$.

Słowa kluczowe: mięso, własności mechaniczne, tekstura

Wstęp

Analiza mechanicznych właściwości mięsa polega najczęściej na ocenie kruchości i jest przeprowadzana za pomocą empirycznych lub naśladowczych testów, przy użyciu urządzeń naśladujących efekt żucia. Przykładem takich urządzeń są szczęki Volodkevicha, noże Warner-Bratzlera, oraz urządzenie SATA [12]. Testowane za ich pomocą próbki przechodzą bardzo złożone deformacje. Obejmują one: ścinanie, ścisłanie i rozciąganie. Trudność w interpretacji wyników za pomocą podstawowych równań reologicznych wynika z faktu, że próbki odkształcane są we wszystkich kierunkach, co utrudnia ich matematyczną interpretację. Noel i Sale [12], Kamoun i Cu-

lioli [5] oraz Lepetit i Culioli [7] zastosowali komorę pomiarową umożliwiającą ograniczenie swobody odkształcania próbek tylko do jednego kierunku. Większość wymienionych testów ma charakter niszczący, co umożliwia głównie analizę wytrzymałości na zrywanie różnych struktur mięsnych.

Niektórzy autorzy, próbując dokonać fundamentalnej analizy reologicznych właściwości mięsa, używali testów nieniszczących, które zawierały prostsze i lepiej zdefiniowane odkształcenia. Segars i Kapsalis [16] podjęli próbę opracowania dwuwymiarowego mechanicznego modelu w celu wyjaśnienia reologicznych właściwości mięsa podczas ściskania. Segars i wsp. [17] przeanalizowali również współczynnik Poissona mięsa i poprzez testy sensoryczne ustalili powiązania pomiędzy wartościami tego parametru a kruchością. Inni autorzy przestudowali cechy reologiczne mięsa w testach rozciągania. Sale i wsp. [15] opracowali nową metodę badania mechanicznych właściwości mięsa, w której próbki poddawane są sinusoidalnej kompresji przy dużej prędkości. Metoda ta najpierw użyta do produktów modelowych [12] została wykorzystana w celu analizy mechanicznego zachowania mięsa surowego [7]. Badania Lepetita, Sale, Kamouna czy Mathoniere i wsp. [9] ograniczają się do jednego lub maksymalnie dwóch cykli pomiarowych.

Celem niniejszej pracy było zastosowanie metody dynamicznej jednoosiowej kompresji sinusoidalnej do określenia właściwości reologicznych mięsa poddanego działaniu zróżnicowanej temperatury oraz przy 30-procentowym poziomie nieniszczących odkształceń.

Materiał i metody badań

Materiałem badawczym był świeży (24 godz. po uboju) wieprzowy mięsień *longissimus dorsi* (LD) zakupiony w Zakładzie Przetwórstwa Mięsnego „MAS-AR” w Szczecinie. Testy pomiaru naprężeń wewnętrznych przeprowadzono w urządzeniu zaprojektowanym i zbudowanym w Zakładzie Inżynierii Procesowej i Maszynoznawstwa Akademii Rolniczej w Szczecinie, służącym do wyznaczania parametrów reologicznych żywności dynamiczną metodą jednoosiowej kompresji sinusoidalnej [1]. Precyzja zastosowanej metody pomiarowej wynosi $\varepsilon = \pm 0,2$ [N].

Mięsień pocięto wzdłuż włókien na plastry o grubości 0,015 m.

Za pomocą specjalnego przyrządu (rys. 1) z plastrów mięśnia wycinano próbki w kształcie walca o średnicy $d = 0,015$ m i wysokości $h = 0,01$ m i umieszczano w walcowej komorze (rys. 2) utrzymującej stałą temperaturę podczas testu.



Rys. 1. Przyrząd do wycinania walcowych próbek.

Fig. 1. The cutting device for samples in the shape of the roller.



Rys. 2. Komora z płaszczem wodnym utrzymująca stałą temperaturę próbki podczas testu.

Fig. 2. Chamber with the water coat maintaining the constant temperature of the sample during the test.

Próbki razem z komorą zanurzano w wannie termostatu doprowadzając do żądanej temperatury i utrzymywano w niej przez 15 min. Następnie próbki poddawano dynamicznej, sinusoidalnie zmiennej deformacji (w poprzek włókien) penetratorem walcowym o powierzchni czoła $s = 0,00177 \text{ m}^2$ ($d = 0,01 \text{ m}$). Płaszcz wodny komory pozwalał utrzymać w trakcie eksperymentu zadaną temperaturę: 20, 40, 60 lub 80°C. Każdą próbkę poddawano 30% deformacji w 20 następujących po sobie cyklach trwających 1 s. Na każdym z zadanych poziomów temperatury przebadano dziesięć próbek.

Omówienie wyników

Skurczenie się włókien mięśniowych oraz powstanie trwałych wiązań sieciujących w białkach miofibrylarnych zwiększa twardość mięsa. Największe naprężenia

w próbach rejestrowano w temp. 60°C, przy 50% odkształceniu. Ogrzanie mięśnia do temp. 80°C spowodowało zmniejszenie naprężeń wewnętrznych.

Przebieg zmian naprężenia w badanych próbkach w trakcie kolejnych cykli sinusoidalnej jednoosiowej deformacji przedstawiono na rys. 3.

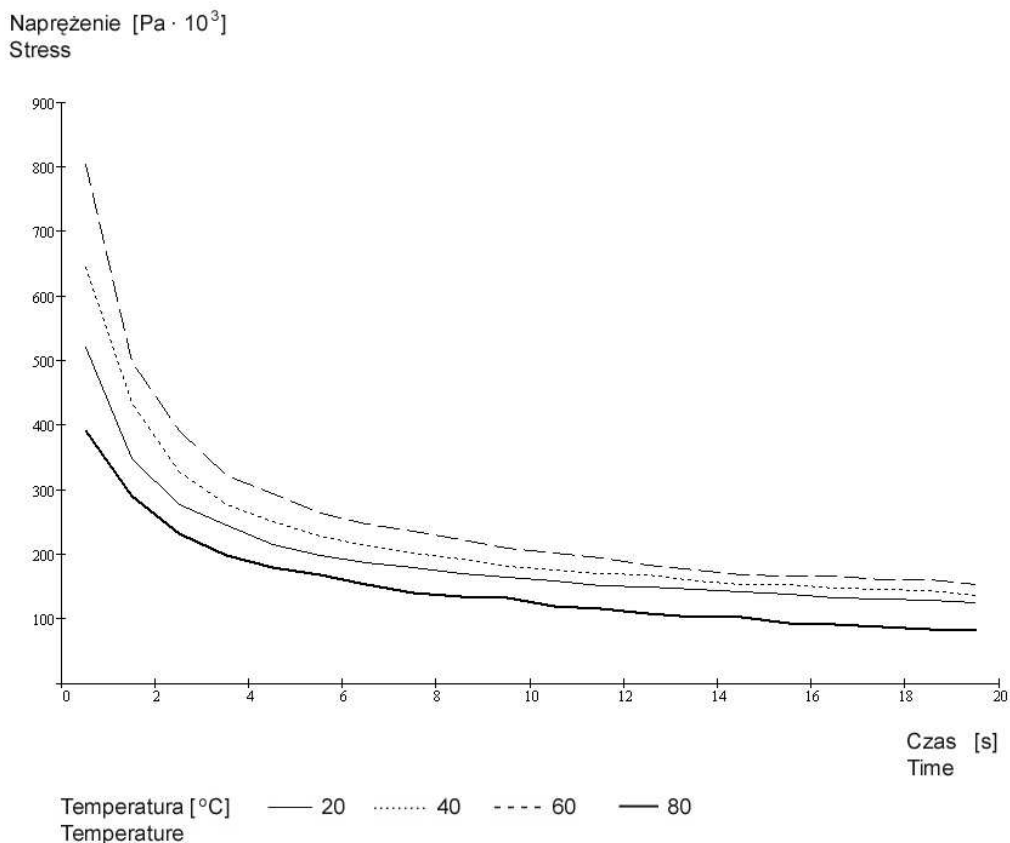
Tabela 1

Średnie wartości naprężeń w kolejnych cyklach 30-procentowej deformacji próbek mięśnia LD, determinowane temperaturą pomiaru.

The mean values of stress of material during consecutive cycles of 30% deformation of LD muscle determined by temperature of test.

Czas wystąpienia maksimum naprężenia w kolejnym cyklu deformacji	Temperatura / Temperature [°C]			
	20	40	60	80
[S]	Naprężenie / Stress [kPa]			
0,5	520,16	644,10	802,54	390,55
1,5	348,55	433,97	497,43	290,14
2,5	277,27	327,12	390,52	231,21
3,5	245,57	277,32	332,41	198,33
4,5	215,10	249,56	293,33	179,88
5,5	198,30	228,14	264,06	167,10
6,5	185,87	212,03	246,72	152,59
7,5	179,03	201,01	235,00	140,11
8,5	169,73	191,72	222,62	133,82
9,5	163,53	180,44	209,31	131,45
10,5	157,93	175,11	201,16	120,00
11,5	151,70	170,36	194,41	116,24
12,5	148,60	167,84	183,35	108,36
13,5	144,87	159,13	175,18	102,56
14,5	141,13	153,56	167,22	101,95
15,5	138,03	152,06	165,81	93,25
16,5	133,03	147,34	165,12	90,77
17,5	129,93	144,89	160,54	86,41
18,5	128,07	144,15	160,06	83,93
19,5	125,60	136,00	152,52	80,82
a	397,91	484,52	587,54	311,66
b	-0,3928	-0,4297	-0,4566	-0,4007
r ²	0,999	0,996	0,999	0,979

a, b – wartości obliczonych stałych współczynników równania / regular equation coefficients values



Rys. 3. Zmiany średnich wartości (z 10 pomiarów) maksymalnych naprężeń, przy 30% deformacji próbek mięśnia LD w każdej z czterech wartości temperatury.

Fig. 3. Changes of mean values (from 10 tests) of maximum stress in samples by 30% deformation of LD muscle at 4 different level of temperature.

Dopasowano równanie opisujące zmiany maksymalnych wartości naprężenia podczas kolejnych cykli deformacji:

$$\tau = a \cdot t^c \quad (1)$$

gdzie:

a i b – stałe współczynniki równania (tab. 1),

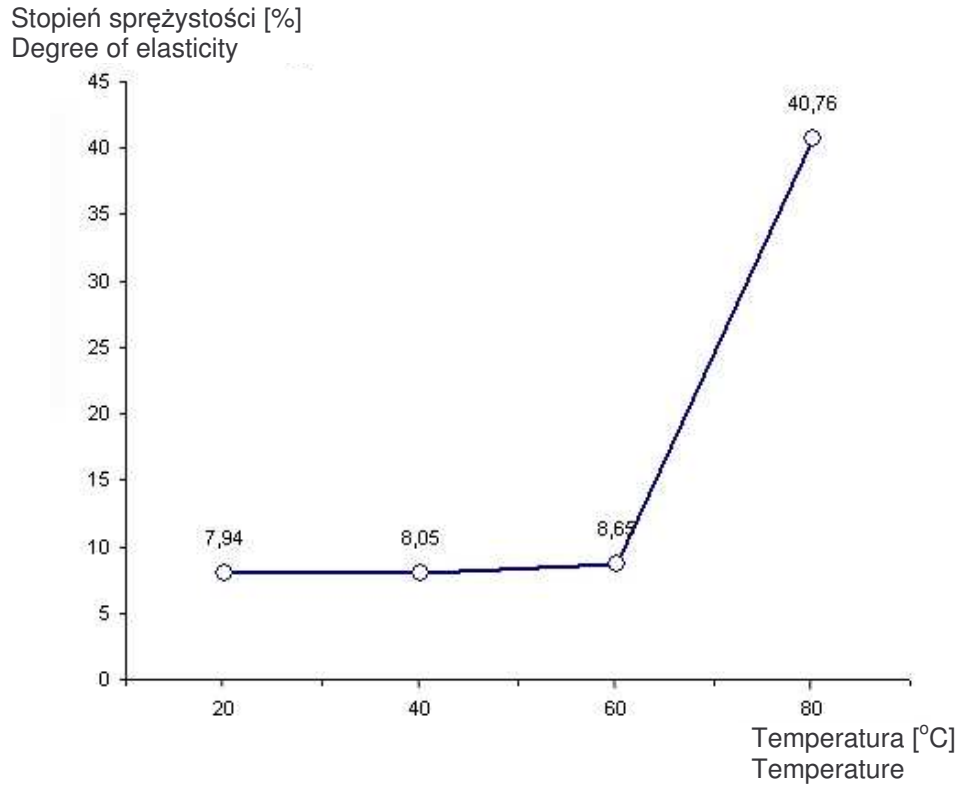
t – czas mierzony w dowolnym cyklu od początku pomiaru [s],

τ – naprężenie [Pa].

Dopasowanie krzywych teoretycznych (równanie 1) do wyników badań eksperymentalnych zestawionych w tab.1, przeprowadzono metodą Marquardta [8], Moré [11] i Bogdan [2].

Analiza istotności współczynników regresji wielorakiej nie wykazała istotnej zależności stałych współczynników a i b równania (1) i temperatury. Wykazano natomiast statystycznie istotną wzajemną zależność stałych a i b na poziomie $\alpha = 0,05$.

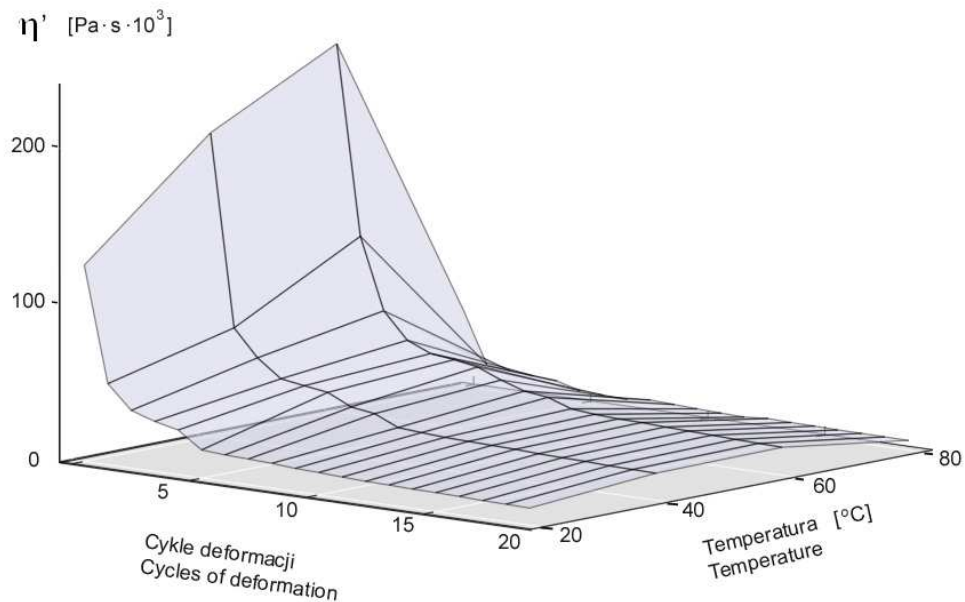
Zmiany strukturalne, spowodowane wyżej wspomnianymi procesami cieplnymi, w konsekwencji prowadzą do zmian właściwości lepkosprężystych mięśnia. Właściwości sprężyste badanych próbek przedstawiają zmiany stopnia sprężystości mierzonego podczas pierwszego cyklu deformacji [1] (rys. 4).



Rys. 4. Zmiany wartości stopnia sprężystości pierwszego cyklu 30-procentowej deformacji próbek mięśnia LD, w zależności od temperatury.

Fig. 4. Changes of degree of springiness during first cycle of 30% deformation of LD muscles samples depending on temperature.

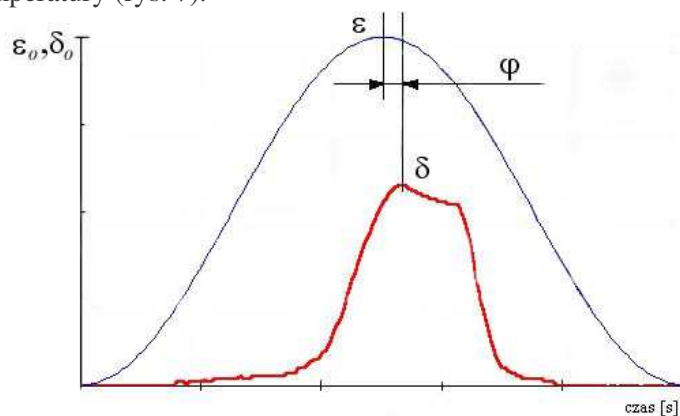
Natomiast zmiany lepkich właściwości mięśnia *longissimus dorsi* ściskanego w poprzek włókien odzwierciedla współczynnik lepkości dynamicznej η' (rys. 5).



Rys. 5. Zmiany lepkości dynamicznej w trakcie 30-procentowej deformacji próbek mięśnia LD w temp. 20, 40, 60 i 80°C.

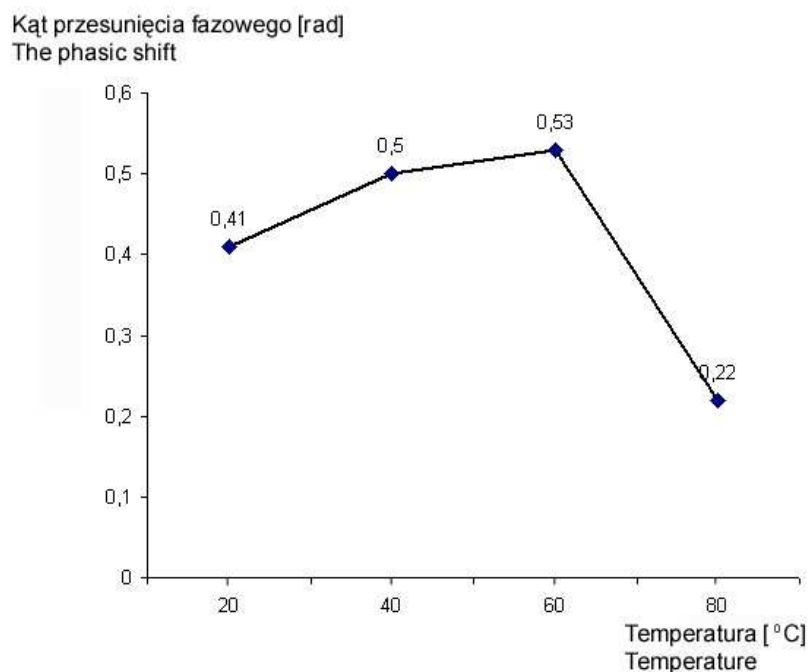
Fig. 5. Dynamic viscosity changes during 30% deformation of LD muscles at temperature of 20, 40, 60 and 80°C.

Wyliczono wartości kąta przesunięcia fazowego odpowiedzi sprężystej materiału (rys. 6) i przedstawiono wartości tego kąta z pierwszego cyklu deformacji na kolejnych poziomach temperatury (rys. 7).



Rys. 6. Przebieg harmonicznego wymuszenia dynamicznego i przesuniętej w fazie odpowiedzi badanej próbki mięśnia LD. ϵ - odkształcenie, δ - naprężenie, φ - kąt przesunięcia fazowego.

Fig. 6. Course of harmonic dynamic forcing and moved in the phase answer of the reinspected LD muscles sample. ϵ - strain, δ - stress, φ - angle of the phasic shift.



Rys. 7. Wartość kąta przesunięcia fazowego ϕ odpowiedzi sprężystej pierwszego cyklu deformacji badanych próbek mięśnia LD.

Fig. 7. Value of the phasic shift ϕ of springy answer of the first cycle of deformation of reinspected samples of LD muscles.

Wnioski

1. Zmiany maksymalnych wartości naprężeń występujących podczas kolejnych cykli deformacji mięśnia *longissimus dorsi* (LD), ściskanego w poprzek włókien, na poziomie 30-procentowej deformacji, w temp. 20, 40, 60 i 80°C, można opisać równaniem $\tau = a \cdot t^c$
2. Współczynniki determinacji, opisujące dopasowanie krzywych teoretycznych do wyników eksperymentalnych, w większości przypadków osiągały wartość nie niższą niż $R = 0,97$.

Literatura

- [1] Balejko J.A.: Opracowanie dynamicznej metody wyznaczania reologicznych właściwości artykułów żywnościowych. Rozprawa habilitacyjna nr 218. Wyd. AR. Szczecin 2003.
- [2] Bogdan L.: Metoda Marquardta regresji nieliniowej. Program dla maszyny cyfrowej Odra 1305. Pr. Inst. Bad. Syst. PAN, 1978, s. 16.
- [3] Bourne M.C. Texture profile of ripening pears. J. Food Sci., 1968, **33**, 223-228.
- [4] Kaletunc G., Normand M.D., Johnson E.A., Peleg M.: Degree of elasticity. Determination in solid foods. J. Food Sci., 1991, **4** (56), 950.

- [5] Kamoun M., Culioli J.: Mechanical behaviour of cooked meat under sinu-soidal compression. *J. Texture Stud.*, 1988, **19** (2), 117-136.
- [6] Lepetit J., Sale P.: Analyse du comportement reologique de la viande par une methode de compression sinusoidale. *Sci. Aliments*, 1985, **5**, 521-540.
- [7] Lepetit J. Culioli J.: Mechanical properties of meat. *Meat Sci.*, 1994, **36**, 203-237.
- [8] Marquardt D.: An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM. J. Appl. Math.*, 1963, **11**, 431-441.
- [9] Mathoniere C., Mioche L., Dransfield E., Culioli J.: Meat texture characterisation: comparison of chewing patterns, sensory and mechanical measures. *J. Texture Stud.*, 2000, **31** (2) 183-203.
- [10] Mohsenin N.N.: Physical properties of plant and animal materials. 2nd edition. Gordon & Breach. New York 1986.
- [11] Moré J.J.: The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory. *Numerical Analysis*. Ed. G. A. Watson. *Lecture Notes in Mathematics*, 1977, **630**, 105-116.
- [12] Noel Y., Sale P.: Theoretical responses of different rheological models to a sinusoidal compression in a transient state. *J. Texture Stud.*, 1984, **15**, 115-130.
- [13] Olkku J.E., Sherman P.: Compression testing of cylindrical samples with an Instron Universal Testing Machine. *Food Texture and Rheology*. Ed. Sherman, Academic Press, 1979, p. 157.
- [14] Sale P., Noel Y., Lasteyras A., Oleon C.: A sinusoidal compression system to study rheological properties of foods in the transient state. *J. Texture Stud.*, 1984, **15**, 103-114.
- [15] Sale P., Noel Y., Lasteyras A., Oleon C.: Testing device for study of rheological properties of meat. *Proc. European Meeting of Meat Research Workers*, 1984, (30) **4**, 22, 204-205.
- [16] Segars R.A., Kapsalis J.G.: Contribution of the US Army Natic Research and Development Center to the objective measurement of the textural quality of meat. *J. Texture Stud.*, 1976, **7**, 129.
- [17] Segars R.A., Hamel R.G., Kapsalis J.G.: Use of Poisson's ratio for objective-subjective texture correlations in beef. An apparatus for obtaining the required data. *J. Texture Stud.*, 1977, **8**, 433-447.

DYNAMIC METHOD OF EVALUATION OF CHANGES VISCOELASTIC PROPERTIES OF MEAT BY HEATING EFFECT

S u m m a r y

The rheological performance of the raw meat and the meat boiled at four different temperatures was studied with the use of the dynamic method of the uniaxial sinusoidal compression.

The samples of meat were subject to compression perpendicular to fibres in a thermostat chamber that limited free strain to one direction of the action of a penetrator. Tests were carried out at 30% level of deformation, and in four different temperatures - 20, 40, 60 and 80°C.

Changes in viscous properties represented by the actual component of combined Young's modulus and changes of viscous performance represented by the coefficient of dynamic viscosity were studied. The dynamics of changes in springiness rate of a muscle representing the structural changes of the material under study and caused by the strain were also investigated.

It was stated that changes of maximum values of stress during 30% deformation of LD muscles cycles in 20, 40, 60 i 80°C temperature can be described by an equation of $\tau = a \cdot t^c$. The determination coefficients that describe the adjustment of theoretical curves to experimental results reached values not lower than $R^2 = 0,97$ in most of cases.

Key words: meat, mechanical properties, texture, sinusoidal compression 