

IV. ROZDZIAŁ CZWARTY.

NIESPREŻYSTOŚĆ.

A. Część pierwsza.

1. Rodzaje obciążeń. Obciążenia są *tożsamościowe*, gdy przynależne im siły odkształcające są tożsamościowe co do układu i wzrostu. Dwa obciążenia są *odwrotnego znaku*, gdy przynależne im siły odkształcające są *różnozwrótne*. Zatem, dwa obciążenia odwrotnego znaku będą tożsamościowe po zmianie zwrotów wszystkich sił jednego z nich.

Obciążenia mogą być *trwałe* i *zmienne*.

Obciążenie stopniowe zwie się *trwałem*, gdy jego siły odkształcające po osiągnięciu swych skrajnych wielkości, trwają nadal niezmiennie.

Obciążenie *powtarzane* stanowi ciągły szereg tożsamościowych, bezpośrednio po sobie idących stopniowych obciążeń i odciążeń. Obciążenie powtarzane może być z *przestankami* po każdorazowych: obciążeniach, odciążeniach, lub po jednych i drugich.

Obciążenie *przemienne* stanowi ciągły szereg tożsamościowych, bezpośrednio po sobie idących, stopniowych obciążeń odwrotnego znaku. Jego siły rosną stopniowo od zera do swych wielkości skrajnych, poczem, przechodząc przez zero, maleją stopniowo aż do tych samych wielkości skrajnych, wektorowo ujemnych, aby znów wrócić do zera i nadal już bez zmiany powtarzać ten przebieg odnowa. Obciążenie przemienne może być z *przestankami* w nasileniach skrajnych, dodatnich, ujemnych, lub jednych i drugich.

Obciążenia powtarzane lub przemienne noszą wspólne miano obciążeń *zmiennych okresowo*, gdy tożsamościowe zmiany, tym obciążeniom właściwe, stale zachodzą w tych samych odstępach czasu.

W odróżnieniu od powyższych obciążeń prawidłowo zmiennych, zwykle obciążenie *zmiennie* stanowi szereg dowolnych obciążeń i odciążeń, bezpośrednio po sobie idących, lub poprzedzanych przestankami, stałej lub zmiennej trwałości.

2. Obszar niesprężystości. Zrównoważony układ sił odkształcających, nader powoli rosnących od swych początkowych zerowych wielkości, daje ciągły szereg kolejnych obciążeń statycznych. Zerowym wielkościom sił odkształcających przynależy pierwotny stan ciała nieobciążonego; — nieznacznym obciążeniom — odkształcenia początkowe.

Początkowe odkształcenia *niesprężyste* stanowią cechę wyróżniającą tworzywa *podatnego* (plastycznego), nie dającego sprzeciwu przy odkształcaniu (głina...).

Początkowe odkształcenia *mieszane* cechują tworzywo *niesprężyste* (żeliwo...). Początkowe odkształcenia *sprężyste*, właściwe tworzywom *sprężystym*, zachodzą w obszarze sprężystości. Poza tym obszarem tworzywo sprężyste staje się *niesprężystem*. Zatem, poza granicą sprężystości, leży *początkowy obszar niesprężystości* tworzywa.

W dalszym *końcowym obszarze niesprężystości* tworzywa wzrasta się szybko wzrost niesprężystych części odkształceń mieszanych. Przejście od początkowego do końcowego obszaru niesprężystości tworzywa może być bezpośrednie, lub pośrednie. Przejście bezpośrednie może być ciągle, bez wyraźnej granicy, lub też — zaznaczać się ostrym — *punktem zwrotu*.

3. Granica podatności. Przy przejściu pośrednim, początkowy obszar niesprężystości kończy się z nagłą na *granicy podatności* tworzywa, stanowiącej zarazem początek pośredniego obszaru *podatności*.

Pod obciążeniem, tej granicy przynależnym, niesprężysta część odkształcenia mieszanego poczyną wzrastać gwałtownie i zgoła niewspółmiernie z poprzednim wzrostem odkształceń. Ten nagły wzrost przeważnie trwa nawet i po spadku obciążenia, niekiedy dość znacznym. W obszarze pośrednim tworzywo traci możność przeciwdziałania siłom odkształcającym, staje się podatnym, lecz nie na długo, ten bowiem obszar przejściowy jest stosunkowo niezbyt rozciągly: po właściwym mu skrajnym odkształceniu poczyną się końcowy obszar niesprężystości two-

rzywa. Na gładzonej (polerowanej) powierzchni ciała, obciążonego do granicy podatności, pojawiają się dwa prostopadłe układy tak zwanych *linij podatności* i trwają przez cały obszar podatności tworzywa, poczem giną bez śladu.

4. Obciążenie dopuszczalne. Po przekroczeniu punktu zwrotnego, lub granicy podatności tworzywa, odkształcenia, dość znaczne, wyraźnie zmieniają pierwotny kształt ciała obciążonego; *zniekształcającem* przeto zwie się obciążenie, tym granicznym punktem przynależne.

W końcowym obszarze niesprężystości tworzywa, zniekształcenie ciała może wzrastać wraz z obciążeniem nieograniczenie, o ile nie prowadzi do pęknięć miejscowych, lub zniszczenia ciała jako całości, przy skrajnem obciążeniu *niszczącym*.

Obciążenia *dopuszczalne* winny być niewątpliwie niższe od zniekształcającego i niszczącego, tem niższe, im większa *pewność* wymaganej niezmienności kształtu ciała obciążonego ma być zachowana.

Obciążenia trwałe, lub zmienne, nieprzekraczające pierwotnych granic sprężystości tworzywa, nie pozostawiają po sobie żadnych śladów działania; zazwyczaj przeto praktycznie dopuszczalne obciążenia zawarte są w tych granicach. Obciążeniom dopuszczalnym przynależą układy tak zwanych naprężeń dopuszczalnych.

5. Zmienność granic. Pierwotna granica sprężystości tworzywa, pojawiająca się przy statycznym obciążeniu, nie jest bezwzględnie stała. Według spostrzeżeń Bauschinger'a można ją podwyższyć, jednak tylko do pewnego poziomu, przez obciążanie powtarzane, wkraczające w początkowy obszar niesprężystości tworzywa. To podwyższenie kojarzy się przeważnie z obniżeniem granicy sprężystości odwrotnego znaku, niekiedy dość znacznem, bo dochodzącem aż do zupełnego jej zaniku. W ten sposób obniżoną granicę można znów podnieść, lecz tylko do pewnego poziomu, nieraz niższego od pierwotnego, przez obciążanie przemienne, stopniowo rosnące.

Pierwotna granica podatności tworzywa, pojawiająca się przy obciążeniu statycznym, nie jest bezwzględnie stała. Jednorazowe stopniowe obciążenie, wkraczające w końcowy obszar niesprężystości tworzywa, oraz następne stopniowe odciążenie, — powodują zupełny jej zanik — doraźny. Ponowne stopniowe obciążenie ujawnia już inną granicę sprężystości, a za nią — nowy obszar niesprężystości początkowy, oddzielony od końcowego wyraźnym punktem zwrotu. Ten punkt odpowiada owemu

pierwotnemu, jednorazowemu obciążeniu. Po kąpieli ciepłej, lub dłuższym wypoczynku może się znów pojawić granica podatności, wyższa od pierwotnej. Za nią — obszar podatności, znacznie jednak szczuplejszy od poprzedniego.

6. Wytrzymałość i odkształcalność. Granice sprężystości i podatności, łącznie z obciążeniem niszczącym stanowią o stopniu przeciwdziałania określonym układom sił odkształcających, czyli o *wytrzymałości* tworzywa na działanie obciążenia zgóry określonego. Przy bezpośrednim porównywaniu, — o większej wytrzymałości wyrokuje wyższe obciążenie niszczące tego samego znaku i tego samego układu sił odkształcających. Przy tożsamościowych obciążeniach niszczących — wyższa granica podatności, wreszcie — przy tożsamościowych obciążeniach niszczących i jednakowych granicach podatności — wyższa granica sprężystości.

Drugą podstawową cechą stanowi *odkształcalność* tworzywa pod obciążeniem statycznym. Jej stopień zależy od względnej wielkości odkształceń przy obciążeniach tożsamościowych. Dalej idą pochodne cechy względne: *twardość* i *miętkość* tworzywa. Te dwie cechy są wprost odwrotne: przy porównywaniu bezpośrednim tworzywo o większej wytrzymałości i mniejszej odkształcalności — ma wyższy stopień twardości, naodwrot: niższy miętkości.

Jakiegokolwiek zmiany własności podstawowych lub pochodnych należy oceniać w stosunku do stanu pierwotnego, lub — ściśle określonego stanu *wzorcowego* tworzywa. Wszelka obróbka, a zwłaszcza cieplna, wywołuje zmianę stanu tworzywa, niekiedy dość znaczną.

7. Uporność odkształceń. Dwa równe obciążenia stopniowe są tożsamościowe co do układu sił odkształcających, różne — co do szybkości ich wzrostu. Układ jednoczesnych wielkości wszystkich sił odkształcających obciążenia stopniowego zwie się *wielkością* tego obciążenia. Zatem, kolejne wielkości dwóch równych obciążeń stopniowych są tożsamościowe, inaczej jednak uszeregowane w czasie.

Nazwijmy *statycznymi* odkształcenia, przynależne kolejnym wielkościom obciążenia statycznego: tym samym wielkościom obciążenia stopniowego odpowiadają odkształcenia mniejsze, i tem niższe, im wyższa szybkość wzrostu jego sił odkształcających. Różnice te jednak giną po dość krótkich przestankach, czyli chwilowych przerwach wzrostu sił odkształcających na

odpowiedniej wielkości obciążenia: odkształcenia poniekąd opóźniają się w stosunku do odkształceń statycznych.

To zjawisko, właściwe wszystkim tworzywom, zwie się *upornością* (*histerezą*) odkształceń. Uporność jest tem większa, im szybszy wzrost obciążenia stopniowego. Przy obciążeniach stopniowych zmiennych z upornością kojarzy się strata energii odkształcającej, zwana pracą uporności. Łatwo to dostrzec, zważywszy, że przy obciążaniu i odciażaniu uporność odkształceń zachodzi w kierunkach odwrotnych, tworząc obieg nieodwracalny.

8. Wpływ czasu. Przy obciążeniu trwałem, niżej granicy sprężystości, odkształcenia, po osiągnięciu wielkości odpowiedniego odkształcenia statycznego, nadal już są niezmiennie w czasie. Wyraźnie natomiast zaznacza się wpływ czasu na odkształcenia mieszane.

Po obciążeniu stopniowem poza granicę sprężystości, odkształcenia mieszane, temu obciążeniu właściwe, wzrastają w sposób ciągły przy niezmiennym układzie sił odkształcających. Ten wzrost, z biegiem czasu powolniejszy, trwa krócej, lub dłużej, niekiedy miesiące i lata. Dotyczy to głównie części niesprężystych odkształceń mieszanych, sprężyste bowiem ich części, wzrastają tylko bardzo nieznacznie.

Naodwrot, po stopniowem odciażeniu pozostaje początkowa część niesprężysta odkształcenia mieszanego, również nietrwała, bo malejąca z biegiem czasu, coraz to zresztą powolniej, aż do swej ostatecznej, różnej od zera wielkości.

Zatem przy obciążeniach długotrwałych, tworzywo ma większą odkształcalność, a nawet, niekiedy — i większy stopień miękkości: może ulec zniszczeniu przy obciążeniu ponad granicę sprężystości, niższem od niszczącego obciążenia stopniowego, lecz długotrwałem. To obniżenie wytrzymałości zwie się *odwartościowaniem* tworzywa pod obciążeniem długotrwałem, krócej: *zmęczeniem statycznym*.

9. Wpływ zmienności obciążenia. Przy obciążeniach okresowo zmiennych, a więc powtarzanych, lub przemiennych, praca uporności narasta wraz z ilością zmian okresowych obciążenia. W obszarze jednego okresu praca ta zależy: od temperatury tworzywa, od rozwartości granic zmienności sił odkształcających, od położenia tych granic względem odpowiednich granic sprężystości, wreszcie — od szybkości owej zmienności obciążenia. Praca uporności, znikoma w obszarze sprężystości,

staje się tem wyraźniejszą w działaniu, im dalej poza granice sprężystości wykroczy obciążenie okresowo zmienne.

Część pracy uporności przemienia się w ciepło, reszta — sprawia odwartościowanie tworzywa pod obciążeniem okresowo zmiennem, zwane krótko: *zmęczeniem*. Zmęczenie obniża wytrzymałość tworzywa: niszczące obciążenie okresowo zmienne jest znacznie niższe od niszczącego obciążenia stopniowego, jednorazowego.

Zatem, przy tej samej *pewności*, *dopuszczalne* obciążenia okresowo zmienne winny być odpowiednio niższe od dopuszczalnych obciążeń trwałych. Dotyczy to zarówno obciążeń: powtarzanego i przemiennego.

B. Część druga.

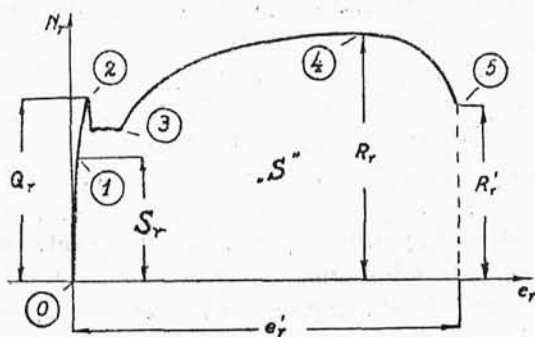
1. **Próba na rozciąganie.** Swoisty przyrząd maszyny probierczej kreśli przy próbie na rozciąganie — wykres tworzywa. Podstawowa oś wykresu daje przyrosty ΔL pierwotnej pomiarowej długości L próbki; oś prostopadła — siły osiowe O_x . W zmienionej skali pierwsza oś daje wydłużenia jednostkowe:

$$e_r = \frac{\Delta L}{L}$$

podłużne, druga oś — naprężenia rozciągające:

$$N_r = \frac{O_x}{F}$$

przynależne stałemu pierwotnemu przekrojowi F środkowej pomiarowej części próbki. Wydłużeniom e_r towarzyszą m razy mniejsze ujemne wydłużenia poprzeczne e_{rp} — jednokowe we wszystkich



Rys. 26.

kierunkach, prostopadłych do podłużnej osi próbki. Dla próbki o stałym przekroju kołowym przyrostom ΔL dodatnim odpowiadają ujemne przyrosty ΔD pierwotnej średnicy D , a przeto:

$$e_{rp} = \frac{\Delta D}{D} = -\frac{e_r}{m}$$

Linia wykresu (Rys. 26) stali miękkiej w *obszarze sprężystości* (0—1) tworzywa pokrywa się nieomal z osią naprężeń. W tym obszarze, poniżej punktu (1), wydłużenia podłużne i poprzeczne są jednostajne na całej długości L i *sprężyste*. To znaczy, że niesprężyste części wydłużeń e_r są równe zeru, lub znikome — nie sięgające 0,00001. Stosunek m jest stały i równy odwrotności liczby Poisson'a.

W skrajnym punkcie (1), naprężeniu S_r , zwanemu *granica sprężystości* tworzywa — przynależy wydłużenie e_r o niesprężystej części

$$e_{rn} = 0,00001$$

Linia wykresu (0—1) jest *prostą*, gdy *granica proporcjonalności* P_r utożsamia się z granicą sprężystości S_r , lub leży ponad nią; natomiast, gdy $P_r < S_r$, obszar sprężystości rozpada się na dwa obszary wtórne: wydłużeń sprężystych proporcjonalnych i nieproporcjonalnych do naprężeń rozciągających N_r . W tym przypadku linia (0—1) jest *prostą* aż do punktu, przynależnego granicy P_r , poczem zmienia się w styczny łuk krzywej, przechodzącej przez skrajny punkt (1).

Poza tym punktem leży *początkowy obszar niesprężystości* (1—2) tworzywa. Wydłużenia podłużne i poprzeczne tego obszaru są jednostajne na całej długości L i *mieszane*. Stosunek m zmienny, maleje stopniowo. Niesprężyste części e_{rn} wydłużeń e_r rosną od 0,00001 wraz z N_r w ogólnym przypadku nieproporcjonalnie. Sprężyste części e_{rs} rosną proporcjonalnie do N_r , gdy P_r jest wyższe od S_r , to jest gdy obszar proporcjonalności wkracza w obszar niesprężystości tworzywa.

W skrajnym punkcie (2), przy naprężeniu Q_r , zwanem *granica podatności* tworzywa część niesprężysta e_{rn} wydłużenia mieszanego e_r , dotychczas znikomego, poczyną rosnąć gwałtownie. Ten niewspółmierny wzrost, zapoczątkowany przy Q_r trwa dalej, przy niezmiennem, a nawet znacznie niższem naprężeniu, aż do punktu (3), skrajnego punktu *obszaru podatności* tworzywa (2—3). W tym obszarze linia wykresu, po wyjściu z (2) bieży więc równolegle do podstawy, lub zagnęła cofa się i łamie w szereg kolejnych wahnięć, jak na rysunku.

Tworzywo, rozciągnięte poza granicę podatności łatwiej rdzewieje, mocniej podlega żrącemu działaniu kwasów. Po przekroczeniu Q_r na gładzonej powierzchni próbki występują tak zwane *linje Hartmann'a* w postaci dwóch przecinających się układów, pochylonych pod kątem *ca* 45° ku osi próbki. Linje

te widoczne są tylko w okresie podatności, poczem znikają bez śladu.

W punkcie (3) poczyną się *końcowy obszar niesprężystości* (3—4—5) tworzywa, obszar wydłużeń mieszanych, o znacznych częściach niesprężystych. Stosunek m jest tu w przybliżeniu stały, nieco większy od dwóch. Wydłużenia e_r , e_{rp} są prawie jednostajne na całej długości pomiarowej L , jednak tylko w obszarze *wzrostu* (3—4) naprężeń N_r , aż do najwyższego — w punkcie (4).

Przy tem naprężeniu R_r , zwanem *wytrzymałością* tworzywa na rozciąganie, poczyną tworzyć się wyraźne zwężenie, przeważnie w jednym, rzadziej — w kilku miejscach środkowej pomiarowej części próbki. Przekrój poprzeczny w jednym z nich maleje nader szybko, przyczem zazwyczaj zmniejsza się i obciążenie; wreszcie, pod obciążeniem końcowem O_x' zachodzi *pęknięcie* próbki w najwęższym przekroju F' — tak zwanym *przekroju zerwania*. Końcowe naprężenie wykresu:

$$R_r' = \frac{O_x'}{F}$$

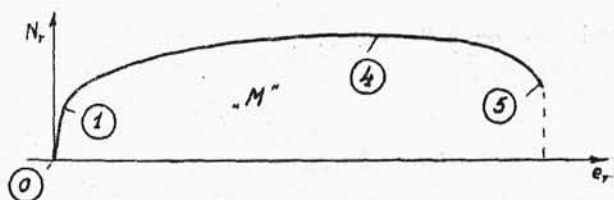
jest przeto zazwyczaj znacznie niższe od skrajnego R_r .

Istotne naprężenie przekroju zerwania:

$$R_{rm} = \frac{O_x'}{F'}$$

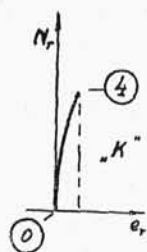
nazwiemy *naprężeniem zrywającym*.

Wykres S , wyżej opisany, przynależy stali miękkiej. Miedź ma nieco inny wykres M , bez obszaru podatności (Rys. 27). Obszar sprężystości (0—1) na granicy sprężystości (1) przechodzi tu bezpośrednio w obszar niesprężystości (1—4—5), kończący się zerwaniem próbki w (5). Najwyższe naprężenie rozciągające w punkcie (4) zowie się *wytrzymałością* R_r na rozciąganie.



Rys. 27.

Najprostszy (Rys. 28) wykres K dają tworzywa niejednolite. Wykres ten zagną urywa się w (4) na najwyższym naprężeniu R_r — *wytrzymałości* tworzywa na rozciąganie.



Rys. 28.

Próbka o pierwotnym przekroju kołowym ma nader ciekawy wygląd w przekroju zerwania. Pośrodku widać ziarnistą powierzchnię, niekiedy płaską, czasami pooraną w bruzdy. Po bokach wznoszą się strzępy w postaci ostrych sopli lub krążka kołnierзовego, częściowo poszarpanego. Najczęściej połowa krążka pozostaje na jednej części próbki zerwanej — druga połowa na drugiej. Rzadziej — krążek w całości pozostaje na jednej części; nader rzadko — odpada, jako pierścień niezależny.

2. Cechy wytrzymałościowe. Pierwotną długość pomiarową L próbki o stałym przekroju pierwotnym F , dzielą zazwyczaj na p podziałek. Po dokładnem zetknięciu powierzchni pęknięcia i ustawieniu próbki poziomem na podstawkach, należy zmierzyć najmniejszy przekrój w zwężeniu, czyli — przekrój zerwania F' , a nadto — długość L' kolejnych p podziałek, symetrycznych względem przekroju zerwania.

Pomiar L' , bezpośredni przy pęknięciu próbki mniej więcej środkowym, — przy pozaśrodkowym — sprowadza się do dwóch pomiarów: długości L'' szeregu k kolejnych podziałek, symetrycznych względem przekroju zerwania, oraz — długości L''' — dalszych kolejnych podziałek w liczbie $\frac{1}{2}(p-k)$.

Stąd niewątpliwie:

$$L' = L'' + 2L'''$$

Odsetkowy stosunek:

$$A = 100 \frac{L' - L}{L} \%$$

zwie się *przydłużeniem*,

$$C = 100 \frac{F - F'}{F} \%$$

— *przewężeniem*. Nadto:

$$K = \frac{C}{A}$$

można nazwać *miarą stanu* tworzywa.

Próba na rozciąganie tworzywa gromady wykresowej S daje właściwe mu *cechy wytrzymałościowe*:

$$E, S_r, Q_r, R_r, R_{rm}, A, C, K$$

Dla tworzyw gromad wykresowych M, K nieistniejącą granicę podatności określają niekiedy, jako naprężenie $Q_{0,2}$, przynależne wydłużeniu mieszanemu e_r o niesprężystej części:

$$e_{rn} = 0,002$$

aczkolwiek sztuczność tego określenia nasuwa cały szereg wątpliwości.

3. Próba na ściskanie. Siły osiowe O_x , ściskające próbkę należy znakować ujemnie w odróżnieniu od rozciągających; — ujemne przeto są i naprężenia ściskające:

$$N_c = \frac{O_x}{F}$$

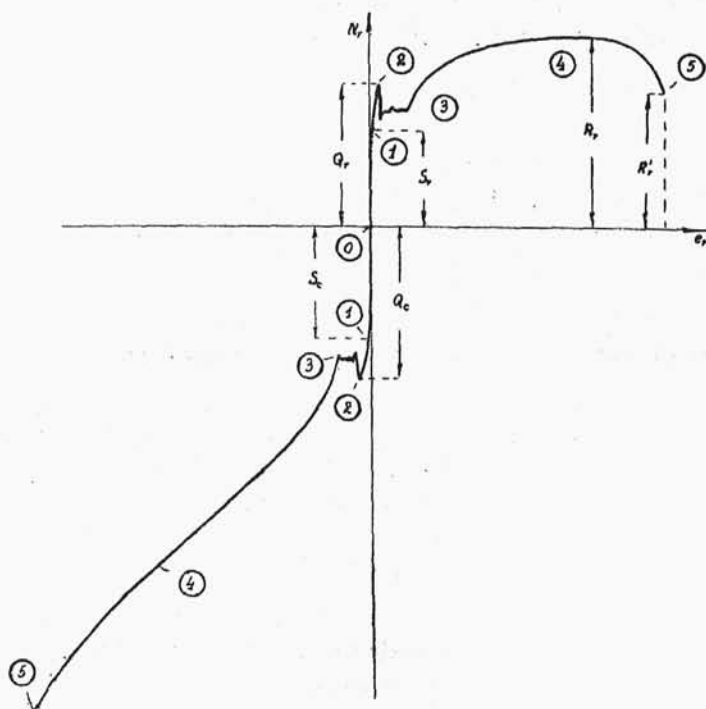
przynależne pierwotnemu stałemu przekrojowi F próbki. Przy odkształceniu, jej pomiarowa długość L skraca się o ΔL , stąd wydłużenie ujemne:

$$e_c = \frac{\Delta L}{L}$$

podłużne. Towarzyszą mu dodatnie, m razy mniejsze wydłużenia e_{cp} — poprzeczne, jednakowe we wszystkich kierunkach, prostopadłych do osi obciążeń O_x . Dla próbki o stałym przekroju kołowym, przyrostom ΔL ujemnym odpowiadają przyrosty ΔD pierwotnej średnicy D , dodatnie, a przeto:

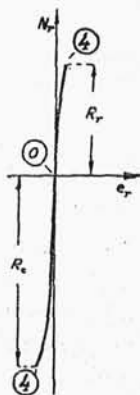
$$e_{cp} = \frac{\Delta D}{D} = - \frac{e_c}{m}$$

Próby stali miękkiej na ściskanie i rozciąganie — mają początkowy przebieg tożsamościowy co do układu obszarów, wydłużeń i naprężeń. *Granice sprężystości* S_c , *proporcjonalności* P_c i *podatności* Q_c na ściskanie są jednak nieco wyższe od S_r, P_r, Q_r dla tego samego tworzywa. Różnica istotna występuje dopiero w końcowym obszarze niesprężystości. Poza punktem (3) linja wykresu, po przejściu przez punkt przegięcia (4), staje się wypukłą względem osi wydłużeń i oddala się od tej osi nieograniczenie (Rys. 29). To samo zaznacza się i na wykresie



Rys. 29.

sie miedzi, natomiast wykres K jest tożsamościowy przy obu próbach (Rys. 30). Jego łuk (0—4) urywa się w końcowym punkcie (4) przy naprężeniu najwyższem R_c , niszczącym, zwanem *wytrzymałością* tworzywa na ściskanie. To naprężenie ostateczne przynależy więc tylko tworzywom gromady wykresowej K ; dla gromad S, M wytrzymałość na ściskanie jest nieskończenie wielka.



Rys. 30.

Wymaga to wyjaśnienia. Tworzywa gromad wykresowych S i M są ściśliwe: po wkroczeniu w obszar niesprężystości, przekrój poprzeczny próbki rośnie coraz szybciej — stąd — konieczność odpowiedniego powiększania sił osiowych przy dalszem rozgniataniu próbki, które niema granic: próbka o przekroju kołowym staje się krążkiem, krążek — płytką kołową, coraz cieńszą. Niekiedy na bocznej powierzchni powstają przy tem pęknięcia w postaci szczelin, nie zmienia to jednak ogólnego przebiegu spłaszczania próbki.

Próbki tworzyw gromady wykresowej K rozpadają się na boki przy naprężeniu niszczącym R_c . Z próbki sześcienniej, najczęściej używanej, ostają się przytem dwa ostrosłupy ścięte połączone wierzchołkowo, o podstawach równoległych, przylegających do płyt maszyny probierczej. Reszta — po bokach — odpada.

Próba na ściskanie tworzywa gromady wykresowej S daje właściwe mu cechy wytrzymałościowe E_c, S_c, Q_c . Dla tworzyw gromady wykresowej M daje ona tylko E_c i S_c , dla gromady K — w najogólniejszym wypadku E_c, S_c i R_c . Nieistniejącą granicę podatności można określić, jako naprężenie $Q_{0,2c}$, przynależne ujemnemu wydłużeniu mieszanemu e_c o niesprężystej części

$$e_{cn} = 0,002$$

aczkolwiek i tu również sztuczność tego określenia nasuwa pewne wątpliwości.

4. Naprężenia dopuszczalne. Naprężenia dopuszczalne: k_r — rozciągające i k_c — ściskające określano dawniej w stosunku do wytrzymałości wzorami:

$$k_r = \frac{R_r}{u_r} \quad k_c = \frac{R_c}{u_c}$$

gdzie u_r, u_c oznaczało odpowiedni stopień pewności.

Uzależniano go od rodzaju tworzywa i obciążenia. Tak, np. Przerwa-Tetmajer rozróżniał: obciążenia trwałe (1), zmienne bez uderzeń (2), zmienne z lekkimi wstrząśnieniami (3) i zmienne z silnymi wstrząśnieniami (4). Według Przerwy-Tetmajera tym obciążeniom przynależą następujące:

STOPNIE PEWNOŚCI.

PEWNOŚĆ:	u_r				u_c			
OBCIĄŻENIE:	1	2	3	4	1	2	3	4
Stal	3	4	5	6	3	4	5	6
Drewno	6	7	8	10	4	5	6	7
Żeliwo	—	—	—	—	6	8	10	—
Kamień	—	—	—	—	15	20	25	30

Obecnie przy obliczaniu wytrzymałościowym części maszyn zazwyczaj rozróżniają trzy podstawowe obciążenia: trwałe (I), powtarzane (II) i przemienne (III).

Odpowiednie naprężenia dopuszczalne obierano, według Bacha w stosunku:

$$3 : 2 : 1$$

Według poglądów najnowszych, opartych na wynikach badań Wöhler'a i Bauschinger'a, naprężenie dopuszczalne, przynależne obciążeniu trwałemu, stanowić ma połowę odpowiedniej granicy sprężystości tworzywa, a przeto dla prętów rozciąganych i ścisanych:

$$k_r = \frac{1}{2} S_r \quad k_c = \frac{1}{2} S_c$$

Naprężenie dopuszczalne k_{III} przy obciążeniu przemiennem winno być dwukrotnie mniejsze, a więc — równe ćwierci odpowiedniej granicy sprężystości tworzywa. Nadto — stosunek naprężenia dopuszczalnego k_{II} , przy obciążeniu powtarzanem, do k_{III} wynosić ma:

$$1 : 1,2$$

Przy obliczaniu wytrzymałościowym części budowli należy obierać naprężenia dopuszczalne, biorąc pod uwagę obciążenie trwałe wagą własną części — oraz — obciążenie zmienne, zależne od przewidywanych czynników zewnętrznych, działających zmiennie, z przerwami, stopniowo lub nagle. Zazwyczaj odpowiednie urzędy państwowe ujmują to przepisowo, polecając użycie tych lub owych wzorów, przeważnie opartych na wynikach doświadczalnych.

Właściwy wybór naprężeń dopuszczalnych należy do ośrodków wzorcujących, opiera się bowiem na wzorcowaniu tworzyw.

Przepisowe ustalanie naprężeń dopuszczalnych jest niewątpliwie wskazane: zbytnia dowolność wyboru zawsze prowadzi do współzawodnictwa, szkodliwego nie tylko dla samych odbiorców.

C. Część trzecia.

1. **Cechy wytrzymałościowe.** Próby na rozciąganie i ściskanie dają wytyczne naprężenia S , Q , R , przydłużenie A i przewężenie C . Te podstawowe cechy wytrzymałościowe zależą od różnorodnych czynników, w pierwszym rzędzie od należytego wykonania samej próby, oraz — użycia próbki właściwego kształtu.

Przedewszystkiem więc maszyna probiercza winna dawać obciążenie stopniowe, a przytem ściśle osiowe, co wymaga odpowiedniej budowy uchwytów. Uchwyty rozciągające mają kształt szerek z otworami bocznymi do wsuwania wkładów oporowych, lub zaciskowych. Wkład oporowy, zbudowany w kształcie przegubu kulistego, osiowo obejmuje główkę próbki. Wkład zaciskowy, wzorowany na ustroju klinowym, zwierza się na uchwytowej części próbki samoczynnie. Daje nieco gorszy rozkład naprężeń przy znaczniejszej szerokości próbki płaskiej. Najlepsze wyniki dają próbki o przekroju kołowym, średnicy D , lub kwadratowym F , średnicy zastępczej:

$$D = 1,13 \sqrt{F}$$

W obu przypadkach przekrój F jest stały na całej pierwotnej długości pomiarowej L środkowej części próbki. Zmienność stosunku

$$n = L : D$$

nie wpływa na przewężenie i naprężenia wytyczne. W znacznym stopniu zależy odeń przydłużenie. Dla próbek jednakowej średnicy D , lecz różnych długości pomiarowych L , prawo zmienności przydłużeń A z wystarczającą ścisłością może być wyrażone wzorem:

$$A = a + \frac{b}{\sqrt{L}}$$

o współczynnikach a , b — stałych, zależnych od tworzywa. Stąd bezpośrednio dla przydłużeń A , A' , A'' , odpowiednio przynależnym: n , n' , n'' , otrzymamy:

$$(A - A') \left(\frac{1}{\sqrt{n'}} - \frac{1}{\sqrt{n''}} \right) = (A' - A'') \left(\frac{1}{\sqrt{n}} - \frac{1}{\sqrt{n'}} \right)$$

Zatem polski układ:

$$n' = 10 \quad n'' = 4$$

da dla próbki francuskiej:

$$A_{7,25} = 0,7 A_{10} + 0,3 A_4$$

oraz niemieckiej:

$$A_5 = 0,3 A_{10} + 0,7 A_4$$

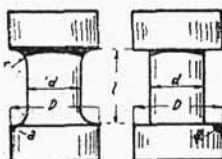
Naodwrót, układ niemiecki:

$$n' = 10 \quad n'' = 5$$

daje:

$$A_4 = 1,4 A_5 - 0,4 A_{10}$$

Przejdzie od pomiarowej, środkowej części próbki do symetrycznych jej skrajnych części uchwytowych — winno być stopniowe, ciągle, lub z niewielkimi uskokami. Znaczniejsze nagłe zmiany przekroju dają niejednostajny układ naprężeń i odkształceń.



Rys. 31.

Łatwo to dostrzec przy rozciąganiu próbek z podtoczeniami (Rys. 31) ostremi, lub zaokrąglonemi. Przy obciążeniu osiowym rozciągającym, pierścienie a nienapężone, słabo odkształcające się, hamują wydłużenia poprzeczne w sąsiednich przekrojach próbki. Pokonanie tego oporu wymaga zwiększenia obciążeń osiowych, zupełnie wyraźnego dla tworzyw ciągliwych, gromady wykresowej S lub M : próbki z podtoczeniami dają wyższe naprężenia wytyczne. To podwyższenie poczyna występować przy długości podtoczenia

$$l = 3d$$

i dalej znacznie wzrasta, gdy l maleje. Jest ono nieco wyższe przy podtoczeniu z zaokrągleniami, które ów wpływ stężający pierścieni a przenoszą na dalsze przekroje.

Dla tworzyw gromady wykresowej K , mało ciągliwych, wpływ podtoczenia na wytyczne naprężenia praktycznie jest bez znaczenia, można więc dla tych tworzyw stosować próbki krótkie, o stosunku:

$$n = L : D = 2$$

Uchwyty ściskające mają kształt płyt równoległych, cisnących na czołowe ścianki próbki. Osiowość obciążenia zależy tu od ustawienia próbki pomiędzy płytami, a także — i od ściślej równoległości tych ścianek. Ich międzypłytowa odległość stanowi zarazem pomiarową długość L próbki. Na całej długości L przekrój poprzeczny F jest stały.

Najczęściej używane są próbki sześciennie, aczkolwiek niezbyt jednostajny nacisk płyt na ich ścianki czołowe nie daje zgoła pewności co do jednostajności rozkładu naprężeń w przekrojach poprzecznych. Nadto próbki te dają zbyt wysokie naprężenia wytyczne przy próbie na ściskanie, co, niewątpliwie przypisać należy tarcia ścianek czołowych o płyty uchwytowe, hamującemu wydłużenia poprzeczne w przekrojach sąsiednich. Stąd — oporność odkształceń, wymagająca zwiększenia osiowego obciążenia. Ten stępujący wpływ tarcia o płyty daleko sięga wgląd przy stosunkowo niewielkiej wysokości próbki sześciennej.

Najlepsze wyniki daje próbka o stałym przekroju kołowym średnicy D . Jej całkowita długość wynosi $6D$, przy pomiarowej długości wzorcowej

$$L = 4D$$

2. Wpływ rozciągnięcia. Z pręta stali węglistej miękkiej wytoczono siedm próbek średnicy D_0 i pomiarowej długości

$$L_0 = 10D_0$$

Próbka Nr. 0, użyta do próby na rozciąganie, dała wykres (1), wytyczne naprężenia: Q_r — *granice podatności*, R_r — *wytrzymałość* obie w stosunku do przekroju pierwotnego:

$$F_0 = \frac{1}{4} \pi D_0^2$$

przydłużenie A, przewężenie C i miarę stanu

$$K = \frac{C}{A}$$

Pozostałe próbki Nr. 1÷6, rozciągnięte w stopniu niejednakowym poza Q_r , dały szereg próbek właściwych, o *rozciągnięciu pierwotnem*, stopniowanem według przyrostów niesprężystych

$$L_1 - L_0$$

Odkształconej długości L_1 każdej z tych próbek przynależy skrajna siła osiowa O_r końcowego obciążenia owego pierwotnego rozciągnięcia próbki. Ta siła daje skrajne naprężenie

$$N_r = \frac{O_r}{F_0}$$

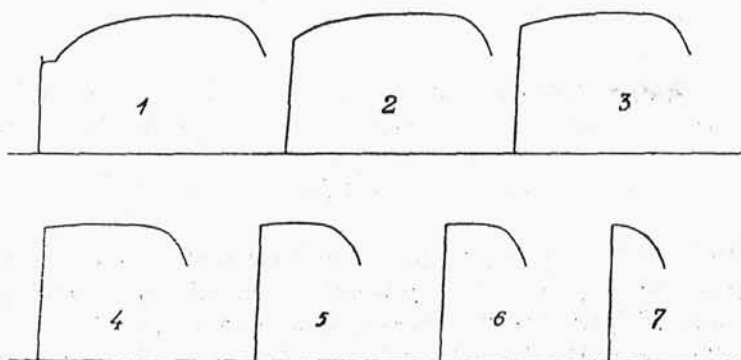
przynależne wydłużeniu niesprężystemu bezwzględnemu:

$$L_1 - L_0$$

Po rozciągnięciu pierwotnym zmierzono średnicę D każdej z próbek i naznaczono jej nową długość pomiarową:

$$L = 10 D$$

zupełnie niezależną od pierwotnej długości L_0 odkształconej do L_1 . Następnie, po mniej lub więcej długotrwałym odpoczynku, wszystkie te próbki użyto do prób na rozciąganie i otrzymano wykresy (Rys. 32) z wyraźnymi *punktami zwrotu*, przynależnymi



Rys. 32.

skrajnym siłom osiowym O_r pierwotnego rozciągnięcia każdej z próbek. Pozatem próby te dały siły osiowe: O_n — niszczące najwyższe i — O_k — końcowe, zrywające próbkę.

Z pomiarów bezpośrednich każdej próbki zerwanej otrzymano średnice D' najmniejszego przekroju zwężenia, a nadto odkształcone długości L_2 i L' odpowiednich pierwotnych długości pomiarowych L_0 i L . Stąd trzy przekroje wytyczne tej samej próbki: pierwotny przekrój F_0 średnicy D_0 próbki nieodkształconej, początkowy przekrój F średnicy D próbki pierwotnie rozciągniętej — i przekrój zerwania F'' średnicy D' .

Przy rozciągnięciu pierwotnem każda próbka dała granicę podatności Q_r i skrajne naprężenie N_r — oba te naprężenia wytyczne w stosunku do pierwotnego przekroju F_0 ; przy próbie na rozciąganie:

a. wrzekomą granicę podatności, a właściwie — istotny *punkt zwrotu*, czyli naprężenie:

$$Q_r' = \frac{O_r}{F}$$

niewątpliwie wyższe od N_r , a więc i od Q_r ,

b. wytrzymałości:

$$R_r = \frac{O_n}{F_0} \quad R_r' = \frac{O_n}{F}$$

obliczone w stosunku do przekrojów: pierwotnego F_0 i początkowego F próbki,

c. naprężenie zrywające:

$$R_{rm} = \frac{O_k}{F'}$$

czyli istotną wytrzymałość tworzywa,

d. przydłużenia:

$$A = 100 \left(\frac{L_2}{L_0} - 1 \right) \% \quad A' = 100 \left(\frac{L'}{L} - 1 \right) \%$$

e. przewężenia:

$$C = 100 \left[1 - \left(\frac{D'}{D_0} \right)^2 \right] \% \quad C' = 100 \left[1 - \left(\frac{D'}{D} \right)^2 \right] \%$$

f. stopień rozciągnięcia:

$$a = \frac{L_1 - L_0}{L_2 - L_0}$$

g. dwie miary stanu:

$$K = \frac{C}{A} \quad K' = \frac{C'}{A'}$$

tworzywa pierwotnego i rozciągniętego (zmęczonego).

Wyniki prób podane są w zestawieniach. Pierwsze zawiera naprężenia wytyczne w kg/cm^2 :

Nr.	a	Q_r	Q_r'	R_r	R_r'	R_{rm}
0	0,000	3009	—	4738	—	10844
1	0,129	2967	3969	4742	4931	11026
2	0,237	3328	4591	4761	5076	11026
3	0,360	3393	5157	4757	5322	10930
4	0,561	3001	5394	4756	5505	11135
5	0,651	3386	5772	4741	5788	11223
6	0,748	2943	5816	4798	5879	10627
Średnia:		3147	—	4756	—	10973
+ Δ %		7,8	—	0,9	—	2,3
— Δ %		6,5	—	0,4	—	3,2

Nr.	a	A %	A' %	C %	C' %	K	K'
0	0,000	31,0	—	70,1	—	2,3	—
1	0,129	31,9	27,3	70,8	69,6	2,2	2,5
2	0,237	30,1	22,5	70,7	68,8	2,3	3,0
3	0,360	33,4	19,3	70,1	66,6	2,1	3,5
4	0,521	30,4	14,1	70,8	66,2	2,3	4,7
5	0,651	34,2	11,2	70,7	64,3	2,1	5,7
6	0,748	31,1	8,5	69,6	62,8	2,2	7,4
Średnia:		31,7	—	70,4	—	2,2	—
+ Δ %		7,9	—	0,6	—	4,5	—
— Δ %		5,0	—	1,1	—	4,5	—

Te same wyniki można otrzymać inną drogą. Ów pręt miękkiej stali węglistej—należy pociąć na kawałki Nr. 0, 1, ... 6.

Z pierwszego Nr. 0 wytoczyć próbkę wzorcową średnicy D , pozostałym zaś Nr. 1—6 — nadać pierwotne rozciągnięcia, stopniowane według skrajnych naprężeń O_r i powytaczać z nich próbki wzorcowe tej samej średnicy, poczem — wszystkie siedem próbek tworzywa w różnym stopniu rozciągniętego — poddać próbom na rozciąganie. Wyniki będą niewątpliwie tożsamościowe z wyżej zestawionymi, przy tych samych stopniach rozciągnięcia i tym samym tworzywie.

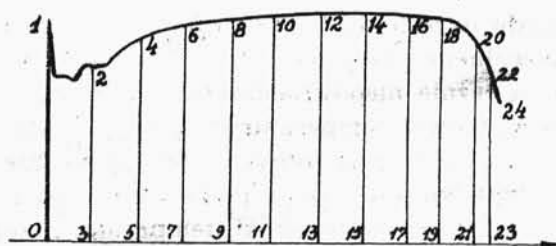
Pierwotne rozciągnięcie daje *pozorne wzmocnienie* tworzywa. Im wyższy stopień rozciągnięcia, tem więcej wzrasta wytrzymałość, tem bardziej maleje przydłużenie i — znacznie jednak słabiej — przewężenie. Wzajemian pierwotnej granicy podatności — pojawia się *punkt zwrotu*. Im wyższy stopień rozciągnięcia — tem bardziej zbliża się ów punkt do wytrzymałości, utożsamia się z nią wreszcie, zaczem —, przy dalszych stopniach rozciągnięcia, bliskich jedności, — razem z nią poczyną dążyć do pewnej ostatecznej granicy.

Stosunek przewężenia do przydłużenia — K — stanowi bardzo czułą miarę pozornego wzmocnienia. To wzmocnienie jest istotnie pozorne tylko, pochodzi bowiem z różnicy przekrojów F_0 i F próbki. Jedynie przeto wytrzymałość istotna, czyli naprężenie zrywające R_{rm} jest zawsze niezmienna, nie zależy bowiem od pierwotnego rozciągnięcia.

Wyniki powyższe można jeszcze inaczej podkreślić. Weźmy wzorcową próbkę miękkiej stali węglistej o cechach wytrzymałościowych:

$$O_r = 3097 \text{ kg/cm}^2, R_r = 3561 \text{ kg/cm}^2, A = 37.2\%, C = 72.3\%$$

Podczas próby na rozciąganie (Rys. 33) kolejno w punktach: 2, 4, ... 22 będziemy przerywali wzrost sił osiowych odkształcających, poczem stopniowo zmniejszali ich wielkość do zera i — ponownie stopniowo ją powiększali aż do poprzedniego natężenia. Te zmiany obciążenia dadzą na wykresie szereg linii: 2—3,



Rys. 33.

4—5, ... 22—23, mniej więcej kierunkowo zgodnych z początkową linią wykresu 0—1. Przyrosty niesprężyste: 0—3, 0—5,

... 0 — 23 pierwotnej długości pomiarowej próbki stanowią miarę jej rozciągnięć. Każdorazowo ginie przytem bezpowrotnie coraz to większa *lewa* część wykresu, jako przynależna rozciągnięciu pierwotnemu. Odpowiadająca jej część *prawa*, właściwa dalszemu rozciąganiu aż do zerwania próbki — maleje jednocześnie.

Siła osiowa niszcząca jest niewątpliwie niezmienna; dzielona przez przekrój próbki tem mniejszy, im większy był stopień pierwotnego rozciągnięcia, — daje coraz to wyższą wytrzymałość — pozorną. Widoczna jest również zmienność cech pozostałych, poprzednio już zresztą omówiona.

Wyżej opisana następcość zjawisk ulega jednak zmęczeniu, gdy, po dostatecznie długim odpoczynku tworzywa rozciągniętego, na skutek zmian wewnętrznych ustalą się nowe wytyczne naprężenia: istotna granica podatności i wytrzymałość, wyższe od pierwotnych. Pierwotne rozciągnięcie da wzmocnienie tworzywa, tym razem *istotne*. Ten *okres dojrzewania* można zresztą wybitnie przyspieszyć zapomocą kąpeli cieplnej o temperaturze odpowiednio dobranej.

Wzmocnienie istotne, lub pozorne pojawia się również i po obróbce, prowadzonej przy odpowiednio niskich temperaturach, wykluczających wszelkie uboczne wpływy cieplne, a zależnych od samego tworzywa.

We wszystkich przypadkach wzmocnienia istotnego, lub pozornego, zupełnie pewną jego miarę daje stosunek K przeźwężenia do przydłużenia.

3. Wpływy cieplne. Cechy wytrzymałościowe, określone z prób na rozciąganie i ściskanie, zależą w znacznej mierze od temperatury — oraz — od tak zwanej obróbki cieplnej tworzywa.

Cechy, wyróżniające tworzywo wytrzymałościowo, dotyczą ściśle określonej temperatury, na przykład wzorcowej 15°C i przy powolnem przejściu do innej temperatury — ulegają zmianom, przeważnie nieodwracalnym. To znaczy, że powolny powrót do początkowej temperatury — w ogólnym przypadku nie przywraca cech pierwotnych: tworzywo nie powraca w ogólnym przypadku do owego pierwotnego stanu wytrzymałościowego. Gwałtowne, nagłe skoki temperatury zazwyczaj dają znacznie głębsze zmiany jego cech — powodują wyraźne zmiany stanu wytrzymałościowego — zawsze nieodwracalne.

Właściwe stopniowanie temperatur, utrzymywanie ich w mierze, wraz z dobieraniem odpowiednich nagłych skoków — stanowi

istotę obróbki cieplnej tworzywa. Celem jej — wprowadzanie tworzywa w stan, najwłaściwszy do użytku praktycznego. Zatem obróbka cieplna może wywołać wzmocnienie, stopniowane według miary stanu K , może również przywracać stan początkowy tworzywa, lub ściśle ustalony jego *stan wzorcowy*.

Obróbka cieplna, dająca stan wzorcowy nosi miano *wzorcowania cieplnego* tworzywa. Długotrwałe nagrzewanie przy temperaturze właściwej i nader powolne studzenie zowie się *wyżarzaniem* tworzywa. Nagrzanie do właściwej temperatury i nagłe ostudzenie stanowi istotę *hartowania*.
