

ZAGADNIENIE OZNACZANIA WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH FENOLOWYCH  
TWORZYW WZMOCNIONYCH TKANINĄ BAWELNIANĄ W PRÓBIE ROZCIĄGANIA

JAN BROŚ (KRAKÓW)

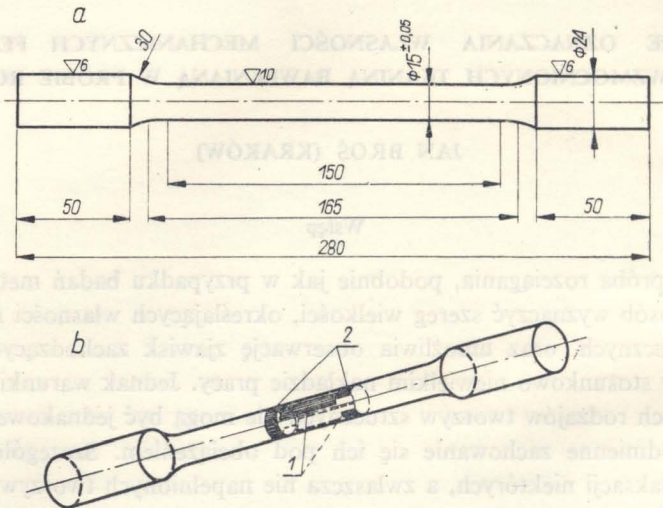
## Wstęp

Stacyczna próba rozciągania, podobnie jak w przypadku badań metali, pozwala w prosty sposób wyznaczyć szereg wielkości, określających własności mechaniczne tworzyw sztucznych, oraz umożliwia obserwację zjawisk zachodzących w czasie badania przy stosunkowo niewielkim nakładzie pracy. Jednak warunki rozciągania poszczególnych rodzajów tworzyw sztucznych nie mogą być jednakowe ze względu na bardzo odmienne zachowanie się ich pod obciążeniem. Szczególnie zjawiska pełzania i relaksacji niektórych, a zwłaszcza nie napełnionych tworzyw sztucznych, występujące już w normalnej temperaturze przy niewielkich naprężeniach, w dużym stopniu wywierają wpływ na przebieg rozciągania. Wydawać by się więc mogło, że wymienione zjawiska ograniczają w pewnym stopniu ważność statycznej próby rozciągania, a wysuwają na pierwsze miejsce badania tworzyw sztucznych pod długotrwałym obciążeniem w różnych, zwłaszcza w podwyższonych, temperaturach. Próby te są jednak długotrwałe, żmudne i kosztowne. Nie mogą zatem dla szybkiej oceny jakości tworzywa stanowić prób podstawowych, tak jak próby rozciągania. Poza tym należy zauważyć, że zjawiska pełzania i relaksacji w tworzywach termoutwardzalnych, wzmocnionych tkaniną, występują nieznacznie. Spośród tworzyw wzmocnionych, tzw. wysokowytrzymałościowych, stosunkowo duże znaczenie w budowie maszyn mają tworzywa fenolowe, posiadające korzystne własności mechaniczne. Wykonane w postaci płyt, prętów i rur uważane są jako jedne z podstawowych materiałów konstrukcyjnych tworzyw sztucznych. W przeprowadzonym doświadczeniu zastosowano fenolowe tworzywo warstwowe, wzmocnione tkaniną bawełnianą typu  $E_4$ , i fenolowe tłoczywo skrawkowe, wzmocnione skrawkami tkaniny bawełnianej typu  $E_4$ .

## 1. Metodyka badań

Określenie własności mechanicznych tworzyw sztucznych dokonuje się różnymi metodami, często nawet za pomocą metody badań metali. Omawiane doświadczenie przeprowadzono na zrywarce Amsler 30 T z użyciem aparatury tensometrycznej. Wymiary i kształt próbek (rys. 1a) dla tego typu tworzyw ustalono na podstawie norm próbek metalowych w dostosowaniu do istniejącej aparatury i bazy pomiarowej, przyjętej jako 10-krotność średnicy  $d = 15$  mm. Na każdej próbce w środkowej

części długości pomiarowej przyklejano po cztery tensometry oporowe, przy czym dwa z nich skierowano równoległe do osi rozciągania (tensometry osiowe), a dwa prostopadle (tensometry obwodowe; rys. 1b). Tensometry te łączono parami w szereg (osiowe i obwodowe oddzielnie) przewodami z mostkiem tensometrycznym.



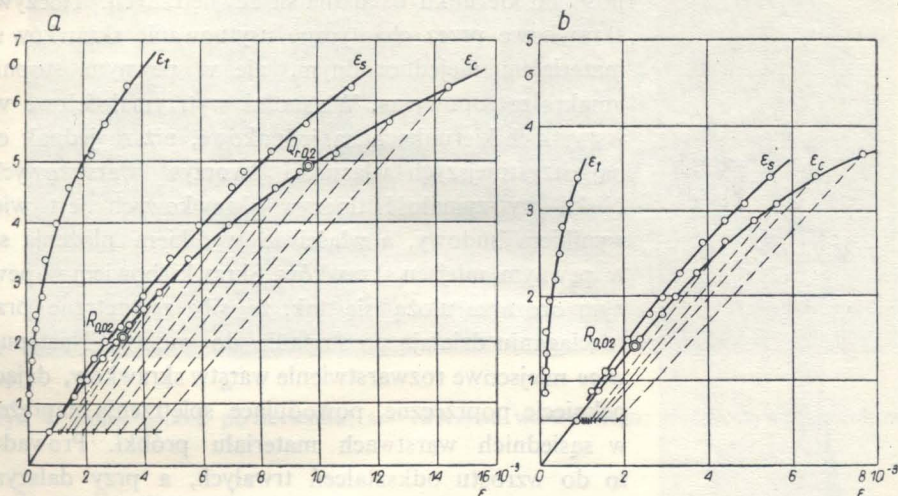
Rys. 1. a – próbka; b – próbka z naklejonymi tensometrami: 1 – tensometry osiowe; 2 – tensometry obwodowe

Pomiary wartości naprężeń przeprowadzono metodą odciążenia przyjmując obciążenie wstępne, wywołujące naprężenie  $\approx 0,5$  kG/mm<sup>2</sup>. W czasie pomiarów obciążenie próbek zmieniono stopniami, które w zasadzie odpowiadały obciążeniu wstępnemu. W przypadkach jednak, gdy należało określić dokładniej zmiany zachodzące w procesie rozciągania, stosowano stopnie mniejsze, a w innych zakresach, jeżeli zjawiska zachodziły systematycznie, większe niż obciążenie wstępne, ażeby niepotrzebnie nie zagęszczać punktów pomiarowych.

## 2. Zależność odkształceń od wartości naprężeń

Próbki tworzywa warstwowego i tłoczywa skrawkowego wykazały odkształcenia o różnym przebiegu. Wykresy rozciągania sporządzone dla obu rodzajów tworzyw przedstawia rys. 2, na którym obok odkształceń całkowitych  $\epsilon_c$  zaznaczono również odkształcenia sprężyste  $\epsilon_s$  i odkształcenia trwałe  $\epsilon_t$ . Z odpowiednich krzywych (rys. 2) wynika, że próbki tłoczywa skrawkowego w porównaniu do próbek tworzywa warstwowego wykazują nie tylko większe wartości odkształceń sprężystych, ale także dużo większe wartości odkształceń trwałych. Zjawisko to występuje już przy niewielkich naprężeniach. Wartość naprężeń  $R_{0,02}$  oraz wytrzymałość  $R_r$  dla próbek tłoczywa skrawkowego jest więc stosunkowo niska. Duży i niejednakowy wzrost odkształceń trwałych w stosunku do odkształceń sprężystych z podwyższeniem naprężeń był powodem szybkiego niszczenia próbek tłoczywa skrawkowego,

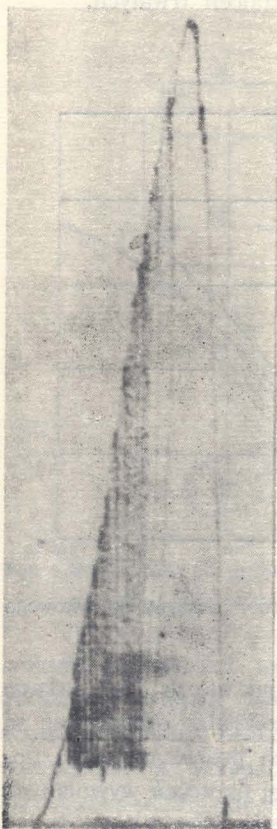
a ponadto uniemożliwił określenie  $R_{0,10}$ . W niewielu próbkach udało się więc osiągnąć zaledwie naprężenie  $R_{0,05}$ . Przebieg rozciągania próbek tworzywa warstwowego natomiast charakteryzował się dużą powtarzalnością wyników. Ze wzrostem naprężeń odkształcenia trwale zwiększały wartości w sposób ciągły, a jedynie tuż przed zerwaniem próbki następował duży przyrost odkształceń trwałych.



Rys. 2. Wykresy rozciągania: a – próbki tworzywa warstwowego; b – próbki tłoczywa skrawkowego

Rysunek 3 przedstawia wykresy rozciągania (dla próbek jak na rys. 2), uzyskane na zrywarcie w czasie rozciągania. Ze względu na małą podziałkę odkształceń są mało przejrzyste. Wykresy rozciągania  $\sigma = f(\epsilon)$  wszystkich próbek zarówno tłoczywa skrawkowego, jak i tworzywa warstwowego, powyżej naprężeń wywołanych obciążeniem wstępnym mają przebieg krzywoliniowy. Wynika więc z tego, że już przy niewielkich naprężeniach próbki wykazują odkształcenia trwałe, występujące przede wszystkim w substancji wielcząsteczkowej. Jednak ze wzrostem naprężeń zjawiska towarzyszące rozciąganiu w obu rodzajach tworzyw nie są jednakowe. W próbkach tworzywa warstwowego, prawdopodobnie w miejscach nieciągłości tworzywa, następuje znaczne lokalne przekroczenie granicy plastyczności, prowadzące nie tylko do wzrostu odkształceń trwałych, lecz także do pęknięć miejscowych, powodujących zniszczenie sił adhezji pomiędzy żywicą a tkaniną. W utworzonych w ten sposób ogniskach uszkodzeń rozluźniają się warstwy nośnika, powodujące przy dalszym rozciąganiu «puchnięcie» próbki, czego dowodem było pęknięcie tensometrów w czasie próby rozciągania przed jej ukończeniem, jeżeli ogniska pęknięć gromadziły się w miejscu przyklejenia tensometrów. Próbki ulegały zerwaniu bez widocznego wydłużenia oraz tworzenia się szyjki, a w miejscu zerwania wykazywały zwiększony wymiar średnicy. Próbki tłoczywa skrawkowego ulegały natomiast zniszczeniu bez widocznych odkształceń zewnętrznych (puchnięć), a wyniki pomiarów uzyskiwano o dużym rozrzucie. Zjawisko odmiennego rozciągania jak

i powstawania złomu próbek tworzywa warstwowego i skrawkowego można tłumaczyć różnym usytuowaniem tkaniny. Tworzywa fenolowo-formaldehdowe jako termo-utwardzalne substancje wielocząsteczkowe uważa się za materiał «kruchy». Tkaniny nadają im pewną sprężystość, lecz przez to uzyskuje się materiał niejednorodny i anizotropowy. W przypadku tworzyw warstwowych własności wytrzymałościowe są różne w zależności od kierunku działania sił zewnętrznych. Tłoczywa skrawkowe przez chaotyczne usytuowanie skrawków są materiałem niejednorodnym, ale w pewnym stopniu «makroizotropowym». Własności wytrzymałościowe we wszystkich kierunkach są jednakowe, niższe jednak od najkorzystniejszych własności tworzyw warstwowych. Niska wytrzymałość tłoczyw skrawkowych jest więc wynikiem budowy, a właściwie wynikiem ułożenia się w pewnym miejscu skrawków. Skrawki bowiem w pewnym obszarze ułożą się tak, że siły zewnętrzne przy rozciąganiu działają prostopadle do warstw. Następuje więc miejscowe rozwarstwienie warstw skrawków, dające pęknięcie poprzeczne, powodujące spiętrzenia naprężeń w sąsiednich warstwach materiału próbki. Prowadzi to do wzrostu odkształceń trwałych, a przy dalszym powiększeniu obciążeń do szybkiego niszczenia próbki. Zjawisko powyższe zaobserwowano już przy badaniu wytrzymałości zmęczeniowej [2], a potwierdzają to również złomy próbek tworzywa warstwowego (rys. 4a) i tłoczywa skrawkowego (rys. 4b). Złom tworzywa warstwowego wykazuje zwartą budowę. Rozmieszczenie tkaniny jest równomierne w całym przekroju. Tłoczywo skrawkowe zaś nie ma jednolitego rozkładu skrawków. Widać miejsca, w których nastąpiło rozwarstwienie tkaniny.



Rys. 3. Wykres rozciągania próbki tworzywa warstwowego otrzymany na zrywarcie

### 3. Wyznaczenie modułu sprężystości

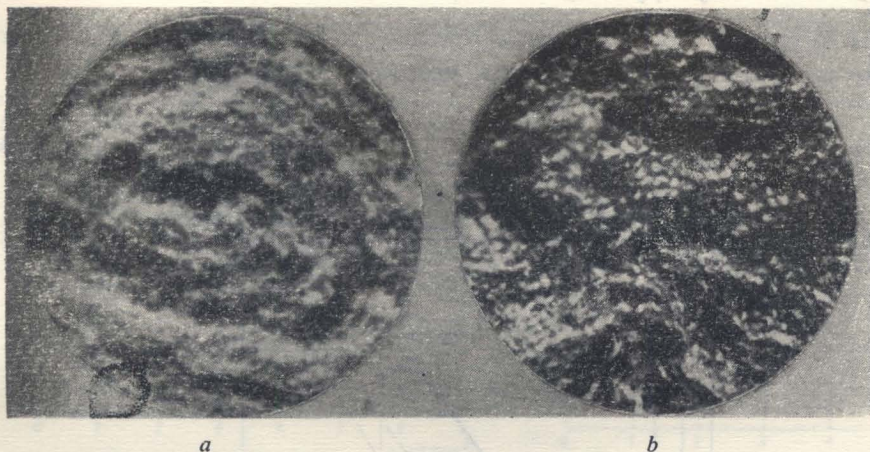
Pojęcie modułu sprężystości dla danych tworzyw nie może być pojęciem jednoznacznym, jak pojęcie modułu sprężystości dla niektórych metali, podlegających prawu sprężystości liniowej w sensie fizykalnym. Odkształcenia próbek, jak wynika z wykresów rozciągania, nawet w zakresie niewielkich naprężeń nie są do tych naprężeń proporcjonalne. Dlatego też wyznaczenie i obliczenie modułu sprężystości dokonano tak, jak się to czyni w przypadku żeliwa [1], a mianowicie w trakcie próby rozciągania wyznaczono dla poszczególnych stopni obciążeń:

1) spadki linii odciężeń

$$(3.1) \quad E_e = \frac{\sigma - \sigma_0}{\varepsilon_e - \varepsilon'} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon};$$

2) spadki siecznych, przeprowadzonych przez punkty  $(0, 0)$  oraz  $(\sigma, \varepsilon_c)$

$$(3.2) \quad E_s = \frac{\sigma}{\varepsilon_c};$$



Rys. 4. Złomy próbek po zerwaniu; a — tworzywa warstwowego; b — tworzywa skrawkowego

3) spadki stycznych

$$(3.3) \quad E_t = \lim_{\Delta\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}.$$

We wzorach powyższych  $\sigma$  oznacza osiągnięte naprężenie pod obciążeniem  $P$  w danym punkcie,  $\sigma_0$  naprężenie wywołane obciążeniem wstępnym  $P_0$ ,  $\varepsilon_c$  wydłużenie całkowite odpowiadające naprężeniu oraz  $\varepsilon'$  wydłużenie trwałe, mierzone przy naprężeniu  $\sigma_0$  po odciążeniu. Wartość  $E_e$  odpowiada w przybliżeniu stosunkowi przyrostu naprężeń do sprężystej części odkształcenia całkowitego  $\varepsilon_c - \varepsilon'$  i jest tangensem kąta nachylenia prostej odciążenia z dowolnym punktem wykresu (rys. 5),  $E_s$  można zaś wytłumaczyć jako stosunek naprężenia, występującego w danym punkcie  $\sigma$  do odkształcenia całkowitego  $\varepsilon_c$ , wywołanego tym naprężeniem, czyli  $E_s$  jest określony tangensem kąta pochylenia prostej  $OB$ ,  $E_t$  natomiast odpowiada stosunkowi przyrostu naprężenia do odpowiadającego mu przyrostowi odkształcenia malejącego do zera, czyli jest określony tangensem kąta nachylenia stycznej  $t$  w danym punkcie wykresu rozciągania (rys. 5). Praktycznie jednak wartość spadków stycznych  $E_t$  mierzy się jako spadki siecznych, przeprowadzonych przez dwa bliskie punkty:

$$(3.4) \quad E_t = \frac{\sigma_{(n+1)} - \sigma_n}{\varepsilon_{(n+1)} - \varepsilon_n},$$

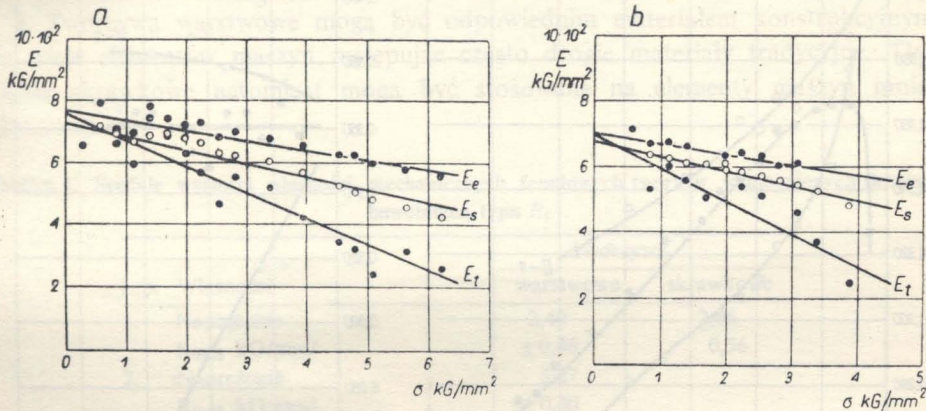
gdzie  $\sigma_n$ ,  $\sigma_{(n+1)}$  oznaczają naprężenia odpowiadające kolejnym punktom wykresu rozciągania, a  $\varepsilon_n$ ,  $\varepsilon_{(n+1)}$  odpowiadające tym naprężeniom odkształcenia.



jedną, ale trzy wartości modułu zerowego  $E_{e0}$ ,  $E_{s0}$  i  $E_{t0}$ . Średnia ważona, obliczona z tych trzech wielkości

$$(3.7) \quad E_0 = \frac{p_e E_{e0} + p_s E_{s0} + p_t E_{t0}}{p_e + p_s + p_t}$$

jest najprawdopodobniejszą wartością modułu zerowego. Wagi zaś przyjmuje się



Rys. 6. Zależność spadków linii odciążeń  $E_e$ , siecznych  $E_s$  i stycznych  $E_t$  od naprężeń jako proste regresji; a – próbki tworzywa warstwowego; b – próbki tłoczywa skrawkowego

jako liczby proporcjonalne do odwrotności średnich odchyłeń kwadratowych:

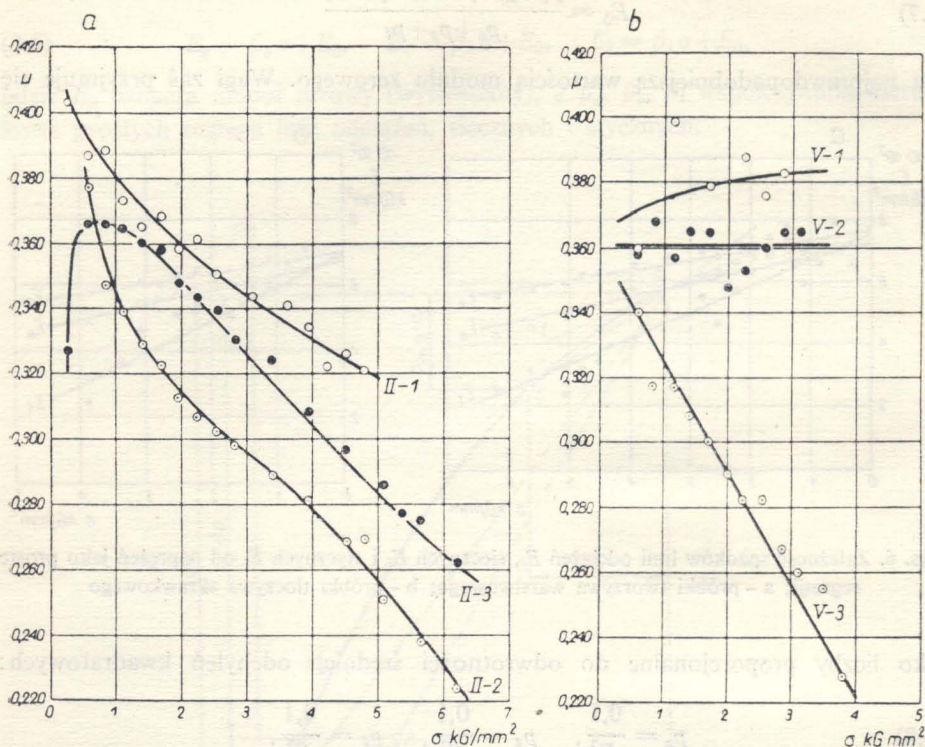
$$(3.8) \quad p_e = \frac{0,1}{E_e^2}, \quad p_s = \frac{0,1}{E_s^2}, \quad p_t = \frac{0,1}{E_t^2}.$$

Linie  $E_e$ ,  $E_s$  i  $E_t$ , jak wynika z rys. 6, nie przecinają się w jednym punkcie. Odchylenia na ogół nie są duże, jednak różne dla każdej próbki.

#### 4. Wyznaczenie współczynników Poissona

Zależność współczynników Poissona od wielkości naprężeń jest różna nie tylko dla tworzywa warstwowego i tłoczywa skrawkowego, ale także dla tego samego rodzaju tworzywa (rys. 7). Nie można więc określić przebiegu  $\mu = f(\sigma)$  za pomocą znanych krzywych. Należy jednak zauważyć, że dla próbek tworzywa warstwowego we wszystkich przypadkach zmniejsza się współczynnik Poissona ze wzrostem naprężeń. Zjawisko to jest charakterystyczne dla materiału, którego odkształcenia przy naprężeniach zbliżających się do  $R_r$  wywołane są przez powstawanie powiększających się pęknięć, prostopadłych do kierunku osi rozciągania. Dla próbek z tłoczywa skrawkowego krzywe współczynników Poissona mają zmienny przebieg i występują trzy możliwe przypadki, mianowicie:  $\mu$  rośnie ze wzrostem naprężenia,  $\mu = \text{const}$ ,  $\mu$  maleje ze wzrostem naprężenia. Różnego przebiegu  $\mu = f(\sigma)$  w danym przypadku nie należy kłaść na karb błędów pomiarowych. Zjawisko to jest wynikiem nierównomiernego rozkładu naprężeń, powstającego na skutek specyficznej

struktury tłoczywa skrawkowego, co, jak już wspomniano, w zależności od usytuowania się skrawków w części pomiarowej próbki powoduje różny przebieg krzywych współczynników Poissona.



Rys. 7. Krzywe zależności współczynników Poissona od naprężeń rozciągających dla: a – trzech próbek tworzywa warstwowego; b – trzech próbek tłoczywa skrawkowego

Wartości współczynników Poissona, umieszczone w tabelicy 1, ze względu na zmienny charakter zależności od naprężeń obliczono jako średnie z trzech wartości współczynników Poissona, odpowiadających kolejnym naprężeniom

$$\sigma_{(k-1)}, \sigma_k, \sigma_{(k+1)} \text{ takim, że } \sigma_{(k-1)} < R_{0,02}, \sigma_k = R_{0,02}, \text{ a } \sigma_{(k+1)} > R_{0,02}.$$

### 5. Wnioski i uwagi końcowe

Wyniki przeprowadzonych prób umożliwiły obliczenie dokładnych wartości naprężeń  $R_{0,2}$ ,  $R_{0,05}$ ,  $R_{0,10}$  i  $R_{0,20}$ , wytrzymałości  $R_r$ , modułów sprężystości  $E$  i współczynników Poissona. Dla próbek tłoczywa skrawkowego nie wyznaczono naprężeń  $R_{0,05}$ ,  $R_{0,10}$  i  $R_{0,20}$ , ponieważ próbki ulegały zerwaniu przed osiągnięciem odkształceń trwałych, wynoszących odpowiednio 0,05, 0,10 i 0,20%, albo bezpośrednio po osiągnięciu tych wartości. W związku z tym wydaje się problematyczne, czy określenie naprężeń  $R_{0,02}$  i  $R_{0,20}$  umownymi granicami sprężystości i plastyczności badanych tworzyw miałoby podobne znaczenie jak w przypadku



metali, pomimo że pierwotne badania wskazywały na pewne podobieństwo. W zakończeniu należy zauważyć, że:

1. Otrzymane wyniki prób rozciągania przy zastosowaniu omówionej metody badań pozwalają stosunkowo dokładnie scharakteryzować własności mechaniczne badanych tworzyw w zastosowaniu ich na elementy maszyn.

2. Tworzywa warstwowe w porównaniu z tłoczywami skrawkowymi wykazują korzystniejsze własności wytrzymałościowe.

3. Tworzywa warstwowe mogą być odpowiednim materiałem konstrukcyjnym na wiele elementów maszyn zastępując często drogie materiały tradycyjne. Tłoczywa skrawkowe natomiast mogą być stosowane na elementy maszyn mniej obciążone.

Tablica 1. Średnie wartości własności mechanicznych fenolowych tworzyw wzmocnionych tkaniną bawełnianą typu  $E_4$

L.p.	Własności	Tworzywa	
		warstwowe	skrawkowe
1.	Napężenie	2,40	2,06
	$R_{0,02}$ kG/mm <sup>2</sup>	$\pm 0,46$	0,56
2.	Napężenie	3,27	
	$R_{0,05}$ kG/mm <sup>2</sup>	$\pm 0,40$	
3.	Napężenie	4,43	
	$R_{0,10}$ kG/mm <sup>2</sup>	$\pm 0,68$	
4.	Napężenie	5,57	
	$R_{0,20}$ kG/mm <sup>2</sup>	$\pm 0,72$	
5.	Wytrzymałość na rozciąganie	7,21	3,60
	$R_r$ kG/mm <sup>2</sup>	$\pm 0,17$	0,38
6.	Moduł sprężystości	796	765
	$E_0$ kG/mm <sup>2</sup>	$\pm 22$	47
7.	Współczynnik	0,34	0,35
	Poissona	$\pm 0,02$	0,04

#### Literatura cytowana w tekście

1. A. KARAMARA, *Zagadnienie oznaczania modułu sprężystości żeliwa*, Prace Inst. Odlewnictwa, 3-4, 8 (1958).
2. J. BROŚ, *Statyczna analiza wyników prób zmęzeniowych konstrukcyjnych tworzyw fenolowych*, Czasopismo Techniczne nr 2/1964.
3. Z. HELLWIG, *Regresja liniowa i jej zastosowanie w ekonomii*, PWG, Warszawa 1960.

#### Резюме

#### ВОПРОС ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ИЗ ФЕНОЛА, УПРОЧНЕННЫХ ХЛОПЧАТОБУМАЖНОЙ ТКАНЬЮ, ПРИ ИСПЫТАНИИ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Обсуждаются условия, проведенного испытания на растяжение, методика испытаний, а также способ определения важнейших конструкционных свойств материалов изготовленных из фенола, слоистых и, упрочненных хлопчатобумажной тканью. Дается зависимость напряжений. Приводится анализ явлений растяжения и разрыва образцов. В заключительной части работы делаются некоторые выводы.

Summary

THE PROBLEM OF DETERMINING, BY MEANS OF A TENSILE TEST, THE MECHANICAL PROPERTIES OF PHENOLICS LAMINATED AND MOULDED WITH CHOPPED COTTON FABRIC FILLER

This paper discusses the conditions of the tensile test that has been performed, also the general investigation method and the procedure for determining the most important mechanical properties of phenolics laminated and moulded with chopped cotton fabric filler. The stress-strain relations, elastic modulus and Poisson's ratio are described. Later part of the paper contains an analysis of the phenomenon of tension and rupture of a test piece. Some conclusions are drawn.

POLITECHNIKA KRAKOWSKA

Praca została złożona w Redakcji dnia 2 stycznia 1965 r.

№	Właściwość	Wartość	Współczynnik
1	Moduł sprężystości	1,10	0,25
2	Moduł sprężystości	1,040	0,25
3	Moduł sprężystości	1,040	0,25
4	Moduł sprężystości	1,040	0,25
5	Moduł sprężystości	1,040	0,25
6	Moduł sprężystości	1,040	0,25
7	Moduł sprężystości	1,040	0,25
8	Moduł sprężystości	1,040	0,25
9	Moduł sprężystości	1,040	0,25
10	Moduł sprężystości	1,040	0,25
11	Moduł sprężystości	1,040	0,25
12	Moduł sprężystości	1,040	0,25
13	Moduł sprężystości	1,040	0,25
14	Moduł sprężystości	1,040	0,25
15	Moduł sprężystości	1,040	0,25
16	Moduł sprężystości	1,040	0,25
17	Moduł sprężystości	1,040	0,25
18	Moduł sprężystości	1,040	0,25
19	Moduł sprężystości	1,040	0,25
20	Moduł sprężystości	1,040	0,25