

### R O Z D Z I A Ł III.

#### WYBÓR NAPRĘŻEŃ DOPUSZCZALNYCH

Po poznaniu głównych cech wytrzymałościowych materiałów konstrukcyjnych możemy przejść do zagadnienia wyboru naprężeń dopuszczalnych inaczej zwanych również bezpiecznymi. Jak widzieliśmy równania wytrzymałościowe, które służą do obliczania wymiarów konstrukcji zawierają naprężenia. Dopiero po nadaniu tym naprężeniom właściwych wartości możemy wyznaczyć wymiary, albo idąc drogą odwrotną, zadając pewne wymiary, możemy wyznaczyć panujące naprężenia i stwierdzić, czy są one właściwe.

Pierwszym nakazem dla konstruktora w tem zagadnieniu jest pozostanie w obszarze naprężeń tylko sprężystych, gdyż wymiary maszyny nie mogą się zmieniać podczas pracy w sposób trwały. Z tego to właśnie względu gra tak ważną rolę w materiałach plastycznych granica plastyczności, jako praktyczna granica sprężystości. W braku wyraźnie zaznaczonej tej granicy posługujemy się granicą umówioną, jak np. granica 0,2%, granica 0,01% i inne. Poza tem jednak konstruktor musi mieć na uwadze, że założenia jego przy obliczaniu w mniejszym lub większym stopniu odbiegają od rzeczywistości, że czasem świadomie bierze on pod uwagę tylko główne

siły obciążenia, lub, że nie jest w stanie przewidzieć wszystkich okoliczności pracy maszyny. Między innymi należy liczyć się z tem, że liczby dostarczane przez pracowni wytrzymałościowe odnośnie  $R_r$ ,  $Q_r$  i t.p. są to liczby przeciętne z wielu doświadczeń, które poszczególne mogą się różnić między sobą, że nie zawsze możemy dokładnie skontrolować stosowany materiał konstrukcyjny. Również liczyć się trzeba z rodzajem obsługi maszyny i z warunkami otoczenia jej podczas pracy. Jaskrawym przykładem może być naprzykład maszyna rolnicza, obsługiwana często przez ludzi mało wykwalifikowanych, pracująca w brudzie, w złych warunkach klimatycznych. Z tego względu naprężenia dopuszczalne nie tylko muszą być niższe od wytrzymałości doraźnej, by nie nastąpiło zerwanie, nie tylko muszą być niższe od granicy sprężystości, by nie nastąpiły odkształcenia trwałe, lecz jeszcze muszą być od tych granic **d o s t a t e e z - n i e** niższe, aby był zachowany pewien zapas bezpieczeństwa na wypadki nieprzewidziane. Powyższe wskazuje na niezbędnosć stosowania pewnych współczynników bezpieczeństwa względem tych czy innych wartości granicznych, jakimi w pierwszym rzędzie są  $R_r$  i  $Q_r$ . Początkowo brano pod uwagę stosunek do  $R_r$ , wybierany jednak tak, by jednocześnie naprężenie dopuszczalne

leżało niżej i granicy plastyczności. W niektórych wypadkach, jak np. przy obliczaniu blach kotłowych, sposób ten zachowuje się dotąd. Dopiero po wzrośnięciu większej uwagi na charakterystyczny punkt granicy plastyczności zaczęto wybierać stopnie bezpieczeństwa w stosunku do niej.

Istnieje pewna dziedzina zjawisk wytrzymałościowych, mająca bardzo ważne znaczenie przy wyborze właściwego stopnia bezpieczeństwa. Zjawiska te już od lat stu zwracały uwagę konstruktorów. Stwierdzono mianowicie, że części pracujących maszyn pękały przy naprężeniach znacznie niższych od naprężeń wytrzymałości doraźnej i że przyczyną tego była duża zmienność naprężeń. Znany rozgłos mają badania przeprowadzone w tej dziedzinie przez inżyniera niemieckiego Wöhlera w latach od 1860 do 1870 roku. Ze względu na ważność zagadnienia przytaczamy tutaj liczby, otrzymane przez Wöhlera przy badaniu stali zgrzewanej o wytrzymałości doraźnej  $3600 \text{ kg/cm}^2$ . Otrzymane na podstawie poniższych liczb wyniki Wöhlera są następujące:

1/ Materiały, jak żelazo kowalne i stal, można doprowadzić do zerwania naprężeniem mniejszym od doraźnej wytrzymałości, skoro tylko wartość naprężenia zmienimy dostateczną ilość razy.

Rodzaj obciążenia	Ciężnienie		Różnica naprężeń $\text{kg/cm}^2$	Liczba zmian przed pęknięciem
	największe $\text{kg/cm}^2$	najmniejsze $\text{kg/cm}^2$		
<i>wahliwe.</i>	+ 2400	- 2400	4800	56430
	2250	2250	4500	99000
	2100	2100	4200	183145
	1940	1940	3880	479490
	1810	1810	3620	909840
	1650	1650	3300	3632588
	1510	1510	3020	4917992
	1350	1350	2700	19186791
	1200	1200	2400	(132500000) (bez pęknięcia)
<i>potwahiwe.</i>	+ 3600	0	3600	800
	3300	0	3300	106910
	3000	0	3000	340353
	2700	0	2700	409481
	2400	0	2400	10141645
	3300	1500	1800	2373424
	3300	1800	1500	(4000000) (bez pęknięcia)

Tablica VIII.

2/ Liczba zmian naprężenia, potrzebna do zerwania pręta, zależy nie tylko od wielkości największego naprężenia, lecz także od różnicy między krańcowymi wartościami naprężeń.

3/ Im ta różnica mniejsza, tem większej liczby wahań wartości naprężenia potrzeba do wywołania pęknięcia materiału.

4/ Można znaleźć taką graniczną wartość różnicy między największem i najmniejszym naprężeniem, przy której materiał wytrzymuje praktycznie dowolną liczbę zmian

/ jeżeli jedna z granic, między którymi waha się naprężenie jest dana /.

5/ Ta graniczna wartość różnicy naprężeń jest tem mniejsza, im wyższą wartość ma największe naprężenie /Timoszenko-Huber "Kurs wytrzymałości materiałów" str.37/.

Od czasów Wöhlera doświadczenia nad zachowaniem się metali przy obciążeniach bądź tylko zmiennych /na obszarze jednego znaku/ bądź przemiennych / na obszarze dwóch znaków / stale są przeprowadzane na specjalnych, coraz więcej udoskonalanych maszynach. Badane zjawiska znane są pod nazwą zmęczenia metali. Charakterystyczne jest, że pęknięcia materiałów plastycznych, powstałe wskutek zmęczenia, t.j. wskutek obciążeń okresowo zmiennych, nie wykazują w miejscu zniszczenia — szczytki, która powstaje przy zwykłym rozrywaniu. W wyniku badań powstały nowe pojęcia wytrzymałościowe, które w naszym języku nie mają jeszcze ustalonych nazw i znaków.

Jeżeli obciążenie przemiennie waha się pomiędzy dwoma jednakowymi naprężeniami różnych znaków, to nazywamy je wahliwym. Wytrzymałością trwałą przy obciążeniu wahliwym nazywać będziemy to największe naprężenie, do którego można obciążać dany materiał praktycznie dowolną ilość razy bez zniszczenia.

Oznaczmy ją przez  $Z_w$ . Może tu być mowa o wytrzymałości trwałej przy rozciąganiu  $Z_{wv}$ , ścinaniu  $Z_{wt}$ , skręcaniu  $Z_{ws}$ . Jeżeli obciążenie zmienne waha się od zera do jednej i tej samej wartości naprężenia, to nazywamy je półwahliwym. Wytrzymałością trwałą przy obciążeniu półwahliwym nazywamy to naprężenie, do którego można zmieniać obciążenia od zera praktycznie dowolną ilość razy bez zniszczenia. Oznaczmy ją przez  $Z_p$ . Badania wykazały, że dla stali można przyjąć jako praktycznie dowolną liczbę zmian - 10000000. Jednak dla metali lekkich liczba ta uznana została za zupełnie niedostateczną, gdyż zdarzały się pęknięcia dopiero po 70 milionach zmian.

Wyniki prac Wöhlera zostały praktycznie wykorzystane przez Karola Bacha. Układając znaną swą tablicę naprężeń dopuszczalnych dla żelaza, stali i żeliwa, Bach przyjął dla trzech typów obciążenia, stałego, półwahliwego i wahliwego, które nadal możemy krótko określać, jako typu  $a$ ,  $b$ , wreszcie  $c$ , stosunek przyjęty z doświadczeń Wöhlera. Z wyżej podanych liczb Wöhlera wynika, że było  $R_v = 3600 \text{ kg/cm}^2$ ,  $Z_p = 2400$  i  $Z_w = 1200$ ; otrzymujemy stosunek  $R_v : Z_p : Z_w = 3:2:1$ .

Pierwotna tablica Bacha została ułożona w ten sposób, że tam, gdzie brakowało liczb doświadczalnych, wzię-

tych z gotowych dobrze pracujących konstrukcyj, tam dopełniono je liczbami zachowującymi podany stosunek. Późniejsze badania, ogłoszone przez A. Föppla, dały inny stosunek, mianowicie 2:1,2:1, doświadczenia zaś badaczy amerykańskich Smith'a, Moore'a z 1910 roku wskazują raczej na stosunek 2:1,6:1.

Ponieważ normalne naprężenia przy zginaniu składają się z rozciągających i ściskających, przeto naprężenia dopuszczalne przy zginaniu dla żelaza i stali zostały przyjęte przez Bacha te same, co przy rozciąganiu. Dla żeliwa zależą naprężenia dopuszczalne przy zginaniu od profilu i stanu powierzchni, jak to widać dalej z więcej zasługującej na polecenie nowoczesnej tablicy prof. Rütchera. Wszystkie liczby stosują się do obciążeń statycznych i przy założeniu przeciętnie dobrego materiału, celowej konstrukcji i należytej obsługi danej części maszynowej. Z punktu widzenia dzisiejszych wymagań powyższa tablica Bacha-Föppla jest zbyt ogólnikowa, gdyż zbyt mało klasyfikuje materiały. Prócz tego należy zaznaczyć, że według dzisiejszych poglądów wytrzymałość na ścinanie dla materiałów plastycznych wynosi raczej  $0,6 R_v$ , a nie 0,8, jak to przyjęte zostało w tej tablicy zgodnie z poprzednimi hipotezami wytrzymałościowymi.



Tablica naprężeń dopuszczalnych Bacha, zmienione wg. stosunku

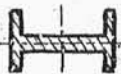


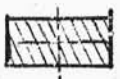



A. Föppl

Materiał	Napięcia dopuszczalne w kg/cm <sup>2</sup>														
	Rozciąganie - $k_t$			Ściskanie - $k_c$			Ciężkie - $k_s$			Skręcanie - $k_s$			Skręcanie - $k_s$		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Żelazo zgrzewane	900	540	450				900	540	450	720	430	360	360	220	180
	900 do 1500	540 do 900	450 do 750	900 do 1500	540 do 900	450 do 750	900 do 1500	540 do 900	450 do 750	720 do 1200	430 do 720	360 do 600	600 do 1200	560 do 720	500 do 500
Stal zlewna	1200 do 1800	720 do 1080	600 do 900	1200 do 1800	720 do 1080	600 do 900	1200 do 1800	720 do 1080	600 do 900	960 do 1440	580 do 860	480 do 720	900 do 1440	540 do 860	450 do 720
Z e l i w o	300	180	150	900	540	-	-	-	-	500	180	150	-	-	-
Odlew stalowy	600 do 1200	360 do 720	300 do 600	900 do 1500	540 do 900	375 do 600	750 do 1200	450 do 720	375 do 600	480 do 960	290 do 680	240 do 480	480 do 960	290 do 580	240 do 480

Tablica IX.



Tablica naprężeń dopuszczalnych dla żeliwa p.c. prof. Röttschera

300	-	350	stałe "a"	Rozciąganie nie $\frac{N}{F}$ kg/cm <sup>2</sup>	Ściskanie nie $\frac{N}{F}$ kg/cm <sup>2</sup>
200	-	230	półwahliwe "b"		
100	-	120	wahliwe "c"		
900	-	1000	stałe "a"	Ściskanie nie $\frac{N}{F}$ kg/cm <sup>2</sup>	Ściskanie
600	-	680	półwahliwe "b"		
$K_T = K_{\gamma}$			Ścinanie		
			Kształt przekroju	Zginanie - $M_g$ - kg/cm <sup>2</sup>	Uwaga
310 - 400	370 - 480	460 - 600	stałe "a"		
210 - 270	250 - 320	310 - 400	półwahliwe "b"		
100 - 130	120 - 160	150 - 200	wahliwe "c"		
Podane liczby dla zginania stosują się do powierzchni w stanie surowym. Dla powierzchni obrabionych zwiększamy do 1,2.					
				Kształt przekroju	Ścinanie - $M_s$ - kg/cm <sup>2</sup>
420-550	380-500	220-290	270-350	stałe "a"	
280-370	230-330	150-190	180-250	półwahliwe "b"	
140-180	130-160	70-100	90-120	wahliwe "c"	

Tablica X.

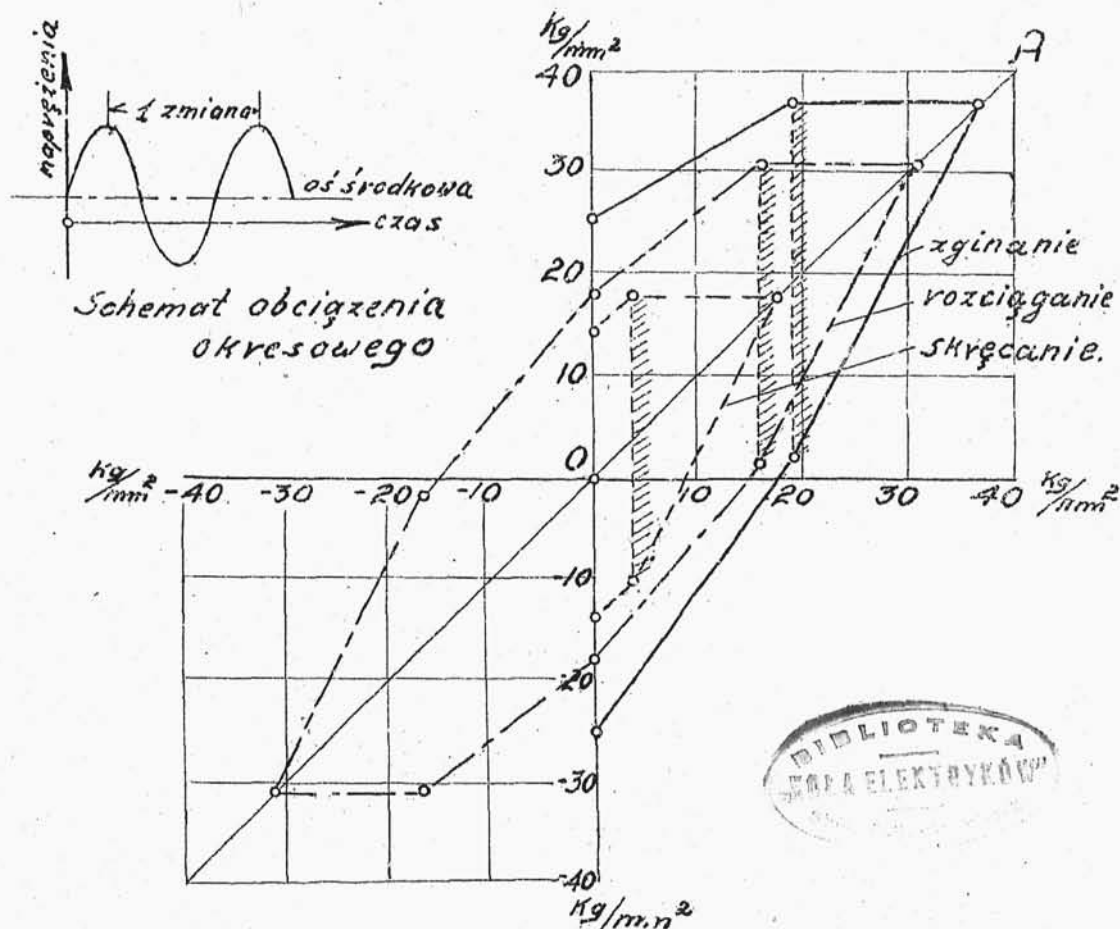
Dla materiałów plastycznych, jak stal, staliwo i inne, dla których granica plastyczności może być odczytana bezpośrednio z wykresu  $\sigma, \epsilon$ , lub w sposób umówiony oznaczona - można wybrać podstawowe naprężenia dopuszczalne w zależności od tej właśnie granicy. Mianowicie dla obciążenia typu  $A$  można przyjąć około  $0,5 Q_r$ , zaś dla typów  $B$  względnie  $C$ , zachowując stosunek Föppla lub amerykański, otrzymany  $/0,3 \text{ do } 0,4/ Q_r$ , względnie  $0,25 Q_r$ . Są to liczby wytyczne, którymi wypada się posługiwać, gdy brak bliższych szczegółowych danych, opartych na doświadczeniu i praktyce w indywidualnych zadaniach i wypadkach. Niektóre ogólne liczby będą podawane przy obliczaniu poszczególnych części maszyn. Najbliższe do rzeczywistości wyniki otrzymujemy, opierając się nie na badaniu materiałów konstrukcyjnych, lecz gotowych wykonanych konstrukcji, jak np. w żyłkach kulkowych, jest to jednak praktycznie możliwe tylko przy masowej produkcji na wielką skalę, opartej na własnych pracowniach doświadczalnych.

W ostatnim dziesięcioleciu rozpowszechnia się szczególnie dla stali następująca metoda wyboru naprężeń: dla obciążeń stałych przyjmuje się pewien ułamek granicy plastyczności, dla obciążeń półwahliwych i wahliwych ułamek odpowiednich wytrzymałości trwałych

$Z_p$  i  $Z_w$ , z zastrzeżeniem pozostania w obszarze odkształceń tylko sprężystych. Na tej podstawie zostały zaprojektowane przez inż. Garleppa specjalnie dla maszyn dźwigowych tablice naprężeń, które w tym dziale konstrukcji znalazły rozpowszechnienie.

Poza obciążeniami wahliwymi i półwahliwymi mogą być obciążenia przemienne i zmienne, które zachodzą pomiędzy rozmaitymi więc niejednakowymi wartościami naprężeń skrajnych, lub względnie nie dochodzą do zera. Wszystkie one będą miały swoje naprężenia środkowe, swoje środki wahań; dla wahlowego jest nim  $O$ , dla półwahliwego - połowa skrajnego. Dla każdego naprężenia środkowego można wyznaczyć doświadczalnie graniczne największe <sup>wytrzymałość</sup> naprężenia, do których daje się materiał obciążać praktycznie dowolną ilość razy bez zniszczenia. W ten sposób można utworzyć wykresy przedstawione na rysunku 22. Linja  $OA$ , przeprowadzona pod kątem  $45^\circ$ , jest linją naprężeń środkowych. Widzimy tam naprężenia  $Z_p$  i  $Z_w$ . Jeżeli linją poziomą odetniemy naprężenia powyżej granicy plastyczności, to otrzymujemy obszar naprężeń bezpiecznych w wypadku idealnym. Praktycznie dopuszczalne naprężenia powinny być, jak to wskazano wyżej, mniejsze. Takie właśnie wykresy wytrzymałości materiałów są brane obecnie za podstawę do wyboru naprę-

zeń dopuszczalnych. Na rys.23 są podane te wykresy dla



Rys. 22.

stali miękkiej o  $R_v = 3700 \text{ kg/cm}^2$ . Odróżniamy tu wykres zginania, rozciągania i skręcania. Gdyby np. był pręt z tej stali obciążony przemianami od  $+\sigma_1 = 950$  do  $-\sigma_2 = 150 \text{ kg/cm}^2$ , to naprężenie środkowe jest

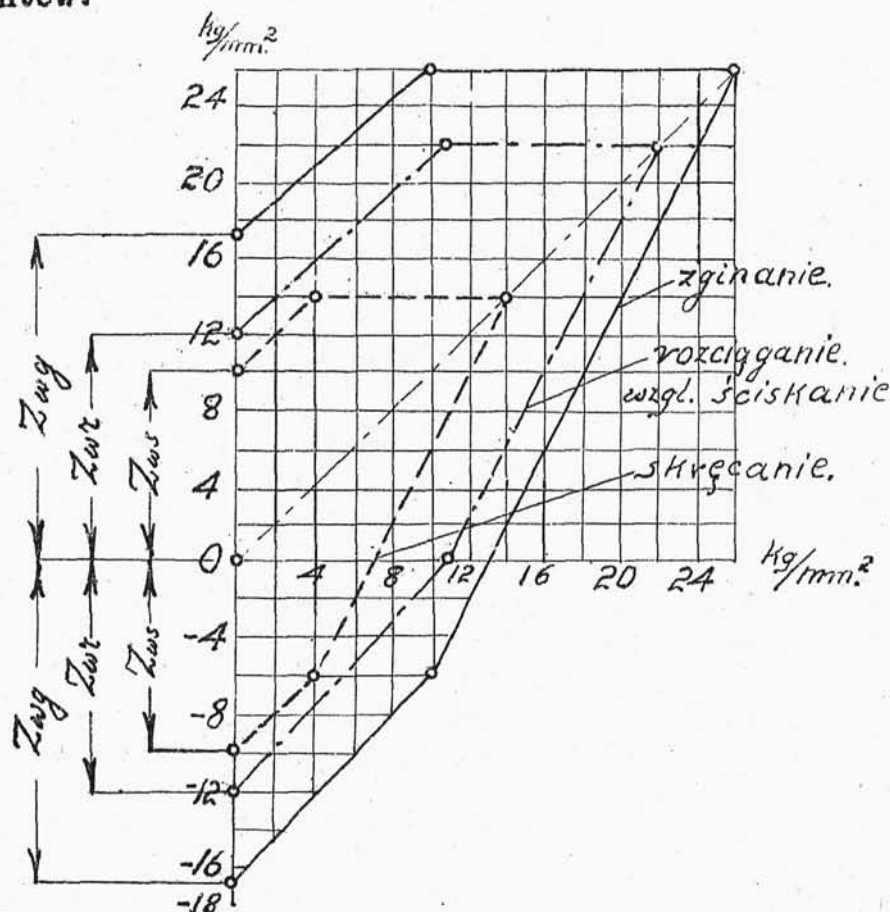
$$\frac{950 - 150}{2} = 400 \text{ kg/cm}^2 \text{ od którego skrajny wysięg} =$$

$550 \text{ kg/cm}^2$ , na wykresie zaś dla naprężenia środkowego

$4 \text{ kg/mm}^2$  mamy przy rozciąganiu graniczne naprężenie

około  $1550 \text{ kg/cm}^2$ , graniczny wysięg więs =  $1550 - 400 = 1150 \text{ kg/cm}^2$ , czyli zapas  $\frac{1150}{550} = 2,1$ . Potrzeba zachowania zapasu była uzasadniona już wyżej.

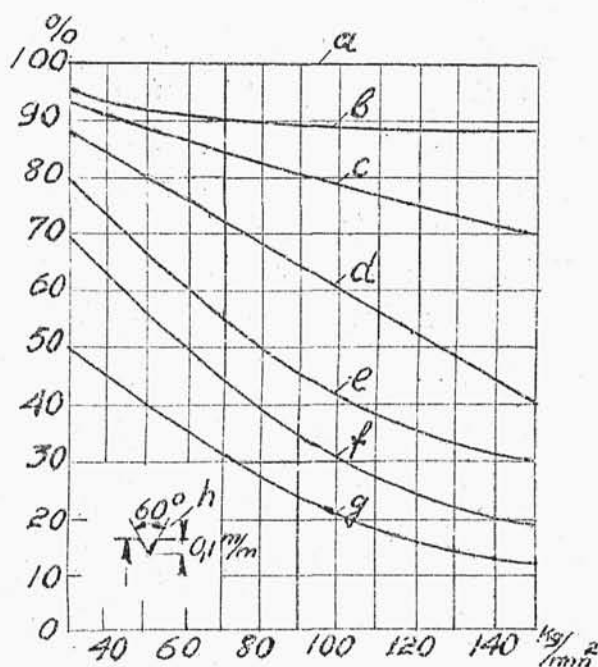
Zapasy ten powinien być tem większy: 1/ im więcej różnić się będzie stan zaprojektowanych elementów od stanu badanych w pracowni prętów, które to badania dostarczyły powyższych wykresów, 2 / im więcej założenia obliczeń odbiegać będą od praktycznych warunków pracy elementów.



Rys .23.

Co się tyczy pierwszego, to w praktyce nigdy prawie nie mamy tak dobrych warunków, jak w pracowni, gdzie badane pręty są najgładziej obrobione /polerowane/ i tak wykonane, by obciążenie zgadzało się z kierunkiem włókien walcowania. Wytrzymałość trwała przy obciążeniu wahlwym wpoprzek włókien obniża się dla miękkiej stali o 10% dla twardych gatunków do 25%. Krzywe rys.24 podają w procentach stopień zmniejszenia wysięgu granicznego wykresów wytrzymałości /w rodzaju rys.

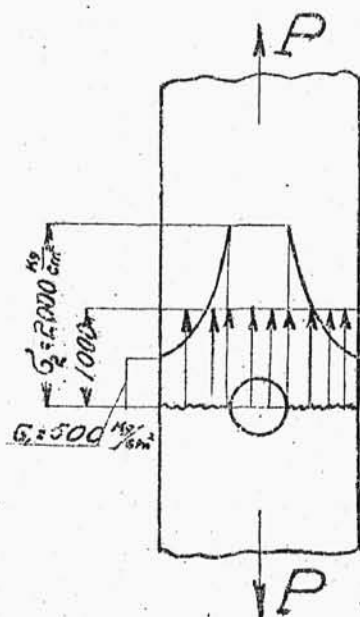
23/ dla rozmaitych stanów powierzchni zależnie od wytrzymałości doraźnej stali  $R_V$ . Oznaczenia odpowiadają powierzchni: *a*/ polerowanej, *b*/ szlifowanej, *c*/zgruba obrobionej, *d*/ z pierścieniowym karbem p/g.h; *e*/ z naskórkim walcowniczym, *f*/ skorodowanej wodą słodką, *g*/ skorodowanej wodą słoną.



Rys.24.-

Osobnego omówienia wymaga wytrzymałość elementów m-karbowanych.

K a r b y są to nagłe zmiany przekroju. Te nagłe zmiany przekroju są bardzo niebezpieczne, gdyż wywołują w swem pobliżu niejednostajny rozkład naprężeń. Jeżeli np. w płaskowniku obciążonym siłami  $P$  /rys.25 /



Rys.25.

wywiereimy dziurę i zbadamy naprężenia w poszczególnych punktach przekroju osłabionego, to przekonamy się, że rozkład ich będzie niejednostajny; będą one zmieniać się od  $G_1$  do  $G_2$ . Przebieg tych naprężeń na rys.25 wskazuje krzywa; gdy naprężenie obliczone jako iloraz siły przez pole osłabionego przekroju wynosiło 1000

kg/cm<sup>2</sup>, to wymierzone doświadczalnie najmniejsze było 500, największe 2000 kg/cm<sup>2</sup>.

Na wartość naprężeń w przekroju wpływa nie tylko istnienie karbu, ale i jego kształt, co potwierdza rys.26. Z tego względu należy unikać nagłych zmian przekrojów, nadając zmianom przebieg możliwie łagodny, stopniowy /rys.27/.

Wpływ karbów na wytrzymałość trwałą badał Föppl. Według jego badań, jeżeli np. pręt  $A$  /rys.28/ wytrzy-





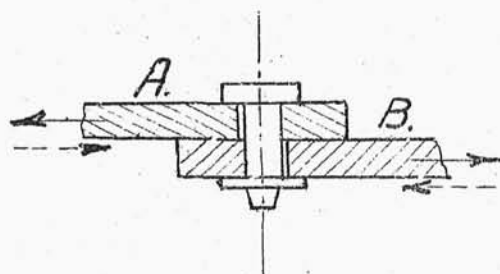
Powyższe nakazuje obniżać naprężenia dopuszczalne w wypadku istnienia karbów.

## R O Z D Z I A Ł   I V .

### ŁĄCZNIKI

Poszczególne części maszyny muszą być łączone, pomiędzy sobą. Łączniki mogą być usuwalne i stałe. Przez pierwsze rozumiemy te, które w razie potrzeby rozłączenia danych części maszynowych, można usunąć bez zniszczenia łącznika lub części złożonych tak, że następnie można te same części połączyć ponownie przy pomocy tego samego łącznika. Do stałych przeciwnie zaliczamy łączniki, których nie można usunąć bez zniszczenia czy to samego łącznika, czy też części łączonych. Przykładem pierwszych jest śruba, drugich - nit.

Prosty konstrukcyjnie łącznik widzimy na rys.29 w złączu przegubowym. Jest to w istocie swej kołek, za-



Rys.29.

łożony w poprzeczne gniazda części łączonych *A* i *B*.

Od sił osiowych chroni go z jednej strony główka, z drugiej zateczka, opierająca się o podkładkę. Zateczkę

wykonywa się zwykle z miękkiej stali o profilu pół-