

LUDWIK ŻARNOWSKI
INŻYNIER-TECHNOLOG

GORĄCA PRZERÓBKA PLASTYCZNA ŻELAZA I STALI

(KUŹNICTWO I WALCOWNICTWO)

**SKRÓT WYKŁADÓW
WYGŁASZANYCH NA WYDZIALE MECHANICZNYM
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

**CZĘŚĆ I.
WŁASNOŚCI PLASTYCZNE METALI
NAGRZEWANIE—PIECE GRZEWcze**

**WYDAWNICTWO ZAKŁADÓW OSTROWIECKICH
OSTROWIEC 1936**

LUDWIK ŻARNOWSKI
INŻYNIER-TECHNOLOG

GORĄCA PRZERÓBKA PLASTYCZNA ŻELAZA I STALI

(KUŹNICTWO I WALCOWNICTWO)

SKRÓT WYKŁADÓW
WYGŁASZANYCH NA WYDZIALE MECHANICZNYM
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

CZEŚĆ I.
WŁASNOŚCI PLASTYCZNE METALI
NAGRZEWANIE — PIECE GRZEWOCZE

WYDAWNICTWO ZAKŁADÓW OSTROWIECKICH
OSTROWIEC 1936

NA PRAWACH RĘKOPISU.

L. ŻARNOWSKI.

PRZEDMOWA.

Do moich słuchaczy!

Doświadczeni profesorowie twierdzą, że nie dobrze jest wydawać podręczniki dla swoich słuchaczy. Niemniej jednak zdecydowałem się wydać takowy, a popchnęły mnie do tego takie motywy:

1) Absolutny brak dzieł z dziedziny gorącej obróbki plastycznej żelaza i stali w języku polskim.

2) Zbyt obszerne i rozrzucone, a przytem bardzo kosztowne dzieła w językach obcych.

3) Wasz chronicznie ciężki stan materialny.

Jednak podręcznik ten nie mógłby być wydany (przytem po tak niskiej cenie), gdyby nie poparcie tak moralne jak i materialne ze strony Zarządu Głównego Sp. Akc. Zakładów Ostrowieckich, zawdzięczając któremu, mam nadzieję doprowadzić zamierzone dzieło do końca.

Dla tego też należą się tutaj wyrazy naszej wspólnej wdzięczności Zarządowi Głównemu, powyższych Zakładów, przedewszystkiem w osobie Dyrektora A. Zalewskiego, (absolwenta Politechniki Warszawskiej) jak również inżynierom Zakładów Ostrowieckich i innych hut, którzy w ten lub ów sposób pomagali i pomagają mnie w urzeczywistnieniu moich zamierzeń.

L. ŻARNOWSKI.

WSTĘP.

Gorąca przeróbka plastyczna stanowi część technologii metali, która zajmuje się nadawaniem żadanego kształtu metalom za pomocą odpowiedniego ciśnienia, wywieranego na metal po doprowadzeniu go do stanu plastycznego drogą nagrzewania.

Żądany kształt nadaje się za pomocą poszczególnych uderzeń ciałem obcym (młotem) lub za pomocą ciśnienia statycznego (prasa). Tego rodzaju przeróbką zajmuje się k u ż n i c t w o.

Metal, doprowadzony do stanu plastycznego, może być również przeciągany przez obracające się rolki (walce) w postaci blach lub długich pasów o jednakowym przekroju na całej długości; tego rodzaju przeróbka należy do w a l c o w n i c t w a.

Oprócz procesów czysto mechanicznych (zmiana kształtu), odbywają się w przerabianym metalu jednocześnie procesy strukturalne, a mianowicie:

- 1) zgrzewanie wszelkich nieuszczelności, pustek (pęcherzy) znajdujących się w surowym metalu;
- 2) niweczenie pierwotnej, niekorzystnej struktury i stworzenie nowej o wyższych własnościach mechanicznych.

A więc zadaniem gorącej przeróbki plastycznej jest nietylko otrzymywanie pewnych form geometrycznych, lecz jednocześnie ulepszanie własności mechanicznych przerabianego metalu.

Z powyższego widzimy, że program gorącej obróbki plastycznej obejmuje:

- 1) doprowadzenie metalu do stanu plastycznego, czyli n a g r z e w a n i e metalu;
- 2) nadawanie form geometrycznych drogą kucia (kuźnictwo);
- 3) nadawanie form geometrycznych drogą walcowania (walcownictwo).

Stosownie do tego kurs nasz podzielimy na trzy zasadnicze części: nagrzewanie, kuźnictwo i walcownictwo.

ERRATA.

STRONA	WIERSZ	WYDRUKOWANO	POWINNO BYĆ
29	13 z góry	CO	CO ₂
32	11 „ „	Na ark. VI - A pod fig 1 i 2	Na ark. VIa pod fig. 5 i 6
32	5 od dołu	fig. 5	fig. 4
32	4 „ „	fig. 11-a	fig. 31-a
41	20 „ „	Na Ark. VI Atlasu, fig. G	Na Ark. VI Atlasu, fig. 6.
45	23 z góry	Na Ark. XII, fig. 3	Na Ark. XII, fig. 5.
45	15 z dołu	Na Ark. XII fig 2	Na Ark. XII, — fig. 3.
45	4 „ „	Na Ark. IV - a, fig. 4.	Na Ark. VI - a, fig. 4
49	3 od dołu	3 pary palników	2 pary palników
56	14 od góry	chodkowa część rusztu	Schodkowa część rusztu
56	21 „ „	(Ark. XVIII, fig. 7)	(Ark. XVII, fig. 7)
57	6 „ „	(rys. 60)	(rys. 59)
57	10 „ „	(rys. 61)	(rys. 60)

ROZDZIAŁ I.

Własności plastyczne metali.

1. Ciśnienie wyciekania.

Tak w kuźnictwie, jak i w walcownictwie, będziemy mieli do czynienia z metalem, znajdującym się w stanie plastycznym. Wobec tego musimy przypomnieć sobie własności ciał plastycznych.

Z kursu wytrzymałości materiałów wiadomem jest, że pod działaniem sił zewnętrznych, (np. rozciągających, lub ściskających) wiele z metali, przy osiągnięciu pewnego natężenia na jednostkę powierzchni, zaczynają wykazywać odkształcenie trwałe; materiał zaczyna płynąć, przy czem natężenie to nie wzrasta, lecz często nawet spada (rys. 1). Napięcie, przy którym zaczynają się zjawiać odkształcenia trwałe, nazywamy granicą płynności. Stan metalu poza granicą płynności nazywamy plastycznym, samo zaś zjawisko płynięcia nazywamy wyciekaniem metalu. Zjawisko to po raz pierwszy było zbadane przez Louis Lemery (w 1726 r.) i Reaumur'a.

Badaniem tego zjawiska na szerszą skalę zajmował się H. Tresca (L'ecoulement des corps solides, — Comptes rendus de l'Academie des sciences — 1864 r.). Tresca wykonywał swoje doświadczenia nad ołowiem. W tym celu brał cylinder, złożony z kilkunastu krążków ołowianych, ogólnej wysokości 100 mm. (rys. 2).

Cylinder ten umieścił między dwiema metalowymi płytami, w których znajdowały się otwory średnicy 20 mm. Przez te otwory przechodził trzpień, który wyciskał część ołowiu w postaci cylinderka 20 mm. Otóż okazało się, że cylinder ten miał wysokość „h” o 30 mm. mniejszą, niż wysokość cylindra „H”.

Ponieważ gęstość metalu tego cylindra nie zmieniła się, natomiast zmieniła się w nim grubość poszczególnych warstw, mianowicie górne warstwy, za wyjątkiem pierwszej, znacznie ścieniały, więc należy przypuścić, że materiał ten przesunął się na boki cylindra.

Drugie doświadczenie Tresca polegało na tem, że wziął on żeliwny cylinder (rys. 3) z denkiem, w którym był okrągły otwór. W cylindrze tym ułożył krążki ołowiu jednakowej grubości i zgóry naciskał je tłokiem. Pod działaniem tego ciśnienia ołów wyciekał z otworu, przybierając kształt pokazany na rys. 3. Jeżeli zrobić otwór w cylindrze zboku, to kształt wyciekającego ołowiu przybierze wygląd podany na rys. 4, przyczem ołów będzie wyciekał jak z górnych warstw tak i z dolnych co wskazuje na równomierny rozkład ciśnienia wewnątrz ściskanego metalu.

Z doświadczeń przeprowadzonych przez Tresca nad ołowiem i innymi miękkimi metalami można wnioskować, że przy pewnem ciśnieniu metale nabywają własności plastyczne, tracąc swoją sprężystość. W tym stanie oddzielne cząsteczki metalu mają dążność przesuwania się w kierunku najmniejszego oporu, t. j. twarde ciało nabywa własności ciał płynnych — metal zaczyna ciec.

Natężenie metalu, przy którym rozpoczyna się to zjawisko, Tresca nazwał ciśnieniem wyciekania.

Z doświadczeń tych również ustalono, że gęstość, a więc i objętość metalu przy wyciekaniu nie ulega zmianie.

Pozatem przyjmujemy, że skoro zachodzi zjawisko wyciekania, to wtenczas w metalu przez cały czas ciśnienie wyciekania pozostaje stałym, o ile wyciekanie to odbywa się przy małych szybkościach.

2. Wielkość ciśnienia wyciekania.

Z wykresu na rys. 1 widzimy, iż aby doprowadzić metal do stanu plastycznego, trzeba go poddać nieraz bardzo dużemu ciśnieniu. Np. żelazo, dla którego natężenie przy rozerwaniu wynosi 35—40 kg/mm², ma granicę płynności 18—20 kg/mm²; dla stali R = 55—60 kg/mm² granica płynności 25—30 kg/mm². Z tego wnioskujemy, że chcąc uzyskać trwałe odkształcenia w żelazie lub stali, musielibyśmy stosować ogromne ciśnienia, czyli wkładać ogromną pracę, potrzebną do osiągnięcia żądanej deformacji.

W celu obniżenia granicy t_0 — stosujemy nagrzewanie metalu. Przy nagrzewaniu znacznie obniża się tak t_0 , jak i t_r , jednak pole między t_0 , i t_r może być większe w gorącym stanie niż w zimnym, w ten sposób przez odpowiednie nagrzewanie metalu, popierwsze, obniżamy t_0 powtórę zwiększamy pole stanu plastycznego.

W niniejszym kursie będziemy mieli do czynienia z metalem, doprowadzonym do stanu plastycznego za pomocą odpowiedniego nagrzania. Każdy z metali ma swoją temperaturę, przy której jest najbardziej plastycznym. Niektóre z metali, jak miękki brąz, mosiądz, są najbardziej plastycznymi przy normalnej temperaturze; niektóre przy słabem nagrzaniu np. cynk przy $t = 120—150^\circ$, wreszcie żelazo wymaga wysokich temperatur (ponad 800°).

Ponieważ będziemy mieli do czynienia z metalem, doprowadzonym do stanu plastycznego za pomocą nagrzewania do wysokich temperatur, potrzebne nam będą dane dotyczące wielkości ciśnienia wyciekania przy tych temperaturach.

Otóż bezpośrednim określeniem wielkości ciśnienia wyciekania przy wysokich temperaturach zaczęto zajmować się dopiero w ostatnich czasach i danych jest jeszcze niedużo; natomiast dużo było badań nad określeniem wytrzymałości żelaza i stali na rozerwanie przy wysokich temperaturach.

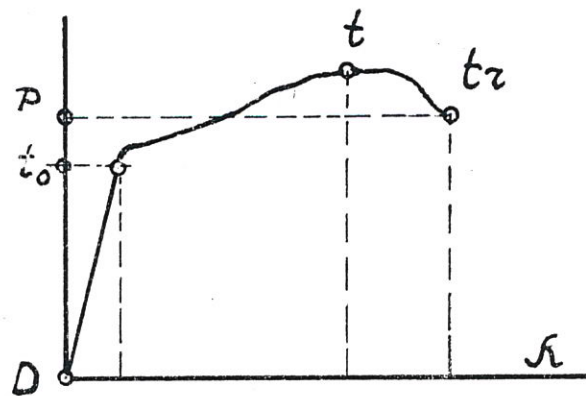
Jeden z pierwszych tego rodzaju badania przeprowadził Kollmann („Die Festigkeit des erhitzten Eisens“ 1880).

Niżej na tabeli I. podane są wyniki jego badań.

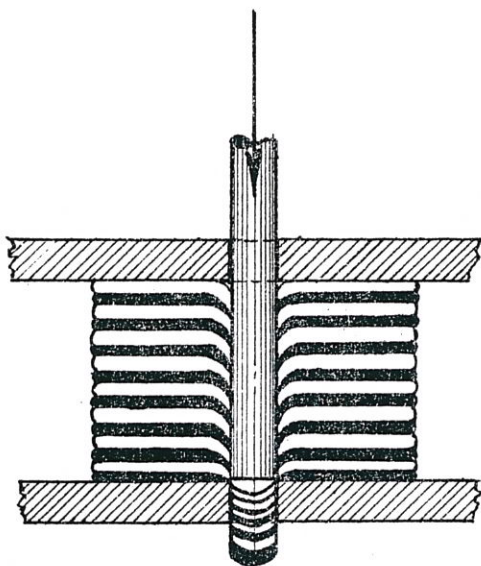
T A B E L A I.

Wytrzymałość na rozerwanie żelaza i stali R_t przy wysokich temperaturach wg. Kollmanna (w kg/mm²).

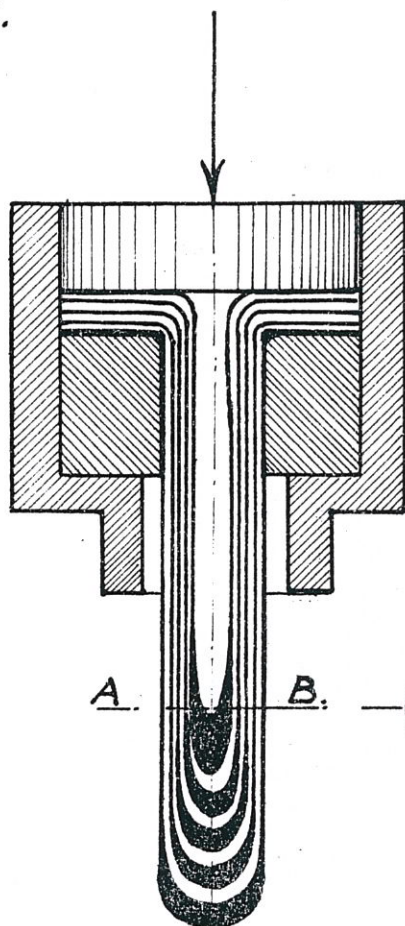
T_0	Żelazo	Stal	T_0	Żelazo	Stal
10	35,0	50,0	900	2,2	5,4
600	7,0	15,0	950	1,9	4,7
650	6,9	12,5	1000	1,5	4,0
700	6,2	10,5	1050	1,3	3,6
750	4,9	9,1	1100	1,2	3,2
800	4,0	7,9	1200	—	2,4
850	2,9	6,5	—	—	—



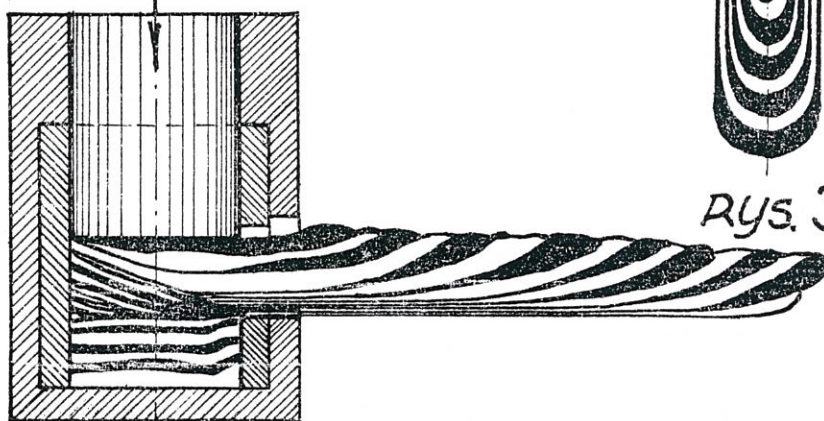
Rys. 1.



Rys. 2.



Rys. 3.



Rys. 4.

Jeżeli na osi odciętych odłożymy temperatury, a na osi rzędnych odpowiadające tym temperaturom wielkości wytrzymałości na rozerwanie, to otrzymamy parabolę, równanie której dla wypadku stali będzie miało wygląd ¹⁾

$$R_t = 15 - \sqrt{0,283 (t - 600)} \quad \dots \quad (1)$$

Geuze (Laminage du fer et de l'acier — 1900) w swoich badaniach znalazł:

T A B E L A I I.

T°	Stal	Żelazo
120	50,50	38,5
850	11,25	8,5
1050	6,00	4,5
1200	2,10	1,6

Zależność R_t od temperatury t_0 można dla danych Geuze'a przedstawić równaniem paraboli (dla stali): ¹⁾

$$R_t = 23 - \sqrt{0,50 (t - 600)} \quad \dots \quad (2)$$

Jednak określenia temperatury, z braku w owych czasach odpowiednich pyrometrów, odbywały się na oko, przeto wyniki te nie są ściśle. Z nowszych możemy wskazać na badania Brinell'a, Robina i innych. Z najnowszych i najbardziej precyzyjnie przeprowadzonych zasługują na uwagę badania E. Dupuy, opublikowane w „Revue de Metallurgie“ z r. 1921, str. 331. Na tabl. 3 podane są (w zaokrągleniu) wyniki badań Dupuy nad stalą różnej twardości. Na tej tabeli podajemy również wyniki badań prof. Broniewskiego i Krupkowskiego nad mosiądzem i miedzią. Na rys. 4-a mamy także dane w postaci wykresu dla glinu. Jak zaznaczyliśmy, są to cyfry dotyczące się naprężeń przy rozerwaniu. Dla naszych celów potrzebne są cyfry przy ściskaniu.

Ze względu na to, że doświadczeń na ściskanie jest bardzo mało (Fuchs, Z. d. V. d. Ing. 1915, str. 915), po wtóre — trudno jest uchwycić te wielkości przy ściskaniu, po trzecie — różnice te nie są duże, przynajmniej przy deformacjach, odbywających się przy niedużych szybkościach, można przyjąć, że wielkości naprężenia przy rozerwaniu odpowiadają wielkościom ciśnienia wyciekania, przy odpowiednich temperaturach i małych szybkościach, czyli t. zw. ciśnieniu wyciekania statycznemu. Dlatego w dalszym ciągu będziemy posługiwać się tabelkami Dupuy.

Z tabelki tych widzimy, jak znacznie spada wytrzymałość na rozerwanie, czyli statyczne ciśnienie wyciekania, ze wzrostem temperatury.

Stąd możemy wyprowadzić wniosek: żeby mieć możliwie plastyczny metal, t. j. dający się najłatwiej obrabiać, trzeba jaknajmocniej zagrzać. Otóż tak nie jest. Żelazo i stal, w zależności od swego składu chemicznego, mają ściśle określone granice temperatur nagrzewania. Po przekroczeniu tej granicy wzwyż — materiał będzie przegrzany (spalony) i nie daje się już obrabiać (rozsypuje się), po przekroczeniu temperatury w dół niżej punktu A_1 materiał otrzymuje zgmiot, ujemnie wpływający na własności mechaniczne metalu. Więc każdy gatunek żelaza i stali należy obrabiać w ściśle określonych granicach cieplnych, w zależności od składu chemicznego.

¹⁾ w/g prof. Wiereszczagina.

T A B E L A I I I.

Wytrzymałość na rozerwanie metali przy wysokich temperaturach.

I. STAL.

Według danych E. Dupuy (Revue de Met. — 1921 — str. 331).

Temperatura	R kg/mm ²	R kg/mm ²	R kg/mm ²
15°	40	60	80
600°	12	25	37,5
700°	8,5	15	25
800°	6,5	11	16,5
900°	4,5	7,5	11
1000°	3,0	5,5	7,5
1100°	2,5	3,5	5,0
1200°	2,0	2,5	3,5
1300°	1,5	2,0	2,5

II. MIEDŹ ELEKTROLIT.

Według Inż. A. Krupkowskiego.

Temp.	Rkg/mm ²
18°	24,4
107°	21,5
208°	19,0
285°	17,3
399°	14,3
485°	12,7
623°	6,7
720°	4,3
818°	2,7
900°	1,7
1007°	0,8

III. MOSIĄDZ (40% Zn.)

Według prof. Broniewskiego i Wesółowskiego.

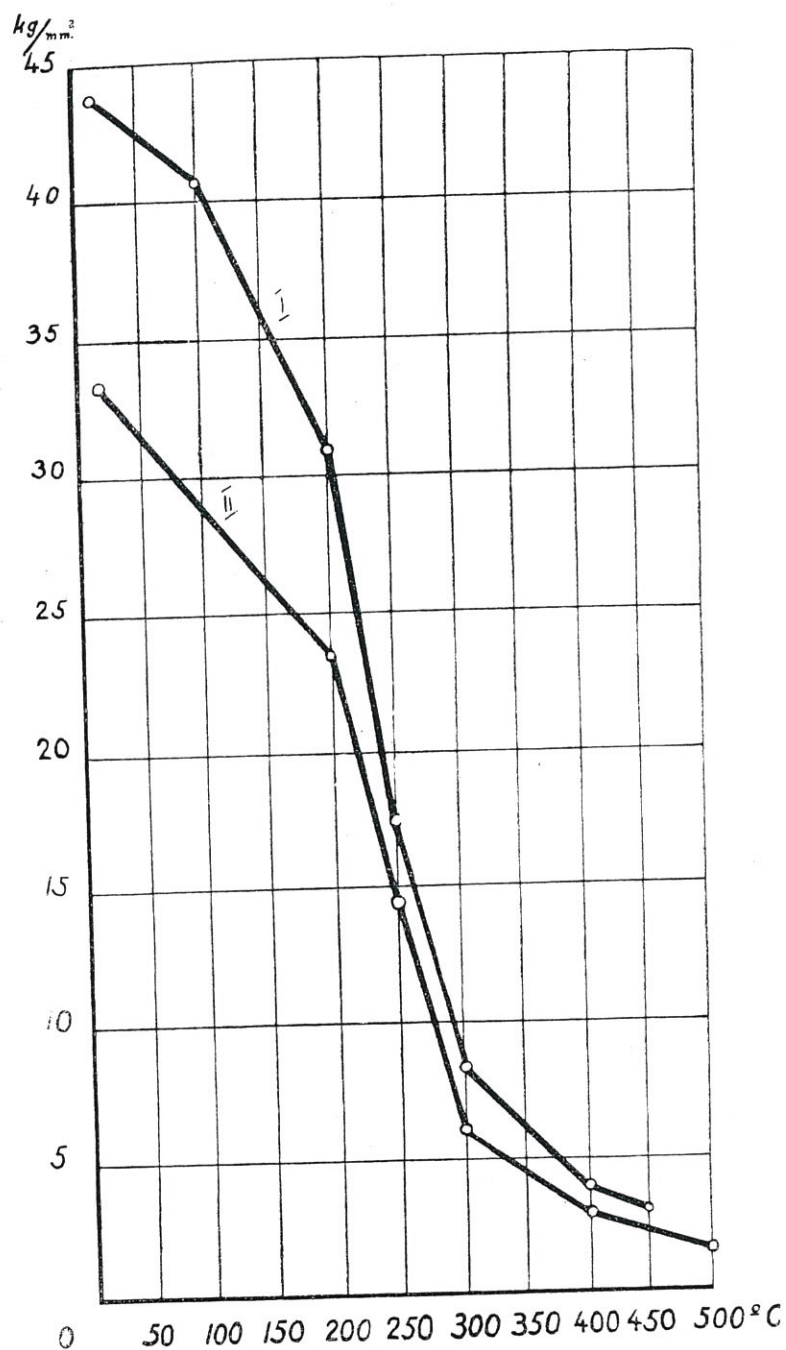
Temp.	Rkg/mm ²
20°	40,5
100°	38,5
206°	34,4
310°	30,2
400°	21,2
454°	16,7
500°	9,5
560°	3,7
613°	2,9
649°	1,5
704°	1,0

Oprócz temperatury na wielkość ciśnienia wyciekania, ma wpływ szybkość wyciekania, czyli szybkość deformacji. Tresca i inni określali ciśnienie wyciekania przy małych szybkościach deformacji i dlatego też tego rodzaju ciśnienie nazywamy statycznym. W praktyce interesuje nas wielkość ciśnienia wyciekania, która powstaje przy deformacjach, odbywających się przy większych lub mniejszych szybkościach (kucie, walcowanie, prasowanie). Tego rodzaju ciśnienie wyciekania nazywamy dynamicznym, czyli oporem plastycznym przy deformacji. Badania Robin'a Ellis, Haudremout'a Siebla i innych wykazały, że przy zwiększeniu szybkości deformacji wzrasta i ciśnienie wyciekania, czyli opór plastyczny i przy bardzo dużych szybkościach (wypadek młotów szybkobieżnych) wielkość ta może powiększyć się wielokrotnie.

Niżej, na wykresie (4-b), podajemy wielkość oporu plastycznego, t. j. tego oporu, który wykazuje metal przy swej deformacji, w zależności od szybkości tejżej.

Linje na tym wykresie oznaczają wielkość oporu plastycznego, otrzymanego w takich warunkach:

Wytrzymałość na zerwanie glinu.
w/g Zeerleder-Revue de Metallurgie — 1934 — 118 (Extraits).



- I. Si = 1,0, Fe < 0,3 Mn = 0,7 Mg = 0,6; reszta Al; R = 34; j = 12 %
 II. Si = 1,0, Fe < 0,3 Mn = 0,8 Mg = 0,5; Cu = 4,9; R = 49; j = 10 %

Rys. 4-a.

Linja 1—1: Ciśnienie statyczne (prasa): zgniot 30% w ciągu 6 sec.

Linja 2—2: Walcowanie: zgniot 30% w ciągu 0,09 sec.

Linja 3—3: Stłaczanie pod młotem: zgniot 30% w ciągu 0,005 sec.



Rys. 4-b.

Z wykresu tego widzimy, jak znacznie wpływa szybkość deformacji na wielkość oporu plastycznego.

Z powyższego wynika, że właściwy opór plastyczny q powinien być określony ze wzoru

$$q = \alpha \cdot R_t \quad \dots \dots \dots (3)$$

gdzie R_t jest wytrzymałość na rozierwanie przy temperaturze t , którą to wielkość bierzemy z tablicy Dupuy lub innych.

α — współczynnik, który uwzględnia charakter deformacji. Jak zobaczymy dalej, współczynnik ten zależny jest nie tylko od szybkości deformacji, lecz i od wielu innych okoliczności, w których odbywa się obróbka plastyczna.

LITERATURA.

1. H. Unkel. Über die Fließbewegung in plastischem Material.
2. A. Nádaí. Der bildsame Zustand der Werkstoffe.
3. E. Siebel. Formgebung im biegsamen Zustande.