

5.52 — fizyczne i mechaniczne  
własności metali

P. Kuśmierski, W. Orsetti

DOŚWIADCZALNE BADANIA  
EFEKTU SKALI W ZMĘCZENIU

30 / 1981

p. 269

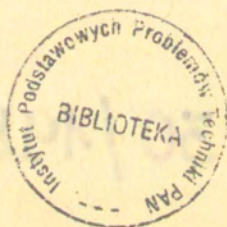


WARSZAWA 1981

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 2 lipca 1981 r.

Zarejestrowana pod nr 30/1981



57083



W a p r a w a c h r ę k o p i s u

---

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 160 egz. Ark.wyd. 1,1. Ark.druk.1,75.

Oddano do drukarni we wrześniu 1981 r.

Nr zamówienia 524/c

---

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,  
ul. Śniadeckich 8

<http://rcin.org.pl>

Piotr Kuśmierski, Wilhelm Orsetti  
Zakład Mechaniki Ośrodków Ciągłych  
IPPT PAN  
Instytut Konstrukcji Przyrządów  
Precyzyjnych i Optycznych  
Politechnika Warszawska

DOŚWIADCZALNE BADANIA EFEKTU  
SKALI W ZMĘCZENIU

1. Wprowadzenie

Konstrukcje maszynowe na ogół pracują w warunkach obciążeń zmiennych i czasami, po pewnej liczbie zmian obciążenia ulegają zniszczeniu. Spowodowane jest to zmęczeniem materiału. Obniżenie nośności elementów czy urządzeń, ogranicza ich czas użytkowania, a niekiedy może być przyczyną zagrożenia życia ludzkiego, jak w przypadku katastrof angielskich samolotów "Comet" [1].

W celu poznania istoty zmęczenia materiału, prowadzone są liczne badania, a ich wyniki stanowią wskazówkę, cenną ze względu na możliwość praktycznego zastosowania w przemyśle, w szczególności dla konstruktorów urządzeń mechanicznych. Badania te, zapoczątkowane w 1852 roku pracami A. Wöhlera wykazały złożony charakter procesu zmęczenia, jego uzależnienie od szeregu czynników takich jak: rodzaj obciążenia, stan powierzchni elementu, jego kształt i wymiary, wpływ ośrodka otaczającego, obróbka cieplna i inne. Udział każdego z wymienionych czynników w tym procesie stanowi odrębne zadanie badawcze, którego rozwiązanie prowadzi do lepszego poznania oraz praktycznego rozwiązania problemu niszczenia zmęczeniowego [2].

Graficzny obraz zależności między żywotnością próbki a wartością naprężeń cyklicznie zmiennych nosi nazwę krzywej

Wöhlera. Na ogół krzywą tę przedstawia się we współrzędnych półlogarytmicznych /  $6 - \log N$  / lub logarytmicznych /  $\log 6 - \log N$  / i wówczas aproksymuje się ją dwoma odcinkami prostej. Lewa gałąź krzywej Wöhlera opisuje zakres ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Prawa gałąź ma znacznie mniejsze pochylenie od lewej a w przypadku stopów żelaza jest praktycznie biorąc pozioma. Gałąź ta opisuje zakres trwałej wytrzymałości zmęczeniowej. Krzywą Wöhlera buduje się w oparciu o wyniki badań doświadczalnych. Przy jej wyznaczaniu wszystkie czynniki / oprócz amplitudy naprężeń / określające warunki eksperymentu muszą być stałe. Zmiana jakiegokolwiek z nich powoduje zmianę położenia krzywej Wöhlera w przyjętym układzie współrzędnych. Czynniki o których mowa wyszczególniono uprzednio. Jak wiadomo prowadzone są badania dotyczące wpływu tych czynników głównie na prawą gałąź krzywej Wöhlera. Podyktowane to jest dążeniem do znalezienia granicy zmęczenia rozumianej jako maksymalne cykliczne naprężenia, które nie wywołują zmęczenia próbek poddanych działaniu nieograniczonej liczby cykli. Badania wpływu wymienionych czynników na lewą gałąź krzywej są rzadkie a zagadnienie poznane jest znacznie słabiej [1,2].

III/

Wpływ wymiarów elementu na jego wytrzymałość jest uwzględniany w zagadnieniach zmęczeniowych za pomocą współczynnika wielkości  $\epsilon_w$  / zwanym również współczynnikiem skali /

$$\epsilon_w = \frac{Z_d}{Z_{d_0}}$$

gdzie  $Z_d$  i  $Z_{d_0}$  oznaczają odpowiednio wytrzymałość zmęczeniową elementu o średnicy  $d$  i  $d_0$  przy danym rodzaju obciążenia cyklicznego [2].

IV/ próbki walcowe

1.1. Wpływ wielkości elementu na wytrzymałość zmęczeniową stali

Dotychczas przeprowadzono liczne badania dla cyklicznego zginania, skręcania oraz jednoosiowego rozciągania - sciskania. Doświadczalnie stwierdzono, że wytrzymałość zmęczeniowa elementów konstrukcyjnych maleje z powiększaniem ich wymiarów [1,2,3,4,5,6].

Autorzy prac [3,4] zaobserwowali fakt obniżenia granic zmęczenia przy zginaniu obrotowym próbek gładkich o średnicach

wzrastających od 7 do 30 mm, o około 8% dla stali węglowej oraz 16% dla stali stopowych. Dla stopów magnezowych i aluminium wpływ czynnika wielkości zaznaczył się jeszcze silniej niż dla stali stopowych [3,4] .

Badania doświadczalne [5] wykazały, że w przypadku cyklicznego skręcania wpływ wielkości na granicę zmęczenia był nieco silniejszy niż przy zginaniu obrotowym.

Z. Dyląg i Z. Orłoś [2] wyjaśnili wpływ czynników materiałowych, technologicznych i konstrukcyjnych na efekt skali. Wykazali, że dla próbek z karbem wpływ wielkości elementu na granicę zmęczenia jest znacznie większy niż w przypadku próbek gładkich / rys. 1 / .

Badania prowadzone przez C. Phillipsa i R. Heywooda [6] na próbkach gładkich dla cyklicznego rozciągania - ściskania nie potwierdziły wpływu wielkości, natomiast dla próbek z karbem / próbki z poprzecznymi otworami  $d/D = \text{const.}$  / stwierdzono zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej wraz ze wzrostem średnicy próbki / rys. 2 / .

Effekt skali tłumaczony jest w pracy M. N. Afanasjewa [7] statystyczną zależnością ilości wad materiałowych od wielkości elementu a także na gruncie teorii gradientowych [2, 5, 7] . Teorie te, wyjaśniają stwierdzony doświadczalnie fakt zależności wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych od ich wymiarów, aczkolwiek jak dotąd nie są w stanie podać dostatecznie zadowalającego, teoretycznego rozwiązania wpływu efektu skali.

Tak więc, mimo pewnego rozwoju tych teorii, do obliczeń inżynierskich stosuje się wykresy zależności współczynnika wielkości  $\xi_w$  od średnicy  $d$  elementu, otrzymane na drodze doświadczalnej.

## 2. Badania własne

Do badań zastosowano czterostanowiskową maszynę zmęczeniową typ UBM Nr. 520/12 produkcji Veb-Werkstoffprüfmaschine Leipzig NRD, rok produkcji 1967, za pomocą której próbki poddawano obrotowemu zginaniu. Badania przeprowadzono przy częstotliwości 2500 cykli/min. Bezpośrednio na stanowiskach przeprowadzono

kontrolę wartości bicia promieniowego dopuszczając do badań tylko te próbki, dla których nie przekraczało ono  $\pm 4 \mu\text{m}$ . Doświadczenia przeprowadzono na próbkach gładkich ze stali 35, przyjmując jako bazę badań  $5 \times 10^6$  cykli. Wygląd próbek przedstawia rys. 3.

Zastosowano następujący sposób przygotowania próbek:

- cięcie ciągniętego pręta na odpowiednie odcinki oraz obróbka zgrubna przez toczenie,
- obróbka kształtująca i wykańczająca przez szlifowanie zgrubne i dokładne oraz wygładzanie bardzo drobnym papierem ściernym. Próbki nie były poddawane obróbce cieplnej, ale sam materiał był wyżarzany w jednym wsadzie.

W rezultacie przeprowadzonych badań wyznaczono dla próbek o średnicach  $d$  10, 8, 6 i 4 mm liczbę cykli niszczących  $N$  przy określonej wartości naprężenia gnącego  $\sigma$ . Wyniki badań przedstawiono w tablicach 1 - 4, i na rys. 4 - 5. Otrzymano następujące równania krzywych Wöhlera:

- w układzie współrzędnych /  $\sigma - \log N$  / dla próbek:

$d$ 10 mm	$\log N = 13,4785 - 0,2716 \cdot \sigma \cdot 0,1$
$d$ 8 mm	$\log N = 12,6420 - 0,2326 \cdot \sigma \cdot 0,1$
$d$ 6 mm	$\log N = 12,3995 - 0,2245 \cdot \sigma \cdot 0,1$
$d$ 4 mm	$\log N = 12,3186 - 0,2107 \cdot \sigma \cdot 0,1$

- w układzie współrzędnych /  $\log \sigma - \log N$  / dla próbek:

$d$ 10 mm	$\log N = 33,4597 - 19,0584 \log(\sigma \cdot 0,1)$
$d$ 8 mm	$\log N = 30,0556 - 16,5242 \log(\sigma \cdot 0,1)$
$d$ 6 mm	$\log N = 29,6359 - 16,2359 \log(\sigma \cdot 0,1)$
$d$ 4 mm	$\log N = 29,5903 - 15,9582 \log(\sigma \cdot 0,1)$

W tablicach 5 - 7 podano wyniki badań granicy zmęczenia próbek gładkich o średnicach  $d$  10, 8, 6, mm. Wyznaczone wartości granic zmęczenia oraz współczynników wielkości  $\epsilon_w$  podano w tablicy 8 i na rys. 6. Wartości granic zmęczenia wyznaczono metodą schodkową. Szczegółowy opis tej metody podany jest w pracy [2].

### 3. Wnioski

Jak widać / tabl. 8 / w porównaniu z próbkami  $d$  10 mm zaznaczył się wzrost wartości wytrzymałości zmęczeniowej o 0,47% dla próbek  $d$  8 mm i o 1,43% dla próbek  $d$  6 mm.

Na rys. 6 przedstawiono graficznie wpływ wymiarów na wytrzymałość badanych próbek. Krzywa / rys. 6 / wykazuje przy malejącej średnicy próbek, tendencję do wzrostu współczynnika wielkości  $\epsilon_w$  i tym ostrzejszego zaznaczania się efektu skali. Stwierdzony doświadczalnie fakt wzrostu wartości wytrzymałości zmęczeniowej przy zmniejszaniu wymiarów próbek w pełni potwierdza wyniki prac [1,2,3,4,5,6] .

Wyznaczone lewe gałęzie krzywych Wöhlera / rys.4 i 5 / posiadają charakterystyczne tęczy efektu skali, to jest wyraźnie zaznaczające się przesunięcie w prawo / w kierunku wzrastających żywotności / krzywych dla próbek z malejącą średnicą oraz zwiększanie ich stromości. Czynnikiem wielkości wprowadza znaczne różnice w wartościach ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Wyznaczono wpływ wielkości próbek na wartość wytrzymałości przy bazie  $N = 2 \times 10^5$ . Otrzymano dla średnic:

$$d = 10 \text{ mm} \quad \sigma = 301,086 \text{ MPa}$$

$$d = 8 \text{ mm} \quad \sigma = 315,606 \text{ MPa}$$

$$d = 6 \text{ mm} \quad \sigma = 316,191 \text{ MPa}$$

$$d = 4 \text{ mm} \quad \sigma = 333,061 \text{ MPa}$$

W porównaniu z  $d = 10 \text{ mm}$  wzrost wartości wytrzymałości zmęczeniowej wyniósł:

$$d = 8 \text{ mm} \quad \frac{315,606 - 301,086}{301,086} \times 100\% = 4,8\%$$

$$d = 6 \text{ mm} \quad \frac{316,191 - 301,086}{301,086} \times 100\% = 5\%$$

$$d = 4 \text{ mm} \quad \frac{333,061 - 301,086}{301,086} \times 100\% = 10,6\%$$

Wynika stąd, że w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej efekt skali zaznacza się jeszcze intensywniej, niż dla zakresu wytrzymałości nieograniczonej. Przesunięcie krzywych Wöhlera w kierunku większych żywotności wraz ze zmniejszaniem średnicy badanych próbek szczególnie silnie uwidoczniło się dla średnicy  $d = 4 \text{ mm}$ , w przypadku której stwierdzono wzrost średniej wartości wytrzymałości zmęczeniowej o 10,6%.

Porównując krzywe Wöhlera dla  $d = 10, 8, 6, 4 \text{ mm}$  i dla naprężenia  $\sigma = 320 \text{ MPa}$  / rys. 4 i 5 / wyznaczono żywotności próbek.

Otrzymano dla średnic:

$$d = 10 \text{ mm} \quad N = 0,612 \times 10^5$$

$$\begin{aligned}d = 8 \text{ mm} & \quad N = 1,582 \times 10^5 \\d = 6 \text{ mm} & \quad N = 1,642 \times 10^5 \\d = 4 \text{ mm} & \quad N = 3,762 \times 10^5\end{aligned}$$

W porównaniu z d 10 mm wzrost żywotności wynosił:

$$\begin{aligned}\text{dla } d \text{ 8 mm} & \quad \frac{1,582 - 0,612}{0,612} \times 10^5 \times 100\% = 158,5\% \\d \text{ 6 mm} & \quad \frac{1,642 - 0,612}{0,612} \times 10^5 \times 100\% = 168,3\% \\d \text{ 4 mm} & \quad \frac{3,762 - 0,612}{0,612} \times 10^5 \times 100\% = 514,7\%\end{aligned}$$

Wynika stąd, że w obszarze ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej czynnik wielkości wprowadza bardzo duże różnice w wartościach żywotności. Stwierdzono 514,7 % wzrost żywotności spowodowany zmianą rozmiarów próbek z d 10 mm na d 4 mm, dla przyjętego poziomu naprężenia  $\sigma = 320 \text{ MPa}$ .

#### 4. Podsumowanie

W pracy rozpatrzono zagadnienie efektu skali w zmęczeniu. Badania doświadczalne poprowadzono w dwóch kierunkach. Pierwszy, tradycyjny szeroko rozwijany dla celów praktycznych to badanie wpływu wielkości elementu na wartość granicy zmęczenia. Wyniki doświadczeń wykazały, że wraz ze zmniejszaniem wymiarów elementu, wzrasta wartość wytrzymałości zmęczeniowej, co potwierdza wyniki prac innych autorów. Intensywność wzrostu granicy zmęczenia wywołana czynnikiem wielkości wskazuje na tendencję do zwiększania się efektu skali dla zmniejszających się rozmiarów elementu. Drugi kierunek, dotychczas mniej znany, to badanie wpływu czynnika wielkości na charakter krzywej Wöhlera. Stwierdzono charakterystyczne cechy krzywych zmęczenia, to jest zwiększanie stromości oraz przesunięcie lewych gałęzi krzywych Wöhlera w kierunku wzrastających żywotności, przy zmniejszaniu wymiarów. W zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej efekt skali zaznaczył się jeszcze silniej niż dla granic zmęczenia.



## 5. Literatura

1. G.SINES, J.L.WAISHMAN, Zmęczenie metali, WNT Warszawa 1962
2. Z.DYLAĞ, Z.ORŁOŚ, Wytrzymałość zmęczeniowa materiałów, WNT Warszawa 1962
3. S.W.SERENSEN, Dinamiczeskaja procznosc w maszynostrojeni, Oborongis 1945
4. S.J.RATNER, Razruszenie pri powtornych nagruzkach, Oborongis Moskwa 1959
5. A.BUCH, Zagadnienie wytrzymałości zmęczeniowej, PWN Warszawa 1964
6. C.PHILLIPS, R.HEYWOOD, Proc.Inst.Mech.Engl., Vol.65, 1951
7. M.N.AFANASJEW, Statisticzeskaja teoriija ustalostnoj procznosti metallow, Żurnał techniczeskoj fizyki, nr 19 1940

6. Tablice 1 - 8

T A B L I C A 1

Wyniki badań próbek o  $\phi$  10 mm na obrotowe zginanie

Lp.	$\sigma = 335$ MPa		$\sigma = 315$ MPa		$\sigma = 295$ MPa		$\sigma = 275$ MPa	
		N		N		N		N
1		21000		48600		205900		634800
2		25600		60100		213800		877500
3		26500		64200		219400		1263500
4		26600		69600		255200		1307300
5		30700		75100		296200		1357700
6		32200		80100		317700		1400000
7		33600		106800		390400		1569500

T A B L I C A 2

Wyniki badań próbek o  $\phi$  8 mm na obrotowe zginanie

Lp.	$\sigma = 340$ MPa		$\sigma = 320$ MPa		$\sigma = 300$ MPa		$\sigma = 280$ MPa	
	N		N		N		N	
1	35100		99500		486500		840000	
2	46400		102800		501600		1059400	
3	47400		135200		562600		1083100	
4	50300		136300		606300		1221100	
5	65100		143600		650300		1311200	
6	69700		145100		758400		1424000	
7	99200		151200		799700		1498300	

T A B L I C A 3

Wyniki badan próbek o  $\phi$  6 mm na obrotowe zginanie

Lp.	$\sigma = 345$ MPa		$\sigma = 325$ MPa		$\sigma = 305$ MPa		$\sigma = 285$ MPa	
		N		N		N		N
1		33900		90500		320300		797800
2		35000		94400		372800		836300
3		48600		108000		373000		846900
4		54000		111300		389100		850500
5		55200		121600		391300		942000
6		56700		124200		393200		1177000
7		57900		137800		467300		1768000

T A B L I C A 4

Wyniki badań próbek o  $\phi$  4 mm na obrotowe zginanie

Lp.	$\sigma = 350$ MPa		$\sigma = 330$ MPa		$\sigma = 310$ MPa	
	N		N		N	
1	62700		202300		413600	
2	71400		214800		426000	
3	73800		218400		454700	
4	79600		220100		456200	
5	82700		254400		492000	
6	87000		285700		516400	
7	91500		288800		572000	
8	92600		296800		803800	
9	100400		308000		892400	
10	101500		327400		1147600	

T A B L I C A 5

Wyniki badań próbek o  $\phi$  10 mm na obrotowe zginanie  
wyznaczenie granicy zmęczenia

Lp.	$\sigma$ , MPa	liczba cykli	pęka, nie pęka
1	260	5500000	nie pęka
2	265	5001100	nie pęka
3	270	4059900	pęka
4	265	1297600	pęka
5	260	1213900	pęka
6	255	4930000	nie pęka
7	260	1370400	pęka
8	255	5617600	nie pęka
9	260	6494200	nie pęka
10	265	6252300	nie pęka
11	270	1388100	pęka
12	265	1476400	pęka
13	260	5656300	nie pęka
14	265	1572200	pęka
15	260	6276300	nie pęka
16	265	1151500	pęka

T A B L I C A 6

Wyniki badań próbek o  $\phi$  8 mm na obrotowe zginanie  
wyznaczenie granicy zmęczenia

Ip.	$\sigma$ , MPa	liczba cykli	pękła, nie pękła
1	270	2617300	pękła
2	265	5000500	nie pękła
3	270	2224900	pękła
4	265	3680000	pękła
5	260	5083000	nie pękła
6	265	1153700	pękła
7	260	5000200	nie pękła
8	265	3140300	pękła
9	260	5000000	nie pękła
10	265	1168000	pękła
11	260	4545000	nie pękła
12	265	3589100	pękła
13	260	4500000	nie pękła
14	265	3051000	pękła
15	260	6215400	nie pękła
16	265	4980000	nie pękła



## T A B L I C A 7

Wyniki badań próbek o  $\phi$  6 mm na obrotowe zginanie  
wyznaczenie granicy zmęczenia

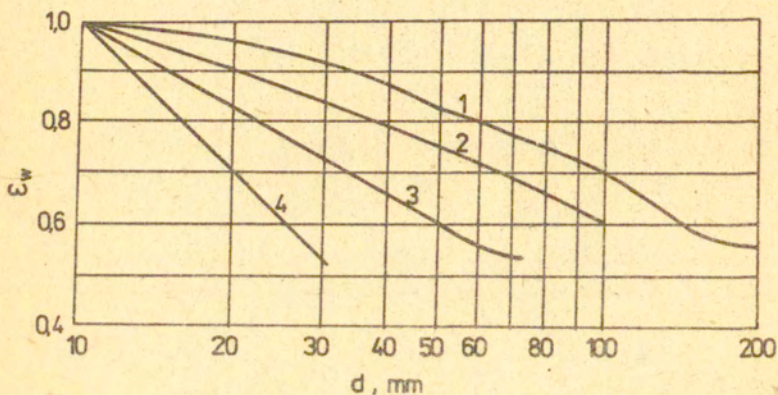
Lp.	$\sigma$ , MPa	liczba cykli	pękła, nie pękła
1	270	1838300	pękła
2	265	1302000	pękła
3	260	5744300	nie pękła
4	265	5004000	nie pękła
5	270	1687100	pękła
6	265	1436700	pękła
7	260	4517000	nie pękła
8	265	4870000	nie pękła
9	270	2175400	pękła
10	265	3168100	pękła
11	260	4500000	nie pękła
12	265	5634800	nie pękła
13	270	6523300	nie pękła
14	275	1105000	pękła
15	270	1693100	pękła
16	265	5090300	nie pękła

T A B L I C A 8

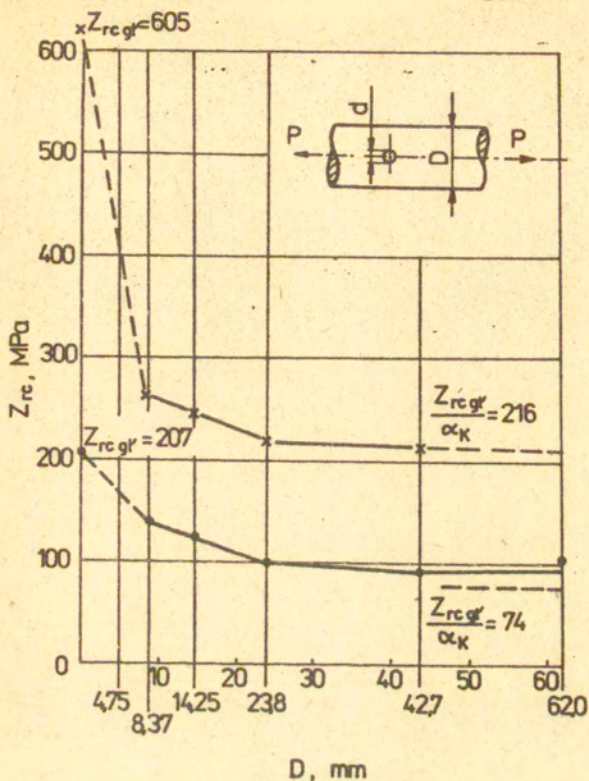
Wyznaczenie granic zmęczenia próbek stalowych

d mm	$Z_{god}$ MPa	$\epsilon_w = \frac{Z_{god}}{Z_{go} \cdot 10}$
10	262,50	1,0000
8	263,75	1,0047
6	266,25	1,0143

7. Rysunki 1 - 6

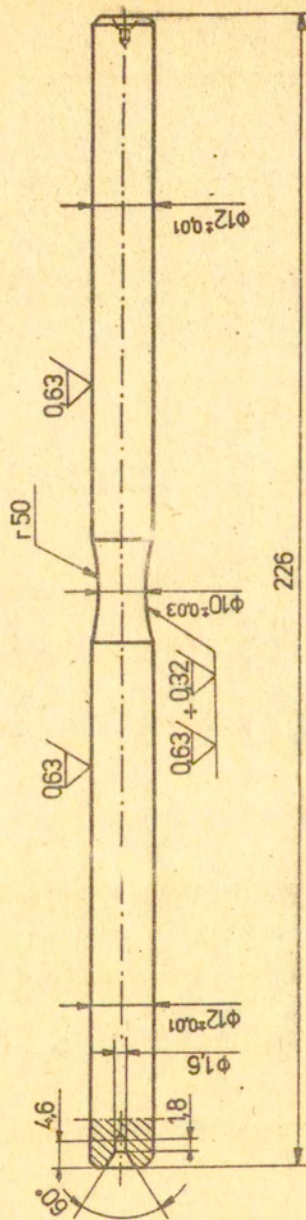


Rys.1. Wpływ wymiaru elementu na wytrzymałość zmęczeniową stali, długość próbek znormalizowana [2]  
 1 - stal węglowa /gładkie próbki/,  
 2 - stal stopowa  $R_m = 1000-1200$  MPa /gładkie próbki/ względnie węglowa w przypadku próbek z małym spiętrzeniem naprężeń /przewiercenie  $a/d=0,25$  odsadzenie  $r/d=0,1$  /,  
 3 - stal stopowa  $R_m = 1000-1200$  MPa, próbki z karbem  
 4 - próbki stalowe z dużym spiętrzeniem naprężeń

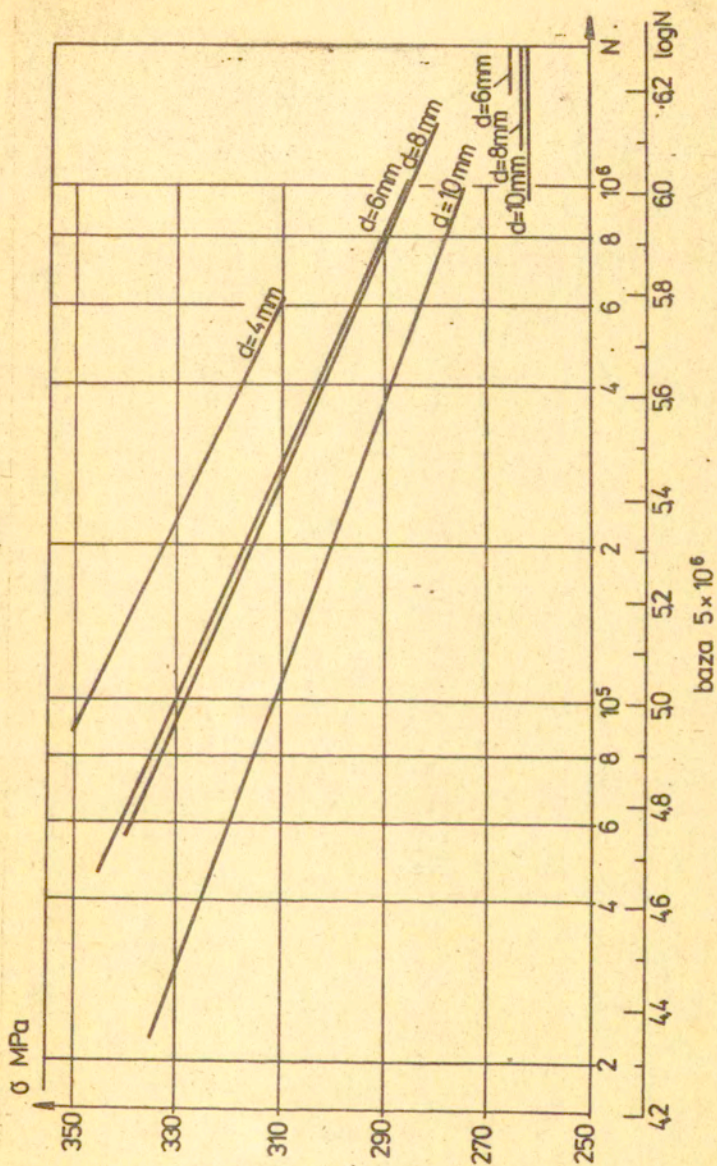


Rys. 2. Wytrzymałość zmęczeniowa na wahadłowe rozciąganie ściskanie próbek o różnych średnicach  $D$  z poręcznymi otworami o średnicy  $d$  / we wszystkich badaniach przyjęto stały stosunek  $d/D = \frac{1}{5}$ , tj.  $\alpha_k = 2,8 / \frac{\%}{\%}$   
 x - stal chromowo-niklowa o wytrzymałości zmęczeniowej próbek gładkich  $Z_{rcgr} = 605$  MPa  
 o - miękka stal węglowa o wytrzymałości zmęczeniowej gładkich próbek  $Z_{rcgr} = 207$  MPa

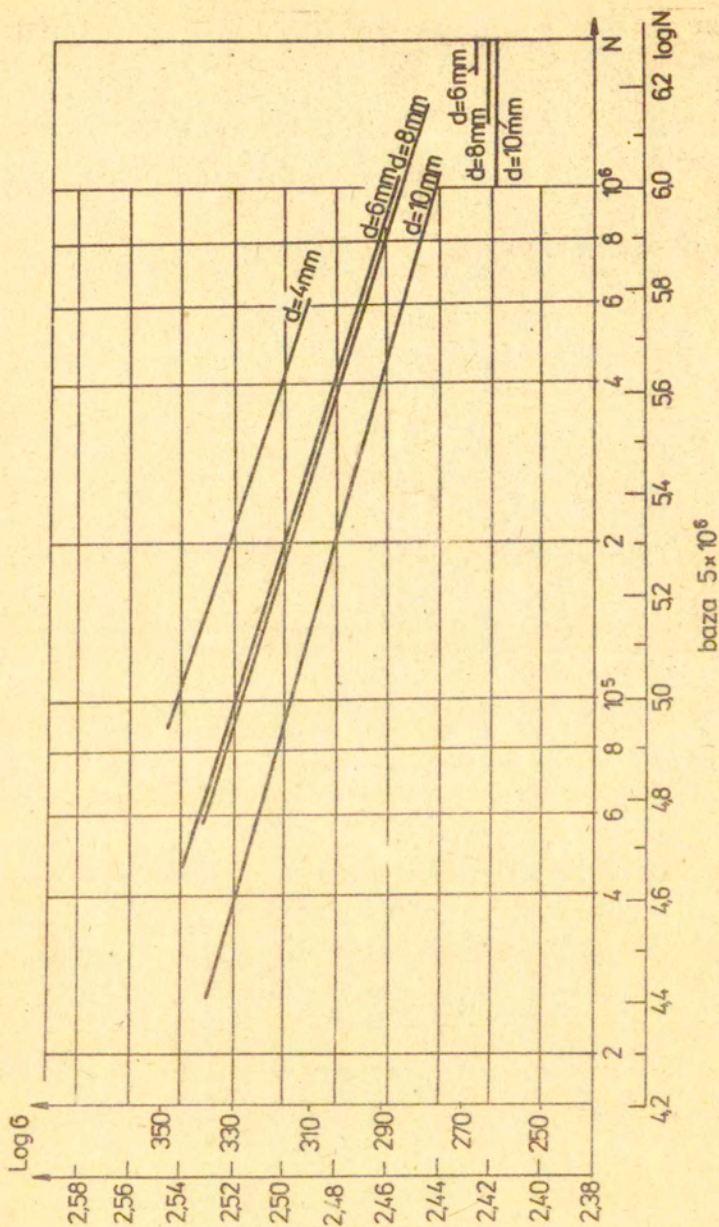
$\frac{\%}{\%}$  / długość próbek znormalizowana [2]



Rys. 3. Próbkę do określenia  $Z_{50}$  na maszynie zmęczeniowej, długość próbek znormalizowana.

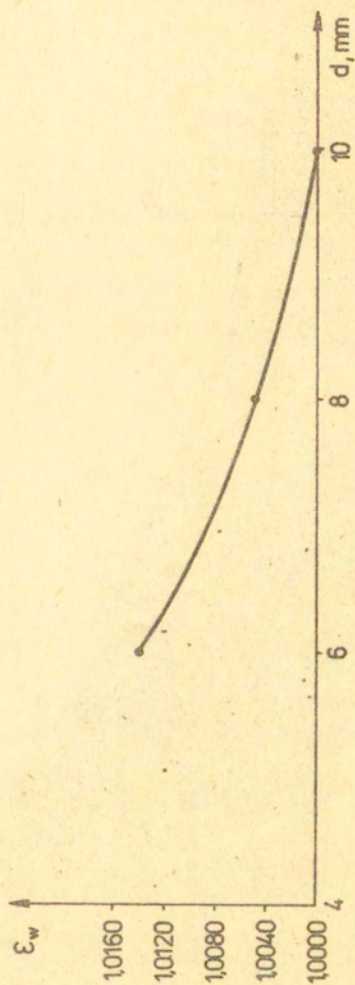


Rys.4. Krzywe Wöhlera dla materiału 35, zginanie obrotowe próbek bez karbu



Rys. 5. Krzywe Wöhlera dla materiału 35, zginanie obrotowe próbek bez karbu





Rys.6. Zależność wytrzymałości zmęczeniowej od wymiarów próbek stalowych - krzywa doświadczalna

## 8. Spis treści

1. Wprowadzenie .....	3
1.1. Wpływ wielkości elementu na wytrzymałość zmęczeniową stali .....	4
2. Badania własne .....	5
3. Wnioski .....	6
4. Podsumowanie .....	8
5. Literatura .....	9
6. Tablice .....	11
7. Rysunki .....	21