

XI. WŁASNOŚCI MECHANICZNE

(CZĘŚĆ TEORETYCZNA)

Twardość i miękkość. Zarys historyczny. Mieszaniny i roztwory stałe. Obecność związków chemicznych. — Wytrzymałość. Wytrzymałość na rozciąganie. Wytrzymałość na zgniatanie. Ścisłość. Zginanie. Wpływ czasu. Kruchłość. Sztywność. Badania trwałości. Zależność od składu. Wpływ temperatury. — Zgniot. Zarys historyczny. Zgniatanie kryształów. Skutki zgniotu. Skutki wyżarzenia. Wzrost kryształów żelaza. Teorie zgniotu.

TWARDOŚĆ I MIĘKKOŚĆ

Zarys historyczny. Pierwszy Réaumur (1722) próbował określić twardość i podzielił stałe na cztery kategorie, zależnie od tego, czy dadzą się zarysować szkłem, kryształem górnym, agatem czy topazem wschodnim.

Osmond (1895), rozważywszy czternaście metod, służących do określenia i zmierzenia twardości, przyjął definicję, iż „twardość jest to odporność na odkształcenia trwałe“.

Metoda Brinella (1900), oparta na tej definicji oraz na metodzie Hertza (1882) i Auerbacha (1891), określa twardość stosunkiem wywartego ciśnienia całkowitego do powierzchni otrzymanego odcisku; ten „stopień twardości“ jest wyrażony w kilogramach na mm².

Od dość dawna czyniono usiłowania, by ustalić związek między twardością metali i stopów, a ich budową.

Bottone (1873) dochodzi do wniosku, że twardość ciał prostych jest odwrotnie proporcjonalna do objętości atomowej.

Barus (1879) wskazuje na fakt, że „opór elektryczny stali wzrasta wraz z ich twardością“.

Pierwszy Benedicks (1901) ustalił, w sposób ścisły, związek między budową stopów, a ich twardością. „Jest to własność zupełnie ogólna — mówi on — że twardość czystych metali wzrasta

w znacznym stopniu przy rozpuszczeniu w nich, nawet małej ilości rozmaitych ciał. Roztwór możliwie najbardziej nasycony, zatem o największym ciśnieniu osmotycznym, wykazuje z tego właśnie powodu największą twardość". Stawiając narówni związki chemiczne z metalami, można z łatwością wyprowadzić z tych twierdzeń ogólny kształt wykresów twardości stopów, w zależności od ich składu.



CARL BENEDICKS
(ur. w 1875 r.)

Kurnakow i Żemczużny (1908) dochodzą również do wniosku, że roztwory stałe powiększają twardość stopów oraz podejmują myśl Barusa o związku pomiędzy oporem elektrycznym a twardością.

Le Grix i Broniewski (1913) proponują wprowadzić miast wykresów twardości wykresy miękkości, określonej jako „zdolność ulegania odkształceniom trwałym“, a której miarą jest odwrotność stopnia twardości Brinella.

Przy tym sposobie przedstawienia, część wykresów, odpowiadająca mieszaninom, zbliża się bardziej do prostej, niż w krzywych twardości. Istotnie, można *a priori* przewidzieć, że odkształcenia trwałe, charakteryzujące miękkość, są w wypadku mieszanin sumą odkształceń częściowych obu składników; całkowite odkształcenie byłoby zatem funkcją liniową składu objętościowego (w przybliżeniu także składu atomowego).

Mieszaniny i roztwory stałe. Krzywe miękkości, w swych typowych kształtach, są podobne do krzywych przewodnictwa elektrycznego i dadzą się określić w ten sam sposób.

Powiemy zatem, że spadek krzywych miękkości, gwałtowniejszy dla małych zawartości procentowych, niż dla większych, charakteryzuje roztwory stałe; linja, zbliżona do prostej, odpowiada mieszaninom.

Niekiedy, w przypadku mieszanin, obserwuje się krzywe miękkości znacznie odbiegające od prostej, jeśli stopy są niedostatecznie wyżarzane. Tak np. dla stopów cynku z kadmem (rys. 175), linja ciągła przedstawia miękkość po 5-tygodniach, zaś linja nieciągła po 3 dniach wyżarzania. Widzimy tutaj, że wskutek dłuższego wyżarzania krzywa zbliża się do prostej, lecz nie zlewa się z nią całko-

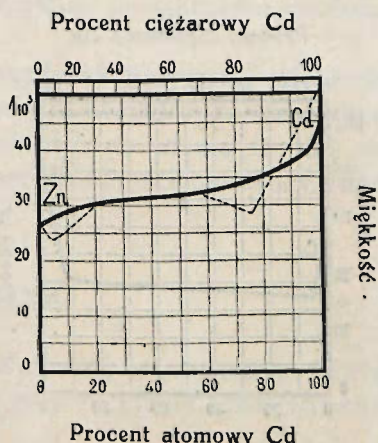
wicie. Nieregularności, pochodzące z niedostatecznego wyżarzenia, występują osobiście w okolicy cynku i koło stopu eutektycznego; w okolicy cynku możnaby je wytłumaczyć przemianą alotropową przy 350° dobiegającą do końca dopiero po długim wyżarzaniu; ubytek miękkości w okolicy punktu eutektycznego (74% atomowo Cd) pochodzi prawdopodobnie ze zgniotu przy krzepnięciu i oziębianiu.

U stopów miedzi z niklem (rysunek 176), tworzących ciągłe roztwory stałe, krzywa miękkości okazuje płytke minimum ze słabym spadkiem po stronie niklu. Ubytek miękkości u roztworów stałych zależy od natury ciał i może, w pewnych wypadkach, być tak niewielki, iż kryje się za błędami doświadczenia. Obecność zanieczyszczeń przyczynia się do powiększenia tej niepewności, gdyż niektóre z nich obniżają, w znacznym stopniu, miękkość metali i połączeń, zacierając w ten sposób wpływ obserwowanych roztworów stałych.

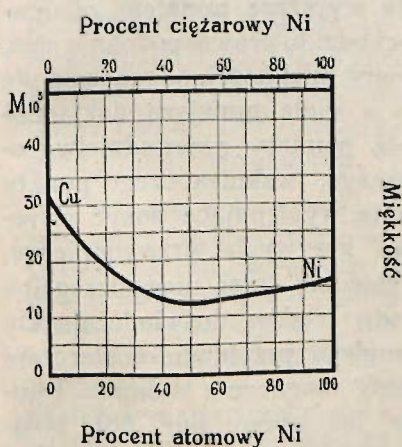
U stopów miedzi ze srebrem (rysunek 177), roztwory stałe zaznaczają się wyraźnie gwałtownym ubytkiem miękkości, podczas gdy mieszaninie obu roztworów stałych granicznych odpowiada prosta.

Obecność związków chemicznych. Związkom chemicznym, otoczonym roztworami stałymi, odpowiadają maxima na wykresie miękkości; połączenia, otoczone mieszaninami lub tworzące roztwory stałe z jednym ze sąsiednich składników, a mieszaniny z drugim, ujawniają się punktami załamania krzywej.

U stopów magnezu ze srebrem, które kilkakrotnie już badaliśmy (str. 75, 116 i 123), maximum krzywej miękkości (rys. 178) odpowiada połączeniu Ag Mg, otoczonemu roztwo-

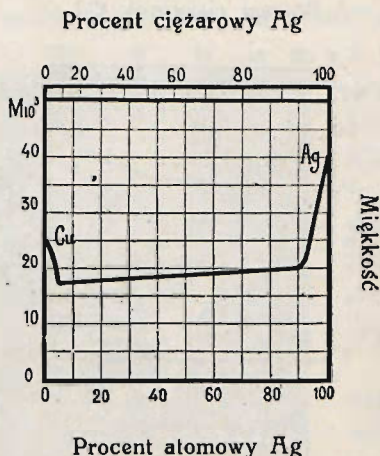


Rys. 175 — Cynk-kadm. Miękkość według Glasunowa i Matcewa (1914)

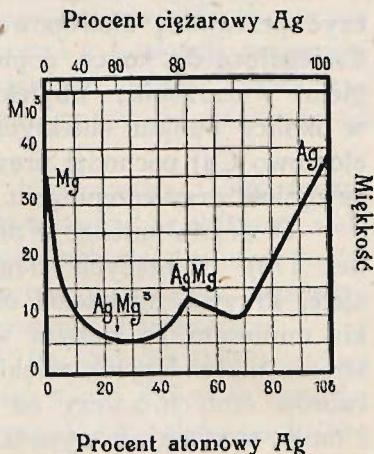


Rys. 176 — Miedź-nikiel. Miękkość według Kurnakowa i Rapkego (1914)

rami stałymi. Połączenie AgMg_3 , tworzące na małym obszarze roztwór stały z magnezem, niczem się nie ujawnia na krzywej

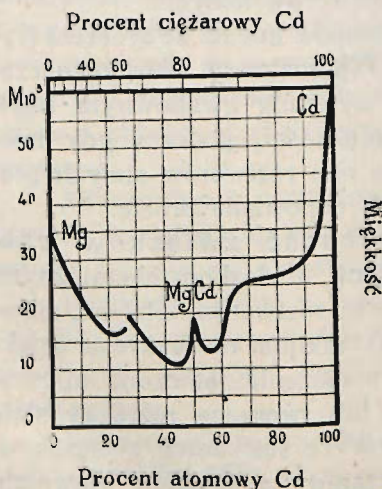


Rys. 177 — Miedź-srebro. Miękkość według Kurnakowa, Puschna i Senkowskiego (1910)



Rys. 178 — Magnez-srebro. Miękkość według Smirnowa i Kurnakowa. (1911)

miękości, podczas gdy na krzywej przewodnictwa zaznacza się zupełnie wyraźnie punktem załamania. Pochodzi to prawdopodobnie stąd, że pomiary miękkości, odznaczają się wogóle o wiele mniejszą dokładnością, niż pomiary przewodnictwa elektrycznego, wskutek czego punkty załamania, występujące dosyć wyraźnie na krzywych przewodnictwa, mogą stać się tutaj niedostrzegalne z powodu błędów doświadczalnych.



Rys. 179 — Magnez-kadm. Miękkość według Urasowa (1912)

Drugiego przykładu dostarczają nam stopy magnezu z kadmem. Tworzą one, jak wiemy (str. 68), połączenie MgCd otoczone roztworami stałymi i ulegające przemianie alotropowej około 248° .

Na krzywej miękkości (rys. 179) maximum, odpowiadające połączeniu MgCd , występuje bardzo wyraźnie. Przejście do roztworów stałych, przemienionych wraz z połącze-

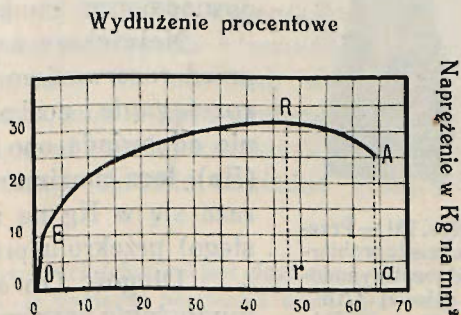
niem MgCd, zaznacza się od strony magnezu nieciągłością podobnie, jak na krzywej przewodnictwa (rys. 137); naodwrot, ze strony kadmu nieciągłość nie pojawia się i zastępuje ją platforma pozioma o charakterze ciągłym.

Widzimy tedy, że, jeśli istnieje pomiędzy krzywymi miękkości a krzywymi przewodnictwa elektrycznego i współczynnika zmiany oporu z temperaturą daleko idący paralelizm, to niema tu ani zupełnego podobieństwa, ani ścisłej proporcjonalności pomiędzy odpowiednimi wartościami liczebnymi.

WYTRZYMAŁOŚĆ

Wytrzymałość na rozciąganie. Weźmy pręt mosiężny, zawierający ciężarowo 33% cynku, poddajmy go rozciąganiu i przedstawmy na wykresie (rys. 180) względne wydłużenie tego pręta (odcięte) jako funkcję wytworzonego naprężenia (rzędne).

Widzimy, że aż do naprężenia wynoszącego 10 Kg/mm^2 , długość pręta wzrasta prawie proporcjonalnie do naprężenia, jak to wskazuje część OE wykresu. Zjawisko jest wówczas odwracalne, tak, że wydłużenie znika wraz z siłą rozciągającą.



Rys. 180 — Wykres wytrzymałościowy dla mosiądzu o 33% cynku

Własność stopu wchodząca tu w grę, mianowicie jego *sprężystość przy rozciąganiu*, mierzy się stosunkiem naprężenia do wytworzonego wydłużenia jednostkowego. Stosunek ten nosi nazwę *współczynnika wydłużenia* lub *modułu Younga*, który dla naszego mosiądzu wynosi 9500 kg/mm^2 , t. zn. że siła 1 kg na mm^2 przekroju wywołuje wydłużenie wynoszące $\frac{1}{9500}$ pierwotnej długości pręta.

Ostateczna równowaga pomiędzy wewnętrznymi naprężeniami ciała i siłą odkształcającą nie ustala się natychmiastowo. Ślady *opóźnienia sprężystego* dają się niekiedy zauważyć nawet po paru miesiącach działania siły. Również z opóźnieniem sprężystym odbywa się skurcz po odjęciu siły.

Powyżej *granicy sprężystości*, wskazanej przez punkt E krzywej, odkształcenia pręta stają się trwałe i wzrastają szybciej niż naprężenie, jak to wykazuje część ER wykresu.

Gdy długość pręta wzrasta wskutek rozciągania, jego średnica maleje. Poniżej granicy sprężystości zjawisko to jest równomierne

i odwracalne; stosunek względnego zmniejszenia średnicy do względnego wzrostu długości nazywamy *współczynnikiem Poissona*; jest on zawsze nie większy od 0,5, a dla znacznej ilości metali i stopów równy 0,33. Tak np. dla mosiądzu, wydłużeniu 1%-owemu towarzyszy zmniejszenie średnicy wynoszące 0,33%; współczynnik Poissona wynosi zatem 0,33.

Po przejściu granicy sprężystości, średnica przestaje zmniejszać się w sposób równomierny, natomiast w jednym miejscu pręta, zazwyczaj w środku, występuje miejscowe zmniejszenie się przekroju, zwane *przewężeniem* (rys. 181). Wysilek, potrzebny do wydłużenia pręta, staje się wówczas coraz mniejszy, gdyż przekrój wskutek przewężenia coraz bardziej maleje. Krzywa rozciągania posiada więc maximum R, odpowiadające naprężeniu 32 Kg/mm², zaś rozerwanie probierki następuje przy mniejszym naprężeniu, odpowiadającym punktowi A.



Rys. 181 — Przewężenie probierki wytrzymałościowej (An-czyz, 1913)

Największe naprężenie, jakie może znieść pręt przed rozerwaniem, świadczy o *wytrzymałości na rozciąganie* i nosi nazwę *naprężenia rozrywającego*; nie odpowiada ono naprężeniu w chwili rozerwania (Aa), lecz maximum krzywej rozciągania (Rr) i wyraża się w Kg na mm² pierwotnego (nie rzeczywistego) przekroju pręta.

Długość Oa oznacza *wydłużenie przy rozerwaniu* pręta odniesione do jego pierwotnej długości.

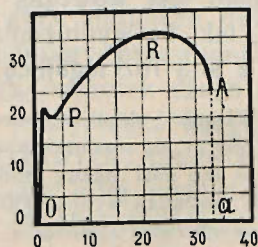
Przewężenie mierzy się, po rozerwaniu, stosunkiem maksymalnego zmniejszenia przekroju do pierwotnego przekroju.

U żelaza spostrzegamy nagłe wydłużenie przy końcu okresu sprężystości, prawdopodobnie z powodu przesuwu kryształów przed zgniotem. Krzywa rozciągania posiada w tym wypadku wklęsłość P (rys. 182). Obecność węgla i zgniot przyczyniają się do zmniejszenia tego zjawiska, a nawet do zupełnego jego zniknięcia.

Dla stali węglistych stwierdził Brinell (1900) proporcjonalność między wytrzymałością na rozciąganie R a twardością H:

$$R = KH.$$

Wydłużenie procentowe



Napężenie w Kg na mm²

Rys. 182 — Wykres wytrzymałościowy dla żelaza

Współczynnik K jest bliski $\frac{1}{3}$, lecz zmienia się nieco z twardością stali, a także zależnie od tego, czy odcisk kulki robi się równolegle czy prostopadłe do kierunku walcowania, podczas gdy rozciąganie skutecznia się zawsze równolegle do kierunku walcowania.

Grard (1911) podaje następujące wartości dla współczynnika K :

Stal	R	Współczynnik K		
		prostopadłe do walcowania	równoległe do walcowania	po zahartowaniu i odpuszczeniu
Bardzo miękka	34—40 kg/mm ²	0.360	0.345	—
Miękka i nawpół miękka	40—55 „	0.355	0.342	0.346
Nawpół twarda	55—65 „	0.353	0.337	0.344
Twarda	65—75 „	0.349	0.321	0.318

Np. stal, której stopień twardości wynosi 180 kg/mm² posiada wytrzymałość na rozciąganie bliską 62 kg/mm².

Dla wielu innych stopów daje się również stwierdzić proporcjonalność między wytrzymałością na rozciąganie i twardością, lecz współczynnik proporcjonalności jest inny niż dla stali węglistych. Żeby więc, na podstawie tego związku, można było zastąpić badania wytrzymałości na rozciąganie pędszemi i mniej kosztownymi badaniami twardości, należy doświadczalnie określić dokładne granice i warunki jego stosowalności.

W ścisłym związku z czynnikami wytrzymałościowymi jest *ciągliwość*, to znaczy własność, która sprawia, że metal daje się wyciągać na cienkie druty. Przy tej czynności należy przekroczyć granicę sprężystości, nie osiągając jednak naprężeń rozrywającego. Tedy, ogółem biorąc, ciało jest tem bardziej ciągliwe, im bardziej jego granica sprężystości jest odległa od naprężeń rozrywającego.

Wytrzymałość na ściskanie. Jeśli, zamiast wyciągać pręt, zmienimy kierunek siły i wywierać będziemy ciśnienia stopniowo coraz większe, to zaobserwujemy zjawiska analogiczne do zjawisk rozciągania, lecz przeciwnego znaku.

Poniżej granicy sprężystości, skrócenie pręta i powiększenie się przekroju są odwracalne; mierzy się je temi samymi współczynnikami, jak przy rozciąganiu.

Powyżej granicy sprężystości, której odpowiada takie same naprężenie, jak przy rozciąganiu, odkształcenia stają się trwale i stop poczyną okazywać swą *plastyczność* lub *płynność*. Można go wówczas porównać do cieczy lepkiej, gdyż nabywa on własności przybierania kształtu naczynia lub wypływania przez otwór przy dostatecznie wysokich ciśnieniach. To *ciśnienie wypływu* zależy od warunków doświadczania i jest, z reguły, o wiele wyższe od naprężeń rozrywającego, co można wytłumaczyć przez zgniot silniejszy i bardziej regularny przy ściskaniu, niż przy rozciąganiu.

Pierwsze doświadczenia nad płynnością metali i stopów były wykonane przez Tresca (1864). Lehman (1907) widzi w tem zjawisku analogję do kryształów płynnych i stwierdza, że ciśnienie przenosi się głównie pod kątem 45° do powierzchni

cisnącej. Kurnakow i Żemczużny (1909) sądzą, że możnaby zastąpić pomiary twardości, mało dogodnie w wypadku miękkich stopów, pomiarami ciśnienia wypływu przez otwór o wymiarach określonych. „Pomiędzy ciśnieniem wypływu — twierdzą oni — a stopniem twardości Brinella można zauważyć dokładny paralelizm. Można obliczyć, z bardzo wielkiem przybliżeniem, ciśnienie wypływu przy pomocy stopnia twardości i naodwrot”.

Analogiczną do ciągliwości własnością jest *kowalność*, t. zn. własność, która sprawia, że metal daje się otrzymać w cienkich blaszkach przez młotowanie lub walcowanie. Przy tych czynnościach należy używać dostatecznie wysokich ciśnień, by wytworzyć miejscowe wycieknięcia tak jednak, by pęknięcie nie nastąpiło. Ogółem biorąc, metale najbardziej ciągliwe są również najbardziej kowalne.

Ścisłość. Jest to własność ciała zmniejszania swej objętości pod wpływem jednostajnego ciśnienia, wywartego na całą powierzchnię.

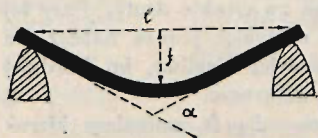
U ciał jednorodnych, to zmniejszenie objętości nigdy nie jest trwałe i można przyjąć, iż, w pierwszym przybliżeniu, jest ono proporcjonalne do ciśnienia. Ścisłość charakteryzuje się *współczynnikiem ścisłości*, który równa się stosunkowi wywartego ciśnienia do względnego zmniejszenia objętości.

Dla mosiądzu np. współczynnik ścisłości doświadczalnie oznaczony (Regnault) wynosi około 9600 kg/mm², to znaczy, że ciśnienie 1 kg na mm² powierzchni wywołuje zmniejszenie wynoszące 1/9600 pierwotnej objętości.

Teoretycznie, współczynnik ścisłości (δ) jest związany z modułem Younga (ϵ) i współczynnikiem Poissona (η) równaniem:

$$\delta = \frac{\epsilon}{3(1-2\eta)}$$

Zginanie. Pręt, spoczywający swobodnie na dwu podporach, odległych o l (rys. 183) i poddany w środku działaniu siły P , wygnie się. Wartość strzałki zgięcia f można obliczyć na podstawie wzoru



Rys. 183 — Zgięcie

$$f = \frac{1}{48} \cdot \frac{P l^3}{\epsilon} \cdot K,$$

gdzie ϵ oznacza moduł Younga, zaś K współczynnik zależny od przekroju pręta.

Gdy przekrój jest kołisty, K przybiera wartość $\frac{64}{\pi d^4}$, gdzie d jest średnicą; gdy przekrój jest prostokątny, współczynnik ten wynosi $\frac{12}{ab^3}$, gdzie a jest szerokością, zaś b grubością pręta. Zatem, przy zgięciu, jedynym czynnikiem zależnym od materiału jest moduł Younga warunkujący wydłużenie przy rozciąganiu.

Wzór powyższy stosowalny jest tylko w takim wypadku, gdy granica sprężystości nie jest przekroczona i zjawisko jest odwracalne. W przemysłowych próbach zginania przekracza się znacznie

granice sprężystości, aby oznaczyć kąt zgięcia α , przy którym na wypukłej stronie pręta okazują się rysy.

Wpływ czasu. Przy pomiarach własności mechanicznych, należy uwzględnić szybkość ich wykonania. Tak więc, przy szybkiej próbie rozciągania otrzymujemy zazwyczaj większą wytrzymałość na rozerwanie i mniejsze wydłużenie, niż przy powolnej próbie.

A. Le Chatelier (1900) znajduje następujące wartości dla naprężenia rozrywającego, w zależności od czasu próby.

Metal	Czas trwania próby			Prawdziwe naprężenie rozrywające
	30 sek.	5 min.	1 godz.	
Miedź	27·8 kg/mm ²	26·3 kg/mm ²	25·1 kg/mm ²	23·5 kg/mm ²
Glin	14·9 "	14·4 "	13·4 "	11·0 "
Cynk	28·0 "	21·0 "	11·5 "	2·0 "

U żelaza i stali, przyspieszenie rozciągania wywołuje wyniki dość nieznaczne i zależne od temperatury próby.

Praca zużyta na rozerwanie przez rozciąganie zdaje się być niezależną od szybkości próby. Np. w doświadczeniach Charpyego (1909) do próbki służyły dwie miękkie stale A i B dając następujące wyniki przy rozciąganiu powolnem, powodującym wydłużenie 0·1 mm na sekundę.

Granica spręż.	Naprężenie rozrywające	Wydłużenie procentowe	Przewężenie procentowe	Praca rozerwania na cm ² przekroju
A 30 kg/mm ²	42 kg/mm ²	32%	67%	91 kgm
B 30 "	44 "	31	66	94

Przy powolnem rozciąganiu, miarą pracy zużytej na rozerwanie jest powierzchnia O R A a O wykresu wytrzymałościowego (rysunek 180 i 182), równa iloczynowi z naprężeń przez wywołane wydłużenia; praca ta zatem zależy nie tylko od przekroju, lecz także od długości badanego pręta.

Rozerwanie przez uderzenie podłużne (równoległe do osi pręta), powodujące wydłużenie 20 metrów na sekundę, co odpowiada szybkości próby 200.000 razy większej, dało przy użyciu tej samej stali i na identycznych probierkach następujące wyniki:

Wydłużenie procentowe	Przewężenie procentowe	Praca rozerwania na cm ² przekroju
A 37%	66%	100 kgm
B 38	67	111 "

Przy rozerwaniu przez uderzenie podłużne, wartość pracy zużytej oznacza się, znając energję wydatkowaną i mierząc tę jej część, która nie została obrócona na rozerwanie probierki. Jeśli się zważy,

że, przy rozerwaniu przez uderzenie, część pracy zużytej zamieniła się w ciepło, to można przyjąć, że ta sama praca została zużyta na rozerwanie przez powolne rozciąganie, co na rozerwanie przez uderzenie podłużne. Również wydłużenia i przewężenia niewiele się różnią w obu wypadkach.

Kruchłość. Przy powolnej próbie, złamanie jednostajnego pręta przez zgięcie zależy od tych samych czynników, co rozerwanie przez rozciąganie, zważywszy, że rozpoczyna się ono wówczas, gdy została przekroczona wytrzymałość na rozciąganie najbardziej naprężonych włókien.

Jeśli jednak złamanie przez zgięcie następuje skutkiem uderzenia poprzecznego w pręt, w którym nacięto karb t. j. żłobek poprzeczny, praca złamania nie jest w żadnym stosunku do wytrzymałości na rozciągania, lecz charakteryzuje niezależną własność materji, mianowicie *odporność na uderzenie* lub jej odwrotność: *kruchłość*.

Np. dwie stale, u których stwierdziliśmy bardzo zbliżone własności przy powolnem rozciąganiu i przy uderzeniu podłużnem, okazują przy próbie złamania przez zgięcie skutkiem uderzenia poprzecznego w pręt, opatrzone karbem, zupełnie różną odporność na uderzenie.

U stali A praca złamania na cm^2 przekroju wynosi 44 kgm

" " B " " " " " " " " 3 "

Stal B jest zatem bardzo krucha, podczas gdy stal A jest odporna na uderzenie.

Przyczyna, iż kruchłość objawia się przy złamaniu skutkiem uderzenia poprzecznego, zaś nie objawiała się wcale, lub prawie wcale, przy rozerwaniu przez uderzenie podłużne, leży prawdopodobnie w różnicy procesu zerwania związku cząstek w obu wypadkach. Przy rozciąganiu cząstki, należące do jednego przekroju, znajdują się w tych samych warunkach i równocześnie dochodzą do granicy wytrzymałości; przy zgięciu zaś cząstki jednego przekroju znajdują się w warunkach bardzo odmiennych, a złamanie następuje stopniowo.

Rola karbu nie sprowadza się tylko do tego, iż zgóry oznacza on miejsce, w którym probierka ma pęknąć; jest ona o wiele ważniejsza, jak to wykazali Frémont i Osmond (1901).

„Gdy się zgina — mówią oni — nieopatrzony karbem mały pręcik, z miękkiej stali lub jakiegoś podobnego metalu, to napięcie rozkłada się na wielką powierzchnię; najbardziej naprężone włókna mogą wydłużyć się na wielkiej przestrzeni, jak przy próbie rozciągania i całkowite wydłużenie jest wielkie. To też wszystkie miękkie stale znoszą, z reguły, całkowite przecięcie prętów o grubości 8 mm.

Trzeba znaleźć środek rozróżnienia: stąd nacinanie karbu. Całkowite wydłużenie najdłuższego włókna sprowadza się, w tym wypadku, do wydłużenia szerokości karbu i sprowadziłoby się do zera, gdyby karb był doskonale ostry.

Jak, na podstawie zginania bez nacięcia karbu, nie można rozróżnić miękkich stali, gdyż byłaby to próba zbyt łagodna, tak też zanadto ostry karb stanowiłby próbę zbyt surową: wszelkie używane gatunki stali złamałyby się przy niewielkim nakładzie pracy i znowuż byłby to zły sposób rozróżnienia".

Następujący przykład wykaże nam znaczenie, jakie posiada kształt karbu, naciętego do połowy przekroju w prętach przyrządkowych, o boku równym 10 mm, wyciętych ze stali węglistej, której wytrzymałość na rozciąganie wynosi 54 kg/mm² (Ehrensberger, 1908).

Karb	Odporność na uderzenie
o walcowatym dnie, promienia 2 mm	7 kgm na cm ²
nacięty piłką, grubości 1 mm	3 " " "
ostry, o kącie 45°	1 " " "

Karb o dnie walcowatym, nacięty w przecie przyrządkowym, o boku równym 30 mm, przyjęto jako normalny. Odporność na uderzenie mosiądzu, zawierającego 33% cynku, mierzona w takich warunkach, wynosi około 20 kgm na cm².

Wpływ czasu trwania próby, względnie szybkości uderzenia, na wyniki doświadczalne pomiarów odporności zależy, w znacznym stopniu, od budowy metalu.

Widać to z doświadczeń Cornu-Thénarda (1920), przy których łamane były normalne probierki stali przez zgięcie, bądźto zapomocą prasy, z szybkością 1 mm na minutę, bądźto zapomocą taranu z szybkością 500.000 większą, zbliżoną do 9 metrów na sekundę. Metal miał budowę drobnoziarnistą, otrzymaną przez hartowanie dla pierwszego i dla ostatniego gatunku, oraz przez odpuszczenie po hartowaniu dla trzech innych.

Oznaczamy przez R wytrzymałość na rozciąganie, przez A% odnośne procentowe wydłużenie, przez L pracę w kilogrammetrach na cm² przekroju, przy po wolnym jej złamaniu i przez U takąż pracę przy szybkim złamaniu.

Gatunek stali	R	A%	L	U
Miękka (0,15 C)	45	39	32	41
Nawpół-twarda (0,3 C)	68	28	16	17
Niklowa (0,5 C; 1 Ni)	75	26	15	15
Niklowo-chromowa (0,6 C; 3 Ni; 1,5 Cr)	105	20	10	12
" (0,8 C; 23 Ni; 1,6 Cr)	76	59	24	25

Widzimy więc, że przy normalnej obróbce termicznej metalu, olbrzymie zwiększenie szybkości próby zwiększa bardzo tylko nieznacznie jego odporność.

Wyniki doświadczalne zmieniają się zasadniczo, dla poprzednio użytej miękkiej stali, o ile jej kryształy wzrastają do 0,1 mm przez ogrzanie zgniecionego metalu. Otrzymujemy wtedy następujące wartości, oznaczając przez U' pracę na cm² przy małej szybkości taranu, zbliżonej do 2,7 m na sekundę.

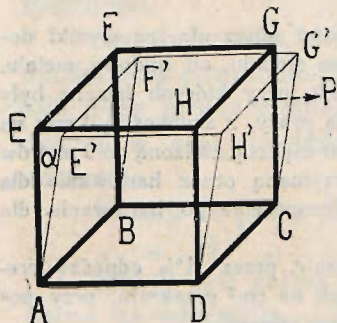
Gatunek stali	R	A%	L	U'	U
Miękka (0,15 C)	38	38	9	5	2,5

W tych więc warunkach, odporność na złamanie spada znacznie bardziej od wytrzymałości na rozzerwanie i zmniejsza się nadal ze wzrostem szybkości próby, gdy odwrotny stosunek dawał się zauważyć w zdrowym metalu.

Wzrost kryształów nie zawsze wpływa szkodliwie na odporność na uderzenie (Stadeler, 1913). Lecz gdy metal zawiera zanieczyszczenia nierozpuszczalne, gromadzą się one podczas wtórnej krystalizacji w miejscach zetknięcia kryształów, tworząc tam powierzchnię mniejszej wytrzymałości, tem grubsza, im kryształy są większe. Zachodzi to zwłaszcza w stopach przemysłowych *przegrzanych* lub uległych niewłaściwej obróbce termicznej po zgnioście. Do takiego kruchego metalu odnosiła się też, zapewne, głośna obserwacja Considère'a (1888), w której stwierdzał, że odporność na uderzenie maleje i prawie zanika, o ile szybkość uderzenia przekracza pewne granice.

Przełom odbywa się, prawdopodobnie, w sposób odmienny w obu wypadkach i, gdy w metalu drobnziarnistym kryształy zostają odkształcone i przerwane, w wypadku budowy gruboziarnistej, przełomowi ulegają, przeważnie, powierzchnie zetknięcia kryształów (H. Le Chatelier, 1901).

Sztywność. W celu zdefiniowania pojęcia sztywności, wyobraźmy sobie wewnątrz ciała dwie powierzchnie płaskie i równoległe (rys. 184), z których jedna ABCD jest stałe utwierdzona, zaś druga EFGH podlega działaniu siły stycznej P, jednostajnie rozłożonej na całą tę powierzchnię i wyrażonej w kilogramach na milimetr kwadratowy. Nastąpi więc odkształcenie



Rys. 184 — Odkształcenie, wywołane przez siłę styczną

ciała, powierzchnia poddana działaniu siły, zajmie położenie E'F'G'H', a warstwy kolejne pomiędzy obu płaszczyznami przesuną się jedne nad drugimi o kąt α . Własność ciała, polegająca na przeciwdziałaniu tego rodzaju odkształceniom, zowie się *sztywnością* miarą jej jest *spółczynnik sztywności* lub *moduł Coulomba*, równy stosunkowi naprężenia do kąta powstałego skutkiem przesunięcia. Kąt ten wyraża się stosunkiem łuku do promienia, co daje jako jednostkę bezwzględną $\text{radian} = 57^\circ 17' 44.8''$.

Dla mosiądzu moduł Coulomba wynosi 3.700 kg/mm^2 t. zn. że napięcie styczne 1 kg/mm^2 wytworzy kąt:

$$\frac{57^\circ 17' 44.8''}{3700} = 55.7'.$$

Powyżej pewnej granicy sprężystości, odkształcenia te stają się trwałe. Poniżej granicy sprężystości, moduł Coulomba (τ) jest teoretycznie związany z modułem Younga (ϵ) i współczynnikiem Poissona (η) równaniem:

$$\tau = \frac{\epsilon}{2(1 + \eta)}$$

Moduł Coulomba określa się zazwyczaj przez *skręcanie* drutu na podstawie wzoru:

$$\tau = \frac{32 M l}{\pi d^4 \alpha}$$

gdzie l oznacza długość drutu, d jego średnicę, zaś M moment pary sił skręcającej drut o kąt α (w radianach).

Wydłużenie zwyczajnej sprężyny spiralnej zależy wyłącznie od modułu Coulomba, podczas gdy działanie sprężyny płasko-spiralnej wiąże się tylko z modułem Younga.

Gdy się przekroczy granicę sprężystą sztywności, dalsze odkształcenie może spowodować zerwanie związku cząstek, zwane w tym wypadku ścięciem. *Wytrzymałość na ścinanie* mierzy się stosunkiem siły, powodującej ścięcie (w Kg) do powierzchni ściętej (w mm²), przyczem przyjmujemy, że siła tnąca jest równomiernie rozłożona na powierzchnię.

Frémont (1906) znalazł dla stali budowlanych empiryczny związek pomiędzy wytrzymałością na ścinanie R' a wytrzymałością na rozciąganie R :

$$R' = 0.34 R + 75.$$

Badania trwałości. Nasze obecne wiadomości co do wytrzymałości metali na rozciąganie, zgięcie lub uderzenie powtarzające się wielką liczbę razy (około miliona), zawdzięczamy głównie pracom Woëhlera (1866).

Badania te, często odłąd przedsiębiorne, wykazały, że przy wielokrotnie powtarzanem rozciąganiu naprężenie rozrywające przypada w okolicy granicy sprężystości. Wielokrotnie powtarzane ściskanie wywołuje ten sam skutek. Co więcej, gdy rozciąganie i ściskanie odbywa się naprzemiennie, wytrzymałość na rozerwanie obniża się jeszcze bardziej i spada poniżej granicy sprężystości, tak, że rozerwanie następuje skutkiem szeregu napięć i ciśnień, z których każde zosobna nie powinno by pozostawić po sobie trwałych śladów.

Np. według Smitha (1911) stal zawierająca 0.27% węgla i okazująca przy rozciąganiu granicę sprężystości $E = 29 \text{ kg/mm}^2$, naprężenie rozrywające $R = 51 \text{ kg/mm}^2$ oraz wydłużenie $A = 25\%$, rozrywa się wskutek często powtarzanego rozciągania przy $W' = 29 \text{ kg/mm}^2$ i wytrzymuje tylko naprężenie mniejsze niż $W = 21 \text{ kg/mm}^2$, gdy po każdym rozciąganiu następuje równe co do wartości bezwzględnej ściskanie. Jeśli utworzymy sumę bezwzględnych wartości napięcia i ciśnienia, by wyznaczyć ostateczne granice całkowitego wysiłku, to zobaczymy, że w powyższym wypadku leży on między $W' = 29 \text{ kg/mm}^2$ a $2W = 42 \text{ kg/mm}^2$. U innych metali różnica może być mniej znaczna i Woëhler skłaniał się nawet do przypuszczenia, że całkowity wysiłek przy badaniach trwałości, jest zawsze ten sam, niezależny od dolnej granicy.



AUGUST WOËHLER
(1819—1914)

Dla wytłumaczenia tych faktów Bauschinger (1886) przyjmuje, iż naprężenie W wytrzymywane przez metal nieograniczenie długo podczas często powtarzanych odkształceń przemennych, równa się prawdziwej granicy sprężystości. Oznacza się ją niekiedy mianem *granicy sprężystości Woëhlera*. Pozorna granica sprężystości, zazwyczaj obserwowana, jest zatem sztucznie podwyższona wskutek niedokładności pomiarów oraz zgniotu metalu przy próbie. Hipoteza ta ma tem większe dane słuszności, że działania przemienne wywołują przed rozerwaniem linie przesuwu w kryształach, co jest charakterystycznym znamięm, że prawdziwa granica sprężystości została przekroczona (Eving i Humfrey, 1903).

W badaniach trwałości na uderzenia wchodzi w grę granica sprężystości Woëhlera, określona przy badaniach trwałości rozciągania, a nie odporność mierzona przy złamaniu skutkiem jednego uderzenia. Według Stanton'a (1912) trwałość na uderzenia, których liczba przenosi 100.000, jest proporcjonalna do

$$\frac{W^2}{e}$$

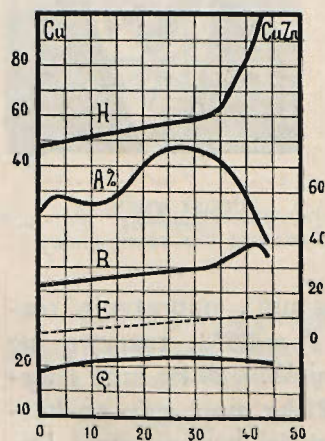
gdzie W oznacza granicę sprężystości Woëhlera, zaś e moduł Younga.

Zależność od składu. Można posługiwać się krzywami wytrzymałości na rozciąganie lub odporności na uderzenie, wykreślonymi jako funkcje składu procentowego w celu wyprowadzenia wniosków co do budowy stopów. Lecz na krzywe te zbyt niwielki wpływ stan skupienia krystalicznego oraz błędy doświadczalne, by dawać mogły dokładne wskazówki. Bardziej wchodzi tu w grę ich wielkie znaczenie przemysłowe ze względu na praktyczne zastosowanie stopów.

Z tej przyczyny kreśli się zazwyczaj krzywe własności mechanicznych w zależności od składu ciężarowego, w praktyce stosowanego.

Własności mechaniczne mosiądzu (rysunek 185) posłużą nam za przykład. Wiemy, iż w zwyczajnej temperaturze miedź może rozpuścić 35% ciężarowo cynku (por. str. 150) i że stopy o większej zawartości cynku są mieszaninami granicznego roztworu stałego z połączeniem Cu Zn. Ta granica roztworu stałego zaznacza się punktem załamania na krzywych: twardości H i wytrzymałości na rozciąganie R . Maximum tej ostatniej krzywej (40%), podobnie, jak

Procent ciężarowy Zn



Rys. 185 — Miedź-cynk. H — twardość; R — wytrzymałość na rozciąganie; E — granica sprężystości; $A\%$ — wydłużenie przy rozerwaniu; ρ — odporność na uderzenie według Guillelta (1914).

tem załamania na krzywych: twardości H i wytrzymałości na rozciąganie R . Maximum tej ostatniej krzywej (40%), podobnie, jak

punkty szczególne krzywej wydłużenia przy rozerwaniu A nie odpowiadają żadnemu zjawisku, którego istnienie wykazywałyby inne metody. Na krzywej granicy sprężystości E , podobnie jak na krzywej odporności na uderzenie ρ , nie widzimy żadnych punktów szczególnych.

W obrębie roztworu stałego, wytrzymałość okazuje się proporcjonalna do twardości, lecz stosunek jest inny, niż u stali (por. str. 195), mianowicie wytrzymałość na rozciąganie wyraża się przez połowę stopnia twardości.

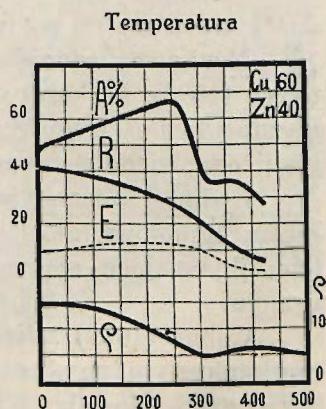
Wpływ temperatury. Wytrzymałość na rozciąganie lub odporność na uderzenie metali i stopów maleje zazwyczaj z podniesieniem temperatury. Zmienność ta wykazuje niekiedy nieregularności pomiędzy granicami temperatur, w których żadna inna metoda nie wykazuje punktów przełomowych.

Najczęściej przyczyną tych nieregularności jest wtórna krystalizacja, odbijająca się przede wszystkim, jeśli nie wyłącznie, na własnościach mechanicznych.

Ponieważ próby mechaniczne wywołują zgniot, a ten ułatwia wtórną krystalizację, mamy podczas powolnych prób przy wysokiej temperaturze do czynienia ze skomplikowanymi zjawiskami, z których jedno, mianowicie zgniot, podwyższa własności mechaniczne, podczas gdy drugie, powtórna krystalizacja, je obniża.

Z powyższych przyczyn, a także z powodu miernej dokładności pomiarów mechanicznych, należy przywiązywać do krzywych własności mechanicznych, w zależności od temperatury, raczej znaczenie przemysłowe, niż teoretyczną wartość.

Krzywe, przedstawione na rys. 186, odnoszą się do mosiądzu o większej zawartości cynku i posiadają kształty dosyć różnorodne. Podczas gdy zmniejszanie się wytrzymałości na rozciąganie R jest dość regularne, podobnie jak zmniejszanie się odporności na uderzenie ρ , to granica sprężystości E i wydłużenie przy rozerwaniu A posiadają maximum.



Rys. 186 — Własności mechaniczne mosiądzu zawierającego 40% cynku, jako funkcje temperatury. R — wytrzymałość na rozciąganie; E — granica sprężystości; A — wydłużenie przy rozerwaniu (Huntington, 1912); ρ — odporność na uderzenie (Guillet i Bernard, 1913)

ZGNIOT

Zarys historyczny. Zjawisko zgniotu było już od dawna znane i stosowane w przemyśle, jak o tym świadczy Réaumur w swej „Sztuce szpilkarza“ (1761).

„Szpilkarze, mówi on, biorą zawsze drut grubszy od szpilek, które zamierzają robić; zastrzegają oni sobie przeciągnięcie go przez jakiś otwór drucidła, by go zgnieść... Otwory, przez które szpilkarze przeciągają mosiądz, by go przerobić na drut, przyczyniają się jeszcze do tego, by go wzmocnić... Gdy gruby drut przejdzie przez dwa otwory, wyżarza go się w ogniu drzewnym. Dąb jest jedynym drzewem, którego się unika przy paleniu; ciepło jego jest zbyt żywe i drut z tego powodu łatwiej się rozrywa“.

Te empiryczne wiadomości o zgniocie są szczupłe, lecz dokładne i nie wiele co po nad to wiedziano aż do końca 19-go wieku.

Naukowe badania zgniotu zostały przedsięwzięte przez Charpyego (1893). Wskazał on wpływ temperatury wyżarzenia na mechaniczne własności zgniecionego mosiądzu i określił zapomocą mikrografji odpowiednie zmiany budowy.

Ewing i Rosenhain (1900) ustalili podstawową zasadę, że wszelkiemu zgniotowi towarzyszą przesunięcia trwałe w obrębie kryształu, objawiające się na powierzchni charakterystycznymi linjami zgniotu.

Cohen (1909) zalicza zgniot do „chorób metali“, szkodzących mechanicznym ich własnościom. Twierdzenie to nie jest słuszne w swej bezwzględnej formie, aczkolwiek zbyt daleko posunięty zgniot, jak i wyżarzanie po zgniocie mogą spowodować znaczną kruchość.

Zgniatanie kryształów. Dotychczas uważaliśmy kryształ jako elementarny składnik budowy metali i stopów nie uwzględniając możliwości jego rozpadnięcia.

Jak długo stop podlega działaniu sił poniżej granicy sprężystości, sieć krystaliczna dopuszcza odkształcenia przemijające i kryształy pozostają nienaruszone.

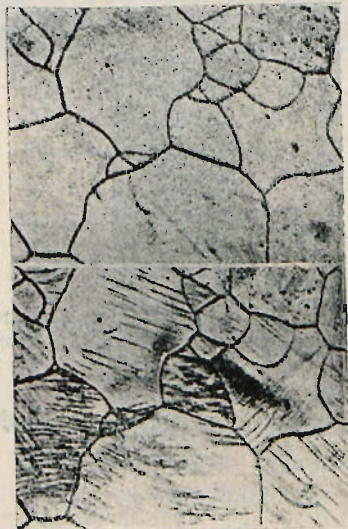
Jeśli naprężenie przekroczy granicę sprężystości, spojenie kryształów puszcza i stop rozrywa się lub łamie. Dzieje się to w wypadku stopów kruchych, u których przed rozerwaniem nie występuje odkształcenie trwałe.

Jednakże u większości stopów, mniej lub więcej plastycznych, spojenie kryształów jest mocniejsze od samego kryształu i gdy gra-

nica sprężystości zostanie przekroczona, kryształ się odkształca i rozpada przez zsuwanie się płaszczyzn łupliwości.

Płaszczyznami łupliwości nazywamy płaszczyzny najmniejszej wytrzymałości między drobinami kryształu. Podobnie, jak w budowlu z cegieł, tak we wnętrzu kryształu, przesuwania odbywają się szczególnie łatwo w pewnych kierunkach. Płaszczyzny łupliwości, wtedy występujące, będą zależne od kierunku siły, lecz z powodu symetrycznej budowy kryształu, podzielią go zawsze na szereg równoległych łusek. Od liczby tych łusek, przesuwających się jedno po drugim, zależy właśnie plastyczność lub płynność metali i stopów.

Mikrografia pozwala nam oglądać powierzchnie przesuwania pod formą sieci linii równoległych, zwanych *linjami zgniotu* lub *linjami Neumanna* na cześć uczonego, który je pierwszy obserwował na żelazie meteorycznym. Niekiedy określa się je terminem angielskim *stipbands*, zwłaszcza, gdy nie idzie o żelazo. Rysunki 187 i 188 przedstawiają próbkę żelaza przed i po odkształceniu; widzimy tu linie Neumanna, przecinające odkształcone kryształy.



Rys. 187 i 188 — Linie Neumanna. *Na górze*: próbka żelaza przed odkształceniem, *na dole*: ta sama próbka po odkształceniu przez ściskanie (Ewing, 1912) Pow. 150 ×

W niektórych przypadkach tworzą linie zgniotu szczególnie regularną sieć i można je oglądać gołym okiem na powierzchni odpuszczonej do niebieskiej barwy lub starannie wypolerowanej i wytrawionej kwasem.

Pierwszy Piobert (1842) obserwował te linie; Lüders (1860) podał dokładny ich opis i czasem nazywa się je *linjami Lüdersa*; Hartmann (1896) badał je starannie.

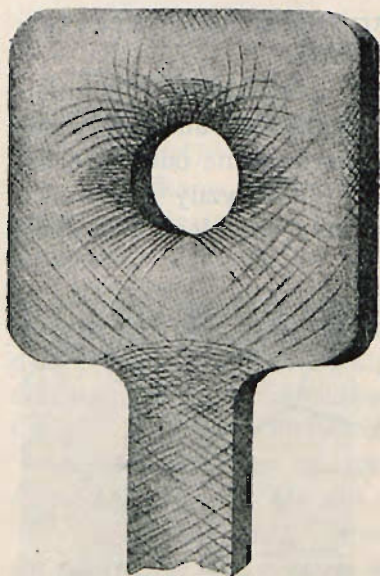
Wszelkie odkształcenie trwałe może spowodować powstanie linii Lüdersa, lecz pojawiają się one przedewszystkiem w miejscach, poddanych ścisnaniu przy rozmaitego rodzaju próbach (zgniecenie skutkiem ściskania lub uderzenia, przebijanie, zgięcie i t. d.). Tak np. na płaskiej probierce do rozciągania (rys. 189) linie Lüdersa są specjalnie gęste w górnej części otworu główki, gdzie zostało wywarte ciśnienie, a także w miejscu połączenia z trzonem, gdzie zapewne nastąpiło ściśnięcie wskutek zgięcia.

Na blachach, ciętych na zimno, występują niekiedy linie Lüdersa na pasie, mającym do 5 cm szerokości i utleniającym się łatwiej, niż reszta blachy.

BIBLIOTEKA POLITECHNIKI
WARSZAWSKIEJ

Nr. Inwent.

876



Rys. 189 — Linje Lüdersa na powierzchni wytrzymałościowej (Hartmann, 1896)

Skutki zgniotu. Rozpadanie się kryształów pod wpływem działania mechanicznego nazywamy zgniotem. Zgniót wywołany zostaje przez wyciąganie, walcowanie, młotowanie, wytłaczanie, a także inne tego rodzaju odkształcenia.

Rozpadanie się układu krystalicznego nie może być zmierzone bezpośrednio; zmuszeni tedy jesteśmy wybrać, dość dowolnie zresztą, metodę pośrednią, któraby wskazywała stopień zgniotu.

Jeśli jedynym skutkiem działania mechanicznego jest zmniejszenie się przekroju próbki, jak przy wyciąganiu, a także niekiedy przy walcowaniu, wówczas możemy mierzyć stopień zgniotu procentowym zmniejszeniem się przekroju w stosunku do

pierwotnego przekroju. Zatem miarą zgniotu jest

$$\frac{S-s}{S} \cdot 100,$$

gdzie S oznacza przekrój próbki przed odkształceniem, a s po odkształceniu. Np. zgniót 50%-owy odpowiada zmniejszeniu się przekroju do połowy, zgniotu 100%-owego nie można osiągnąć, gdyż odpowiada on zmaleniu przekroju do zera. Ten właśnie sposób mierzenia zgniotu przyjmujemy, jako dogodniejszy od innych.

Niektórzy autorowie odnoszą zmniejszenie się przekroju nie do pierwotnego przekroju (S), lecz do przekroju zredukowanego (s); zmniejszenie się przekroju do połowy odpowiada w tym wypadku zgniotowi 100%-owemu, zaś zmalenie przekroju do zera odpowiadałoby zgniotowi nieskończenie wielkiemu.

Zgniotu, spowodowanego przez wytłaczanie lub kucie młotem, nie można już mierzyć zmniejszeniem się przekroju, lecz należy go odnieść pośrednio do skali dla próbek wyciąganych przez pomiar zmiany własności mechanicznych.

Skutki zgniotu odbijają się na wszystkich prawie własnościach metali i stopów.

Wytrzymałość wzrasta skutkiem zgniotu, lecz wydłużenie przy rozerwaniu równocześnie maleje. Np. u mosiądzu, zawierającego 33% cynku (rys. 190), którego zgniot został spowodowany walcowaniem, granica sprężystości E , podobnie, jak wytrzymałość na rozciąganie R , wzrasta prawie proporcjonalnie do zgniotu; wydłużenie przy rozerwaniu $A\%$ maleje bardzo szybko aż do 30%-owego zgniotu, a potem znacznie powolniej. Widzimy na wykresie, że skutkiem 50%-owego zgniotu wzrasta granica sprężystości pięciokrotnie, wytrzymałość na rozciąganie prawie dwukrotnie, zaś wydłużenie dziesięćkrotnie się zmniejsza.

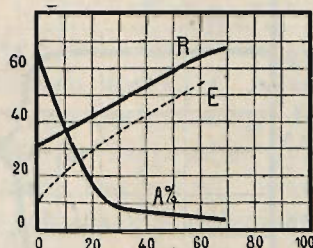
Twardość stopów, które uległy zgniotowi, mierzona metodą Brinella, wzrasta w przybliżeniu, jak wytrzymałość na rozciąganie (Matweew, 1911). Gęstość maleje o kilka dziesiątych procentu (Kahlbaum i Sturm, 1905).

Skutkiem zgniotu opór elektryczny wzrasta o kilka %, zaś współczynnik zmiany oporu z temperaturą maleje (Credner, 1913). Zdolność termoelektryczna metalu zgniecione go, ze względu na ten sam metal wyżarzony, może dojść do kilku dziesiątych mikrowolta (Noll, 1894). W ogniwie, utworzonym z metalu wyżarzonego i tegoż metalu, który uległ zgniotowi, ten ostatni elektryzuje się ujemnie i może dać napięcie elektrolityczne kilku miliwoltów (Spring, 1902).

Własności chemiczne zmieniają się też najczęściej wskutek zgniotu. Żelazo po zgniciu staje się mniej odporne na działanie odczynników i z tego właśnie powodu wychodzą na jaw przez makroskopję linie przesuwu albo płynięcia, które pozwalają stwierdzić rodzaj obróbki mechanicznej, jakiej doznał metal (rys. 29 i 30). Te linie przesuwu są to części, które najbardziej uległy zgniotowi i wskutek tego zostały najwięcej wyżarte (Goerens, 1913). Miedź natomiast staje się wskutek zgniotu bardziej odporna na działanie odczynników (Martens i Heyn, 1912).

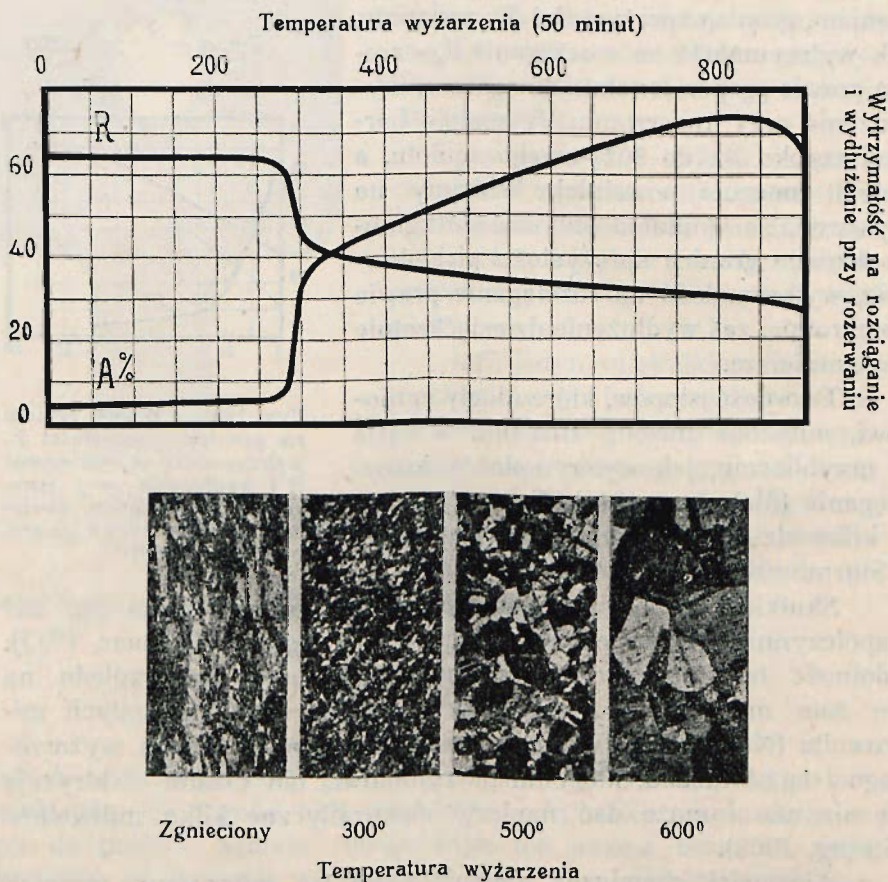
Skutki wyżarzenia. Weźmy, by przedstawić rzecz na konkretnym przykładzie, mosiądz, zawierający 33% cynku, o zgniciu

$$\text{Zgniot} = \frac{S - s}{S} \cdot 100$$



Rys. 190 — Wpływ zgniotu na granicę sprężystości E , wytrzymałość na rozciąganie R i wydłużenie przy rozerwaniu A mosiądzu, zawierającego 33% cynku (Grard, 1909)

56%-owym i przypatrzmy się, jaki wpływ wywiera wyżarzanie do rozmaitych temperatur na jego mechaniczne własności (rys. 191 i 192).



Rys. 191 i 192 — Wpływ temperatury wyżarzania u zgniecionego mosiądzu, zawierającego 33% cynku. *Na górze*: wpływ na wytrzymałość na rozciąganie (R) i na wydłużenie przy rozerwaniu (A); *na dole*: wpływ na wielkość kryształów (Gard, 1909)

Aż do 250° wpływ wyżarzania nie jest widoczny i stop zachowuje budowę, przedstawioną na pierwszej mikrografii poniżej wykresu, gdzie widzimy kryształy wydłużone i rozpadnięte wskutek walcowania.

Skutkiem wyżarzania między 250° a 350°, wytrzymałość na rozciąganie R maleje bardzo szybko, zaś wydłużenie przy rozerwaniu A równocześnie wzrasta. W tym to właśnie zakresie tempera-

tur — według hipotezy Tammanna (1914) — wytrzymałość łusek, powstałych przez rozpadnięcie się kryształów, staje się mniejsza od ich napięcia powierzchniowego; następuje więc koagulacja łusek i wtórna krystalizacja stopu. W samej rzeczy, na drugiej mikrografii widzimy odmienną budowę stopu, wyżarzonego do 300° , budowę utworzoną przez małe kryształki, rozmaicie zabarwione z powodu ich różnej orientacji.

Proces wtórnej krystalizacji nie dobiega jednak do końca pomiędzy temi temperaturami, gdyż u grubszych łusek, a zatem bardziej wytrzymałych, napięcie powierzchniowe ma przewagę dopiero w wyższych temperaturach. Wyżarzanie do temperatur wyższych od 350° prowadzi zatem do nowego stanu równowagi, powodując wtórna krystalizację coraz to grubszych łusek i zmieniając, skutkiem tego, własności mechaniczne stopu. Równocześnie wzrasta wielkość kryształów, jak to widać na mikrografjach stopów wyżarzonych do 500° i 600° . Zupełne wyżarzanie następuje u tego mosiądzu dopiero około 800° .

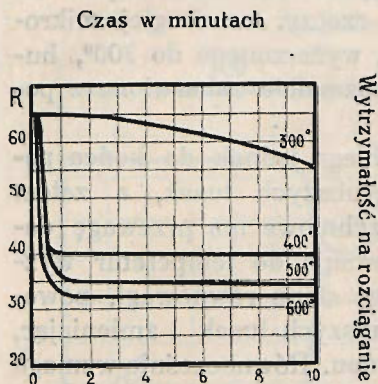
Wzrost kryształów nie jest wywołany, lecz znacznie przyspieszony przez zgniot i wyżarzanie. Jest to zjawisko normalne, gdyż najbardziej stałym układem krystalicznym jest ten, który posiada najmniejszą powierzchnię (Cohen i Inouye, 1910). Stan równowagi ostatecznej zostaje więc osiągnięty jedynie po ujęciu każdej fazy w jeden kryształ.

Na ostatniej mikrografii widzimy pasy, przerzynające kryształy, ograniczone prostymi równoległymi. Są to *smugi*, charakterystyczne dla metali wyżarzonych po zgnioście, a utworzone prawdopodobnie przez łuski krystaliczne zawarte między dwiema płaszczyznami łupliwości.

Temperatura początku wtórnej krystalizacji nie zależy prawie wcale od stopnia zgniotu, lecz zmienia się zależnie od metalu lub stopu; dla żelaza np. wynosi 520° (Goerens, 1913), zaś dla miedzi około 180° (Grard, 1909).

Czas trwania wyżarzania prawie wcale nie zależy od stopnia zgniotu, lecz zmienia się w znacznej mierze z temperaturą. Przedstawiając wytrzymałość na rozciąganie naszego mosiądzu, jako funkcję czasu wyżarzania przy różnych temperaturach (rys. 193), możemy się przekonać, że, o ile przy 300° wyżarzanie jest jeszcze powolne, to przy 400° staje się już widoczne po kilkudziesięciu sekundach, a po upływie 1 minuty, mniej więcej, stop zbliża się do stanu względnej równowagi, zmieniającego się następnie bardzo powoli.

Każdy stan niezupełnego wyżarzenia (odpuszczenia) przy pewnej temperaturze określa nie tylko własności mechaniczne i wielkość krysztalów w stopie, lecz także wszystkie inne własności, które uległy zmianie skutkiem zgniotu.



Rys. 193 — Wpływ czasu wyżarzania na wytrzymałość mosiądzu, zawierającego 33% cynku i zgniecionego o 60% (Grard, 1909)

Oto, jak się zmienia przez wyżarzanie opór elektryczny (r_0) i współczynnik zmiany oporu z temperaturą (α) cynku, pomiędzy 0° a 100° (Benoit, 1873).

	r_0	α
cynk po zgnieciu	100	0·0037
wyżarzony do 100°	97	0·0038
„ do 240°	79	0·0040
„ do 360°	78	0·0043

Cynk jest szczególnie czuły na zgniot; u innych metali zmniejszenie się oporu, skutkiem wyżarzenia po zgnieciu, nie przenosi 3% do 4%.

Poboczne zjawisko, począwszy od pewnej temperatury wyżarzenia, zahamowuje zmniejszanie się oporu, a następnie powoduje jego wzrost. Według Crednera (1913) przyczyną tego zjawiska jest oddzielenie się kryształów od siebie, wywołane przez ogrzanie do wysokich temperatur.

Równowaga zgniecionego, lub niezupełnie wyżarzonego, stopu jest tylko pozorna i odpowiada, w rzeczywistości, powolnej reakcji. W zwyczajnej temperaturze można wyśledzić tę reakcję ścisłymi pomiarami, np. oporu elektrycznego, które stwierdzają postęp kryształizacji w przeciągu kilku miesięcy. Podczas względnej równowagi, do której prowadzi wyżarzanie przy pewnej określonej temperaturze, reakcje odbywają się mniej powoli; np. u mosiądzu stan, który się osiąga po minucie przy 500°, można otrzymać po godzinie, mniej więcej, przy 450°. Zgniot doprowadza więc metal do stanu równowagi niestalej, dążącego przez wtórną kryształizację do stanu równowagi stałej.

Wzrost kryształów żelaza. Umiarkowany zgniot bardziej pobudza wzrost kryształów aniżeli zgniot bardzo mocny. Prawdopodobnie w pierwszym przypadku łuski przylepiają się do sąsiednich kryształów, jeszcze nie rozpadniętych, przez co one się powiększają; jeśli zaś zgniot jest bardzo duży, wszystkie kryształy są mniej lub

więcej rozpadnięte, a łuski poczynają się skupiać, tworząc małe kryształki, później dopiero urastające.

Zjawisko to można obserwować na żelaznej probierce wytrzymałościowej wyżarzonej po rozerwaniu (rys. 194). Największe kryształy występują w miejscach, gdzie granica sprężystości właśnie została przekroczona; natomiast na końcu, gdzie probierka uległa najmocniejszemu zgniotowi, kryształy są tak drobne, jak w nienaruszonym metalu.

Temperatura, najbardziej sprzyjająca wzrostowi kryształów żelaza i stali po zgniocie, ograniczona jest punktami przełomowymi A_1 i A_3 (patrz str. 156). Stosuje się ta obserwacja nie tylko do metali wyżarzonych po zgniocie na zimno, ale również do zgniotu przy przeciąganiu lub walcowaniu na gorąco.

Naprzykład, robiąc odciski twardości na żelaznym pręcie ogrzanym z jednego końca, można następnie stwierdzić bardzo nierównomierny wpływ tych odkształceń na budowę (rys. 195). Pod odciskami wykonanymi przy temperaturze niższej od 700° albo wyższej od 900°, budowa metalu została stosunkowo nieznacznie zmieniona; natomiast, w obrębie tych temperatur znać silny wpływ zgniotu na krystaliczną budowę otaczającego metalu.

Zdarzają się wypadki, że stal o dobrych własnościach mechanicznych nabywa takiej kruchości, po walcowaniu w obrębie temperatur przełomowych, że sztaby jej łamią się padając na ziemię (Charpy, 1910). Ażeby uniknąć tej „choroby zgniotu“ należy wykonać ostatnie walcowanie przy temperaturze wyższej od punktu przełomowego A_3 lub ogrzać po walcowaniu do tej temperatury.

Teorie zgniotu. Istnieją dwie teorie, wyjaśniające zmianę własności skutkiem zgniotu.

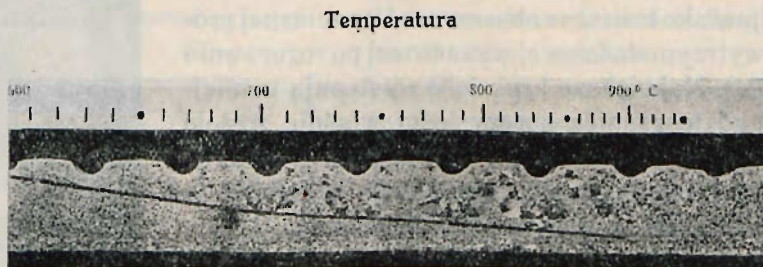
Teoria Beilbygo (1905) przyjmuje, że wskutek zgniotu część metalu przechodzi w stan bezpostaciowy, jak ciecz przechłodzona. W metalu, który uległ zgniotowi, współlistnieją zatem dwie fazy i można go porównać do masy w części szklistej, a w części krystalicznej.

Hipoteza ta wyjaśnia bez trudności zmianę własności przez zgniot i wyżarzenie, gdyż wytrzymałość, twardość i opór



Rys. 194 — Żelazna probierka wytrzymałościowa wyżarzona po rozerwaniu przez 40 minut przy 870°. Linia pozioma wskazuje obręb, poza którym granica sprężystości została przekroczona (Chapell, 1914)

elektryczny ciał szklistych maleje zazwyczaj wskutek krystalizacji, zaś gęstość i wydłużenie przy rozerwaniu równocześnie wzrasta.



Rys. 195 — Zmiana wielkości kryształów w żelazie odkształconem przy rozmaitych temperaturach. Czarna linia wskazuje granicę wpływu odkształcenia (Chapell, 1914)

Przeciwko tej hipotezie przemawia niezgodność z prawem równowagi chemicznej, gdyż, aby przyjąć istnienie bezpostaciowego metalu w stanie przechłodzenia, trzeba również założyć, że przechodzi on w ciecz podczas zgniotu, tymczasem ciśnienia, wchodzące w grę, zgola na to nie wystarczają, jak to wykazuje wzór Clausiusa (str. 54).

Teorja Tammanna (1912) wychodzi z całkiem innego punktu widzenia; przyjmuje ona, że skutkiem rozpadnięcia się kryształu jest zastąpienie jednego dużego kryształu szeregiem małych kryształków. Będzie zatem tylko jedna faza w zgnieciowym stopie i nie potrzeba uwzględniać prawa równowagi chemicznej.

Wytlumaczenie, na podstawie tej hipotezy, zmiany własności skutkiem zgniotu nie jest pozbawione niejakich trudności. A więc znaczne powiększenie się wytrzymałości na rozciąganie pochodziłoby jedynie z bardziej jednorodnej budowy stopu. Powiększeniu się twardości skutkiem zgniotu przeczy Tammann. W celu wytłumaczenia wzrostu oporu elektrycznego musi Tammann uciec się do założenia, że u wszystkich kryształów opór jest różny, zależnie od ich orientacji, jakkolwiek tego przypuszczenia, w zastosowaniu do układu regularnego, do którego należy znaczna większość metali, nie potwierdza ani doświadczenie, ani teorja (por. str. 117).

Hipoteza Beilbyego zdaje więc lepiej sprawę ze zmian, wywołanych przez zgniot i sądzimy, że wystarczyłoby zmienić jej interpretację, by pozbyć się zarzutu sprzeczności z prawem i równowagi.

Jeśli zdefiniujemy stan stały jako krystaliczny, zaś stan ciekły lub szklisty jako bezpostaciowy (str. 168), to łuski, które są produktami rozpadnięcia się kryształów, nie należą do żadnej z tych dwu kategorii. Nie należą do stanu bezpostaciowego, gdyż posiadają jeszcze pewną budowę, lecz budowa ta nie jest krystaliczna, gdyż stosunek wymiarów, charakterystyczny dla pierwotnego kryształu, nie jest już w niej zachowany. Byłoby więc uzasadnionem założenie, że te produkty rozpadnięcia tworzą stan przejściowy między stanem bezpostaciowym a krystalicznym. Charakterystykę stanów przejściowych stanowi fakt, iż nie istnieją dla nich warunki stałej równowagi, a obserwuje się je tylko dzięki powolności ich przemiany. Wogóle

stany przejściowe podlegają specjalnym, im właściwym, prawom i stosowanie wzoru Clausiusa do łusek byłoby równie nieuzasadnione, jak np. stosowanie praw dla roz-
tworów do kolloidów, które — zdaje się — również należą do ciał przejściowych.
Powieśmy więc, że skutkiem zgniotu metale przechodzą w *stan lamelarny*, który nie
jest stanem równowagi i przypomina niektórymi własnościami stan bezpostaciowy.