

23237

433/6.

Inż. I. FESZCZENKO-CZOPIWSKI i Inż. J. GUSCHLBAUER.



**Własności wytrzymałościowe
ciężkich stali niklowych w temperaturach
wyższych od zwyczajnych.**

Odbitka z „Przeglądu Górniczo-Hutniczego”.

SOSNOWIEC
Druk. Edmund Mirek i S-ka
1931.

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
w KRAKOWIE
BIBLIOTEKA

III 23237

NZAB 6566

1000328210

Akc. Nr. 5555 / 53



165/XVI



Prof. Dr. Inż. FESZCZENKO-CZOPIWSKI i Inż. Met. JERZY GUSCHLBAUER
Zakład Metalografii Akademii Górniczej w Krakowie.

Własności wytrzymałościowe miękkich stali niklowych w temperaturach wyższych od zwyczajnych.

I

Z pracy Riley'a z r. 1889 dowiadujemy się, że stale niklowe były pierwszymi stalami specjalnymi.

Literatura o stalach niklowych jest specjalnie bogata. Ważniejsze prace są¹⁾: z r. 1889 — Osmonda nad punktami przełomowymi stali niklowych; w r. 1890 Hopkinson opisuje magnetyczne zachowanie się 25% stali niklowej; w r. 1896 ukazuje się praca Rudoloffa o własnościach wytrzymałościowych stopu żelazo-nikiel. W r. 1898 Guillaume bada rozszerzalność stali niklowych. Następny rok przynosi dwie wielkie prace Dumasa i Hatfielda nad stalami niklowymi. W r. 1903 ukazuje się kilka prac teoretycznych dotyczących stali niklowych, a między nimi prace Dumasa, Guillaume, Osmonda i Guilleta. Równoległe z badaniami nad własnościami wytrzymałościowymi stali niklowych ukazuje się w tym też roku praca Hatfielda nad stalami niklowo-manganowymi, zaś w r. 1905 pracuje Hatfield nad własnościami wytrzymałościowymi w temperaturach niższych od zwyczajnych.

Równocześnie pojawiają się prace Guertlera i Tammanna nad przebiegiem topienia stopu żelazo-nikiel określające krzywą topliwości dla układu Fe—Ni. W r. 1906 na międzynarodowym kongresie dla badań materiałów w Brukseli ogłasza Wedding wyczerpujący referat o stalach niklowych. Literatura stali niklowych z ostatnich lat dwudziestu jest bardzo obfita, z ważniejszych prac wspomnieć bodaj należy: Meyer'a o obróbce termicznej stali niklowych perlitycznych, P. Chevenarda o rozszerzalności (dilatometrii) stopów żelazo-nikiel i D. i A. Hansonów o stopach żelazo-nikiel wogóle.

II.

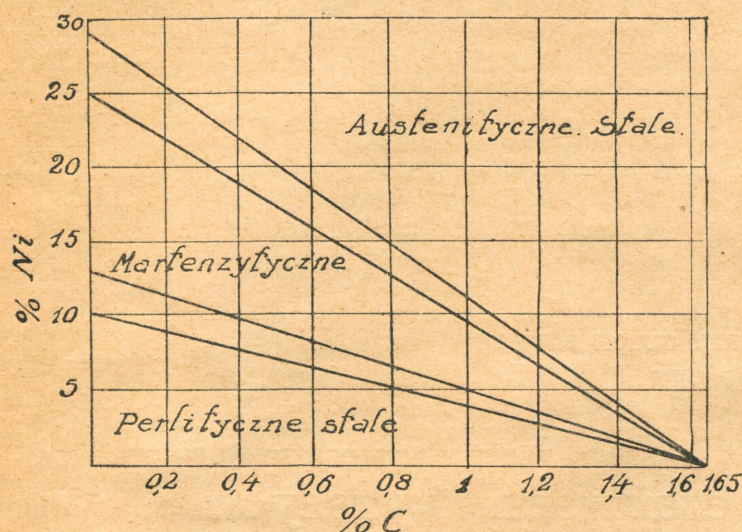
L. Guillet dzieli stale niklowe w zależności od zawartości węgla i niklu na trzy grupy: perlityczną, martenzytyczną i austenityczną (rys. 1), przejście z jednej grupy do drugiej zależy od zawartości procentowej węgla i niklu.¹⁾ Osmond uzależnia strukturę stali niklowych od procentowej zawartości węgla i niklu, w następujący sposób:

¹⁾ G. Mars, „In Spezialstähle“ str. 442.

²⁾ Werkstoff Handbuch. S. A. 1927. M. 31. Ir. Ing. Oertel

	0,12% C	0,25% C	0,8% C
Ferryt i perlit . . .	0—10% Ni	0—7% Ni	0—5% Ni
Ferryt i martenzyt . . .	10—12% "	7—10% "	5—7% "
Martenzyt	12—20% "	10—15% "	7—10% "
Martenzyt i austenit . . .	20—27% "	15—20% "	10—15% "
Austenit	ponad 27% "	ponad 20% "	ponad 15% "

Największe zastosowanie mają w praktyce perlityczne stale niklowe, a przede wszystkim stale o zawartości 2—5% niklu. Obróbka termiczna tych stali jest bardzo podobna do obróbki zwyczajnych stali węglistych; własności wytrzymałościowe tych stali niklowych



Rys. 1.

są nieco lepsze. Specjalnie dla konstruktorów jest bardzo ważną własność miękkich stali niklowych, której stale węgliste nie posiadają, a mianowicie nieco zwiększona wytrzymałość i stosunkowo bardzo do niej zbliżona granica płynności, dobra ciągliwość, bardzo wysoka przewężalność i wysoka zwięźłość, czyli odporność na udary.

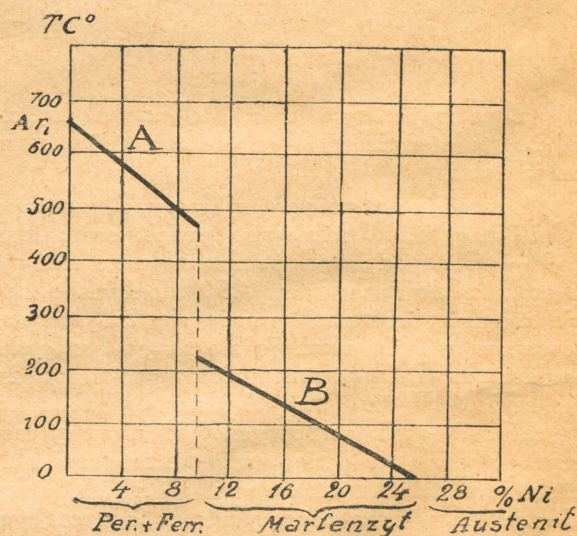
Martenzytyczne stale niklowe posiadają wysoką wytrzymałość i bardzo wysoko położoną granicę płynności. Te stale odznaczają się wielką kruchością i twardością, są trudno obrabialne, a wskutek tego mają małe zastosowanie w praktyce.¹⁾ Przez dwukrotne wyżarzenie, a mianowicie pierwsze w temperaturze nieco wyżej A_{r3} około 600°C, a drugie w temperaturze około 300° do 350°C i następne powolne chłodzenie martenzytyczne stale niklowe stają się obrabialnymi, a to z tego powodu, że po takiej obróbce termicznej zamieniamy czysto martenzytyczną budowę na budowę odpuszczoną, t. zw. trostytową lub trostyto-sorbityczną.

Austenityczne stale niklowe posiadają znakomite własności wytrzymałościowe, a mianowicie: dobrą wytrzymałość, wysoko położoną

granicę płynności ($R:Q \approx 70$) i znakomite wydłużenie: są to stale o wysokiej zwięźłości i o bardzo wysokiej odporności na ścieranie. Austenityczne stale niklowe są stosunkowo mało używane z powodu zbyt wysokiej ceny. Austenityczne stale niklowe są nie czułe na obróbkę termiczną.

Istnieje jeszcze jeden podział stali niklowych w odniesieniu do ich punktów krytycznych. Dejean dzieli stale niklowe na takie dwie grupy: 1) stale o zawartości procentowej niklu poniżej 25% posiadają przemianę alotropową przy studzeniu w zupełnie innej temperaturze niż przy ogrzewaniu; 2) zaś stale powyżej 25% Ni posiadają krytyczny punkt w tej samej temperaturze tak przy chłodzeniu jak i przy ogrzewaniu. Do pierwszej grupy należą stale o rozmaitych własnościach wytrzymałościowych, co jest powodem do jej podziału na dwie podgrupy: A) stosunkowo miękkie stale do zawartości 10% Ni posiadają budowę ferrytowo-perlityczną, B) twarde stale o budowie martenzytycznej, przeważnie o zawartości niklu powyżej 10% (rys. 2).

Najważniejsze zalety miękkich stali niklowych w porównaniu do miękkich stali węglistych, są następujące:



Rys. 2.

1) Przy stosunkowo mało zwiększonej wytrzymałości na rozciąganie znacznie zwiększona granica płynności, a z tem lepsze (wyższe) własności sprężyste i pewien wzrost wydłużalności.

2) Szerszy zakres wysokiej zwięźłości, czyli że zakres kruchości na zimno przesunę

¹⁾ Aall. St. u. E. 1924, str. 1080.

ty został do temperatur poniżej zwyczajnych nawet w stalach termicznie nieulepszonych. Znaczący to, że stale niklowe są mniej kruche, czyli więcej odporne na uderzenie.

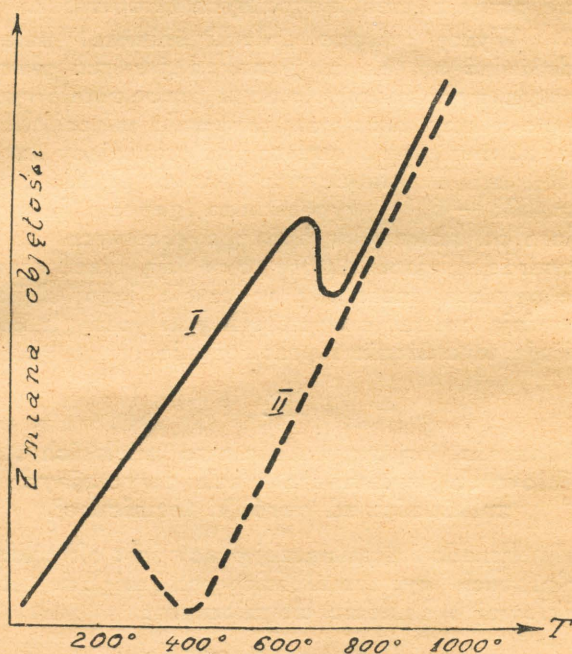
3) Łatwiejsza hartowalność, a to z powodu obniżonych punktów krytycznych. H. Mayer¹⁾ podaje, że 1% Ni obniża temperaturę przemiany allotropowej $\gamma \rightarrow \alpha$ o 30°C, 2% Ni o 64°C, 3% Ni o 100°C, 4% Ni o 140°C i 5% Ni o 186°C.

4) Zachowują korzystniejsze własności wytrzymałościowe w temperaturach wyższych od zwyczajnych.

Do wad miękkich stali niklowych należy zwiększona zdolność do likwacji wewnątrz kryształów w czasie powolnego krzepnięcia, co powoduje często powstawanie „płatków śnieżnych” (Flocken). Liczni badacze jak F. Pachter²⁾, H. Styri³⁾, F. Giolitti⁴⁾, S. W. Miller⁵⁾, F. Sommer⁶⁾, F. Rapatz⁷⁾, P. Badenheuer⁸⁾, Hayward i inni zastanawiali się nad przyczynami wywołującymi powstawanie płatków śnieżnych i po długoletnich doświadczeniach doszli do poznania tych przyczyn i do częściowego unieszkodliwienia tej wady. Jasne płatki (śnieżne) występujące na powierzchni złomu stali niklowej są to ślady delikatnych rys, skierowanych w stronę przełomu ziarna umieszczone na płaszczyznach łupliwości, które przy obserwacji pod specjalnymi kątami wskutek refleksji światła wydają się jaśniejszymi niż otoczenie. Jako przyczynę powstawania takich delikatnych rys ustalono likwację kryształów. Rysy bowiem leżą między gałęziami dendrytów, t. j. części stopu zastygłej na końcu, które z powodu wyższej zawartości składników zastygły w postaci martenzytu, podczas gdy pierw zastygłe części mają budowę perlityczną. Wskutek powyższego powstają anomalje dilatometryczne co pociąga za sobą zjawienie się naprężeń wewnętrznych. Te ostatnie doprowadzają do powstania mikroskopijnych rysów, biegnących zazwyczaj prostopadle do płaszczyzn łupliwości.

Wady tego rodzaju powstają przeważnie w stalach, które z powodu składu chemicznego mają obniżoną temperaturę przemiany allotropowej w takim stopniu, że małe zmiany w składzie chemicznym wskutek naturalnej likwacji lub w szybkościach stygnięcia powodują powstawanie obok siebie struktury i perlitycznej i martenzytowej. „Martenzytowa” stygnieć jak wiadomo obniża zakres dilatometrycznej anomalii w czasie przemiany „ $\gamma \rightarrow \alpha$ ” do temperatur

poniżej 300°, zaś „perlityczna” stygnieć powoduje uskutecznienie się tej przemiany a względnie dilatometrycznych anomalii w temperaturach znacznie wyższych (rys. 3). O ile zaś w badanym kryształe likwacja jest daleko posunięta, to w czasie równomiernego nawet stygnięcia w poszczególnych miejscach kryształu przemiana allotropowa uskutecznia się w różnych temperaturach a wraz z nią gwałtowne rozszerzenie będzie zachodzić w różnych częściach kryształu w różnych temperaturach t. j. w różnym czasie. Takie objętościowe anomalje, zachodzące w różnych częściach poszczególnych kryształów są główną przyczyną



Rys. 3.

powstawania delikatnych rysów na płaszczyznach łupliwości, które w całości wskutek refleksji światła tworzą jasne (śnieżne) płatki.

Płatki śnieżne nie są cechą charakterystyczną jedynie stali niklowych: jest to zjawisko spotykane i w stalach czysto węglowych, chociaż może najczęściej występuje ono w stalach chromo-niklowych. Hayward¹⁾ w czasie wojny światowej zbadał około 3000 bloków, zawierających płatki śnieżne i spostrzegł, że o ile zawartość niklu w tworzywie nie przekracza 2%, to ilość bloków, zawierających płatki śnieżne nie jest większa niż 5%, przy zawartości około 3% Ni w tworzywie następuje gwałtowne zwiększenie ilości bloków, zawierających płatki do 20%. Jest to jednym z najważniejszych powodów, że w miękkich stalach niklowych nie daje się większej zawartości niklu ponad 2 do 3%.

Należy przytem wspomnieć, że w celu zmniejszenia ilości płatów śnieżnych lub w celu całkowitego uniknięcia ich powstawania,

¹⁾ 1) Stahl und Eisen 1914, str. 1395 „Über die Wärmebehandlung der perlitischen Nickelstähle“.

²⁾ 2) G. Mars — „Die Spezialstähle“.

³⁾ 3) P. Oberhoffer — „Des technische Eisen“.

⁴⁾ 4) Werkstoff-Handbuch, „Stahl und Eisen“.

⁵⁾ ⁵⁾ St. u. E. 1912, 1647—1655.

⁶⁾ ⁶⁾ St. u. E. 1921, 160.

⁷⁾ ⁷⁾ St. u. E. 1918, 338—342.

⁸⁾ ⁸⁾ St. u. E. 1921, 478.

⁹⁾ ⁹⁾ St. u. E. 1922, 1708—1712.

¹⁰⁾ ¹⁰⁾ St. u. E. 1923, 1199—1202.

¹¹⁾ ¹¹⁾ Mitt. K. W. Inst. f. Eisen f. VII, 1.

¹²⁾ ¹²⁾ P. Bardenheuer, Mitt. K. W. Inst. für Eisenforsch. VII, 1.

istnieją pewne środki zapobiegawcze już to natury czysto metalurgicznej lub też z zakresu przepisów obróbki termicznej. Tak np. w celu zmniejszenia zjawisk likwacji kryształów poleca się dokładne rozpuszczanie i rozmieszanie niklu w kąpeli stalowej, czemu sprzyja: a) wysoka temperatura kąpeli, b) odpowiednio długi czas rozpuszczania, c) dokładne mieszanie kąpeli, d) przyspieszone stygnięcie bloków. W tym ostatnim celu poleca się odlewanie małych bloków w możliwie niskiej temperaturze. W razie zaś otrzymania niejednorodnie zastygłych bloków, poleca się ostrożne ogrzewanie ich i możliwie powolne przejście przez zakres krytycznych temperatur.

Wyżej opisane „płatki śnieżne” należy odróżniać od tak nazywanych „jasnych plam”, spotykanych na przełomach próbek stalowych. Jasne plamy zazwyczaj zawierają więcej tlenu, siarki, manganu i fosforu niż otaczający materiał. Inż. T. Malkiewicz (Przegl. Techn. 1929, str. 606 — 611) wyprowadza genesis jasnych plam od likwacji w bańkach gazowych. Są to „twarde miejsca”, które powodują przedwczesne pęknięcia materiału w czasie jego służby, zwężają zakres odkształceń plastycznych i obniżają wydłużenie i przewężenie.

III.

Własności wytrzymałościowe miękkich stali niklowych w temperaturach zwyczajnych w zależności od obróbki termicznej.

Przedmiotem naszej pracy jest określenie własności wytrzymałościowych miękkiej stali niklowej o składzie chemicznym:

C	= 0,135%
Ni	= 2,67%
Mn	= 0,39%
Si	= 0,1%
Cu	= 0,1%
P	= 0,015%
S	= 0,015%
Ar ₃	= 735°C
Ar ₁	= 563°C

Wiadomo, że własności mechaniczne materiałów stalowych poza wpływem składu chemicznego zależą jeszcze od następujących czynników: 1) temperatury, do której dany materiał ogrzany, 2) szybkości ogrzewania, 3) czasu ogrzewania i 4) szybkości chłodzenia. Powyższe czynniki wpływają przede wszystkim na stopień ziarnistości czyli na strukturę. Decydującym czynnikiem jest jednak szybkość przejścia przez zakres temperatur krytycznych. Poleca się bowiem niezbyt wysokie podgrzewanie ponad temperatury krytyczne, wytrzymanie przedmiotu w tej temperaturze wyżarzania tak długo, ażeby wytworzył się jednorodny stan (γ) a zatem możliwie szybkie przejście przez zakres temperatur krytycznych w celu wytworzenia największej ilości ośrodków krystalizacji fazy (α) podczas przemiany allo-

tropowej „ γ ” $\rightarrow$ „ α ”, stosunkowo również szybkie lecz może nieco powolniejsze przejście zakresu temperatur „kruchości na gorąco” i „rekrystalizacji” a zatem należy stosować już coraz powolniejsze szybkości stygnięcia i to tak, żeby zmiany objętościowe, zachodzące w stalowych materiałach w temperaturach między 100° a 300°C i aż do temperatur pokojowych odbywały się możliwie jaknajpowolniej. Jest to reguła, do której należy ściśle stosować się o ile pragniemy otrzymać fabrykat o rzeczywiste dobrych własnościach mechanicznych bezpośrednio po jednym ogrzewaniu (wyżarzeniu) ponad temperaturę krytyczną.

Dane wytrzymałościowe miękkich stali niklowych zaczerpnięte z literatury, wykazują duże wahania w zależności od zastosowanej obróbki termicznej. Należy przytem zaznaczyć, że 1) przy wielkiej ilości prób nie podano w dotychczasowych badaniach dokładnych temperatur wyżarzania, 2) prócz doświadczeń Rudeloffa, Le Chatelier’a, Fay’a, Biever’a i Aall’ena nie spotyka się temperatury wyżarzania poniżej 800°C, 3) do materiałów o różnym składzie chemicznym tworzywa stosowano jednakowe warunki termiczne. Dopiero praca H. Mayer’a podaje wyczerpujące cyfrowe wyjaśnienie o wpływie zawartości Mn i Ni na położenie (właściwie na stopień obniżenia temperatury) przemiany allotropowej „ γ ” $\rightarrow$ „ α ” przytem należy wspomnieć, że różnica temperatur Ac₃ i Ar₃ czyli histereza u stali niklowej wzrasta szybko w miarę zwiększenia zawartości Ni. Wyżej przytoczone uwagi tłumaczą konieczność przeglądu w jaki sposób zmieniają się własności wytrzymałościowe stali niklowej w zależności od obróbki termicznej i od temperatury otoczenia.

Obróbkę termiczną wykonano w piecu muflowym, opalonym gazem, w którym temperatura regulowana zapomocą dopływu ilości powietrza, potrzebnego do spalania i dopływu gazu dała się utrzymać z dokładnością 5°C.

Do doświadczeń używano blachy stali niklowej o wymiarach 200 × 160 × 11,4 mm, z którego to kawałka można było wyciąć dwie próby na rozerwanie i 20 prób na uderność z karbem (według Charpy’ego). Próby na rozerwanie wycinano w kierunku walcowania o długości pomiarowej 100 mm; badania zaś odporności na uderzenie dokonano na 30 kgm taranie wahadłowym budowy Amsler’a, ustawionym na 15 kgm.

A. Wyżarzanie.

Próby wyżarzania dokonano w czterech temperaturach 760°, 790°, 820° i 850°C: chodziło bowiem o znalezienie zakresu temperatury żarzenia, przy której własności wytrzymałościowe osiągną optimum. Czas żarzenia wynosił każdorazowo 30 minut, zaś stygnięcie wraz z piecem trwało od 8 do 10 godzin. Średnie wyniki pomiarów (z dwóch prób) zestawione są w tablicy 2 oraz przedstawione są na rys. 4.

Taką optymalną temperaturą jest temperatura około 790°C, zaś szczególne pogorszenie (spadek wytrzymałości, wydłużenia, twardości, odporności na uduary) przypada na temperaturę 850°C. Znaczy to, że przemysłowe

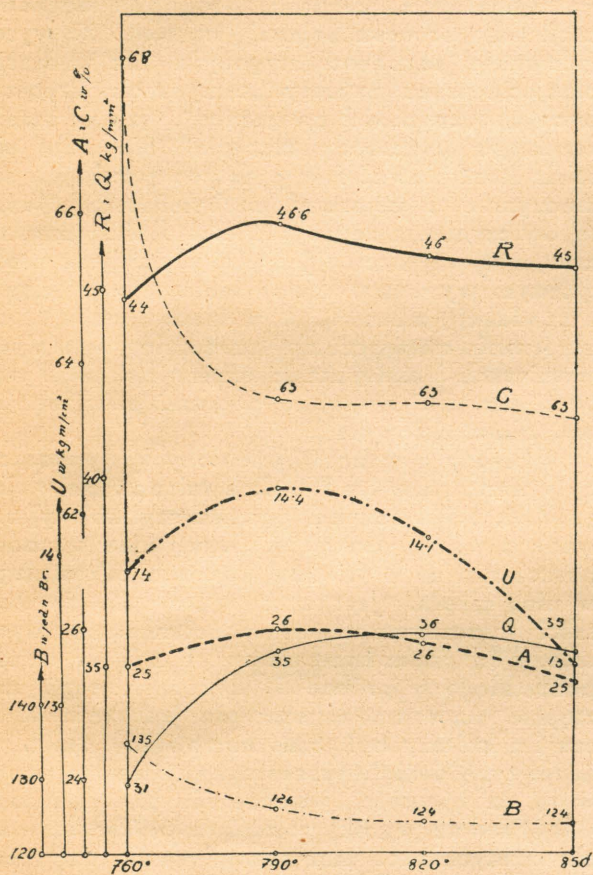
C. Ulepszanie termiczne.

Proces ulepszenia termicznego składa się z dwóch względnie trzech procesów termicznych, wykonanych kolejno jeden po drugim na jednym i tym samym przedmiocie: 1) hartowanie, 2) odpuszczanie. Powolne ochładzanie odpuszczonych stali pozostawia kruchość wyżarzania, szybkie ochładzanie wywołuje powstawanie w metalu naprężeń wewnętrznych, co ze swej strony powoduje obniżenie odporności na udary,¹⁾ obniżoną przewężalność i do pewnego stopnia obniżoną wydłużalność. Ażeby otrzymać optimum tych własności, jak to udowodnił prof. I. Feszczenko-Czopiwski, należy różniczkować proces chłodzenia po odpuszczeniu w ten sposób, że szybkość studzenia w górnym zakresie temperatur od temperatury odpuszczania aż do temperatury około 350°C (dla stali czysto węglistych około 400°C) jest znaczna, zaś w dolnym zakresie temperatur od około 350°C do temperatur zwyczajnych szybkość chłodzenia jest jaknajpowolniejsza. Ponieważ takiej kombinacji zmienności w szybkościach chłodzenia w stosunkowo niewielkim zakresie temperatur z trudnością w praktyce można osiągnąć i to tylko z grubym przybliżeniem poleca prof. I. Feszczenko-Czopiwski stosować kombinowane odpuszczenie a razem z tem i chłodzenie po odpuszczeniu, a) szybkie chłodzenie po pierwszym odpuszczaniu np. w wodzie i b) powtórne odpuszczanie (niższe) czyli ogrzewanie do temperatury 300°, 250° i 200°C (dla stali węglistych 400°, 300°, 200°C zależnie od zawartości węgla i czasu odpuszczania), wytrzymywanie w tej temperaturze tem dłuższy czas, im niższą będzie temperatura tego powtórnego odpuszczania i następnie powolne chłodzenie wraz z piecem lub w jakiś inny odpowiedni sposób np. w popiele.

Złom termicznie ulepszony materiału jest drobnoziarnisty a kruchość jest najmniejszą ze wszystkich możliwych dla danego materiału.

W czasie odpuszczania działa nie tylko temperatura odpuszczania lecz i czas odpuszczania. Znaczy to, że jednakowy efekt można osiągnąć dwoma drogami, albo krótko odpuszczać w stosunkowo wyższej temperaturze,

¹⁾ Mitt. K. W. Inst. f. Eisenforschung 11, str. 91



Rys. 4.

wyżarzanie badanych stali niklowych można dokonywać w granicach 760° do 850°C.

B. Normalizowanie.

Normalizowanie własności mechanicznych polega na chłodzeniu prób na wolnym powietrzu od temperatury wyżarzania, t. j. od temperatury nieco wyżej przemiany alotropowej A_3 . Jako temperaturę najodpowiedniejszą wybraliśmy na podstawie powyższych badań temperaturę 790°C ; czas przebywania próby w tej temperaturze wynosił jak poprzednio 30 minut. Budowa prób znormalizowanych prawie nie odróżnia się od budowy prób wyżarzonych z

albo dłużej w temperaturze niższej; poleca się ten drugi sposób, ponieważ po takim odpuszczaniu, które odbywa się prawie na granicy temperatur kruchości na gorąco, można zastosować po odpuszczaniu bezpośrednie tylko jedno chłodzenie powolne bez obawy pozostawienia w stali kruchości odpuszczania.

Średnie wyniki ulepszenia termicznego: „na twardo” t. z. że temperatura odpuszczania = 300° do 400°C w ciągu 40 minut, i „na miękko”, t. z. że temperatura odpuszczania = 530° do 525°C również w przeciągu 40 minut, są umieszczone w tablicy 2.

Tablica 2.

Obróbka termiczna	R kg/mm^2	Q kg/mm^2	A %	C %	U kg/cm^2	B kg/mm^2
Wyżarzona	46,6	35,4	26,6	63,5	14,4	126
Ulep. na twardo . .	63,3	50,8	12,2	73	16,6	236
„ miękko	56,8	43,5	17,7	76,3	19,7	183

Po termicznym ulepszaniu otrzymujemy budowę sorbityczną, drobno-ziarnistą, w której węgiel występuje w postaci cementytu kulkowego, a budowa warstwowa tak charakterystyczna dla stali walcowanych, zostaje w znacznej mierze usunięta (mikrofot. 6 i 7).

D. Obróbka termiczna zastępcza.¹⁾²⁾

W celu usunięcia pewnych niedogodności podwójnego względnie potrójnego ogrzewania a również dodatkowych kosztów, wypróbowaliśmy ulepszanie zastępcze, istota którego polega na tem, że materiał zostaje poddany tylko jednej operacji podgrzewania i hartowania, które nie doprowadza się do końca, lecz w ten sposób, ażeby w materiale pozostało tyle ciepła, ile potrzeba na uskutecznienie samoodpuszczenia w czasie dalszego już powolnego chłodzenia. Ten rodzaj obróbki w praktyce uskutecznia się jak wiadomo w ten sposób, że rozgrzany przedmiot hartuje się w kąpieli wodnej aż do wyraźnego pociemnienia jego powierzchni, poczem szybko się wyjmuje z wody, a proces samoodpuszczenia odbywa się na powietrzu kosztem pozostałego ciepła w przedmiocie. W celu usunięcia nadmiernego utwardzenia przedmiotu na powierzchni poleca się po częściowem zahartowaniu zanurzyć przedmiot w podgrzany piasek lub popiół.

Proces termicznego ulepszania zastępczego podnosi w materiale własności sprężyste,

granice płynności i w nieco mniejszej mierze wytrzymałość i twardość. Trudności mechanizacji tego procesu polegają na tem, że wyregulowanie szybkości stygnięcia tak w czasie przejścia przez zakresy „temperatur krytycznych” i „kruchości na gorąco”, jak w czasie przebiegu „samoodpuszczania” nie daje się ściśle kontrolować i w praktyce przebiega samoczynnie z pewnymi odchyleniami. Mamy tu do czynienia ze zbyt wielką ilością czynników wpływających. Jednak w każdym praktycznym wypadku, kiedy mamy do czynienia z produkcją masową, t. z. kiedy poddaje się ulepszaniu zastępczemu przedmioty o stałych wymiarach i stałej masie można po kilku próbach określić warunki optymalne własności wytrzymałościowych.

Blachy o wyżej wymienionych wymiarach były hartowane od 790°C, a mianowicie w ciągu 2, 4, 6 i 8 sekund, poczem szybko wyjmowane z wody, przez co ulegały one samoodpuszczaniu na powietrzu kosztem pozostałego w nich ciepła. Jest rzeczą zrozumiałą, że wartości poszczególnych własności mechanicznych zależą od czasu hartowania, t. z. ilość ciepła pozostałego w próbce i wykorzystanego następnie na samoodpuszczenie jest tem większą im krótszy był czas hartowania. Kombinacje tych dwóch procesów zasadniczo wpływają na wielkości poszczególnych własności.

Średnie wyniki pomiarów własności mechanicznych prób zastępczo ulepszonych przedstawiono w tablicy 3 i na rys. 8.

Tablica 3.

Obróbka termiczna	R kg/mm^2	Q kg/mm^2	A %	C %	U kg/cm^2	B kg/mm^2
Próba w stanie znormalizowan.	47,2	36,1	23,2	63,2	16,7	142
Zastępczo ulepszona 2" hart.	48,6	38,0	19,0	65,8	17,5	142
4" „	53,0	41,7	15,2	66,2	17,5	166
6" „	63,1	53,5	14,3	70,0	18,4	210
8" „	66,2	57,8	11,7	71,4	14,8	331

Największa odporność na udary w stanie termicznie ulepszonym wynosiła 19,7 kg/cm^2

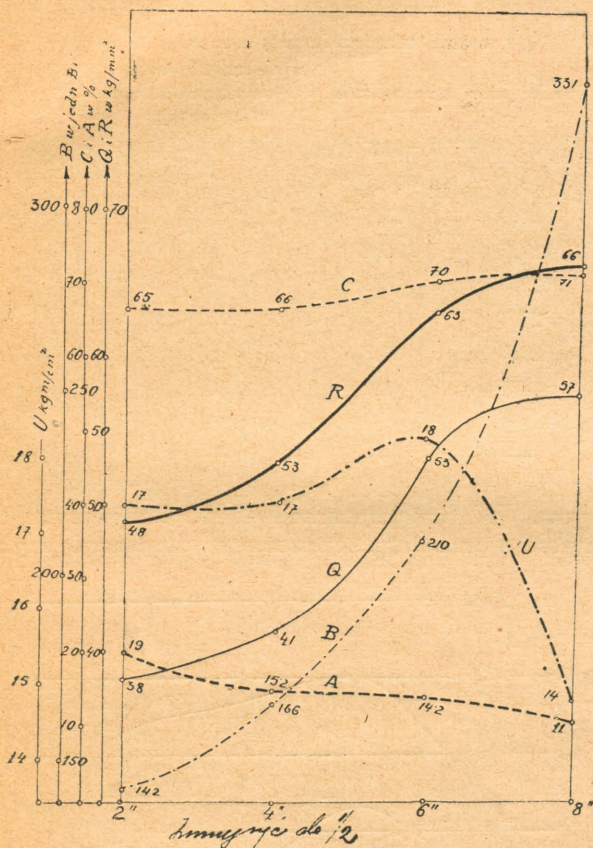
¹⁾ Pr. Dr. Inż. Feszczenko-Czopiński. Blachy kotłowe parowych, str. 63.

²⁾ Pr. Dr. Inż. Feszczenko-Czopiński. Metaloznawstwo, str. 288.

przy twardości 183 kg/mm^2 i wydłużeniu 17,7%. Stosunek Q : R wynosił 80%, przy Q = 43,5 i R = 50,8 kg/mm^2 . Zastępcze ulepszanie pozwala otrzymywać prawie taki sam stosunek Q : R, t. z. około 80%, prawie taką samą odporność na udary (17,5—18,4 kg/cm^2) jak i w

próbach ulepszonych termicznie w zwykły sposób przy tylko nieznacznie obniżonej wydłużalności.

Optimalne warunki zastępczego ulepszenia wyraźnie wypływają z zestawienia poszczególnych wykresów na rys. 8. Znaczy to, że w próbach przez nas używanych, czas hartowania od 4—6 sekund pozwala uzyskać dobrą odporność na udary, zachowując jednocześnie stosunkowo dobrą ciągliwość materia-



Rys. 8.

łu i dość wysoko położoną w nim granicę
płynności.

Mikrobudowę stali niklowych zastępczo ulepszonych przedstawiono na mikrofotografiach Nr. 9, 10, 11 i 12. W wypadkach nieco energiczniejszego hartowania tłem mikrobudowy jest martenzyt (mikrofot. Nr. 9).

Przy średnich stopniach hartowania, budowa jest przejściową od martenzytycznej do czysto sorbitycznej, tak jak przedstawiono na mikrofot. Nr. 10 i 11.

Ponieważ zwykle ulepszenie termiczne wymaga dwóch kolejnych procesów (hartowania i odpuszczania), czyli dwóch kolejnych ogrzewań, to ulepszenie zastępcze ma tę przewagę, że można go zastosować natychmiast po ukończeniu obróbki mechanicznej na gorąco i nie wymaga zazwyczaj powtórnego ogrzewania, co dodatnio odbija się na kosztach własnych. Jednak należy podkreślić, że cała korzyść zastępczego ulepszenia i dobroć właściwości mechanicznych zastępczo ulepszonego

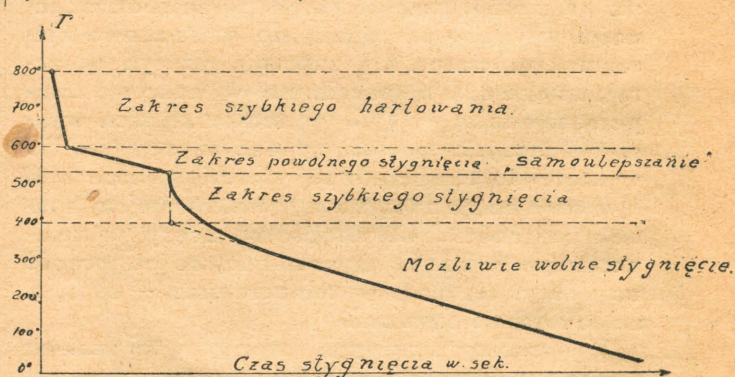
materiału, zależą od umiejętnie dobranych szybkości stygnięcia, w trzech zakresach temperatur, a mianowicie:

a) w zakresie temperatur, w których odbywa się przemiana allotropowa. Ten zakres badanej stali niklowej rozpościera się od temperatury wyżarzania aż do około 600°C i musi się go przebyć z jaknajwiększą szybkością stygnięcia w celu osiągnięcia jaknajbardziej drobnoziarnistej budowy. Wiadomo bowiem, że im większa liczba ośrodków krystalizacji fazy „ α ” powstanie w czasie przemiany $\gamma \rightarrow \alpha$ tem materiał będzie więcej drobnoziarnisty.

b) w zakresie temperatur „kruchości na gorąco“, w którym zachodzi proces samoodpuszczania; szybkość stygnięcia musi być nieco powolniejszą, jednak jeszcze na tyle wielką, żeby nie pozostawić w materiale objawów „kruchości odpuszczania“.

c) zaś szybkości stygnięcia w temperaturach bliskich do zwyczajnych, praktycznie mówiąc od 350°C do temperatur pokojowych, należy stosować jaknajpowolniejsze. Praktycznie takie zmniejszenie szybkości stygnięcia zachodzi w sposób ciągły, t. z. że szybkość stygnięcia staje się tem powolniejszą, im mniejsza jest różnica pomiędzy temperaturą przedmiotu a temperaturą otoczenia

Praktyczne wykonanie tak rozplanowanego stygnięcia w termicznej obróbce zastępczej jest dość trudne a jednak możliwe. Zmien-



Rys. 13.

ność pożądaną szybkości stygnięcia w czasie tej obróbki zastępczej możemy ilustrować schematem, przedstawionym na rys. 13.

IV.

Trwałość własności wytrzymałościowych
miękkich stali niklowych w temperaturach
wyższych i niższych od zwyczajnych (do 400°C)
w zależności od poprzedniej obróbki
termicznej.

Własności wytrzymałościowe wszystkich gatunków stali zależą^{1), 2), 3), 4)} przede wszystkim

1) Mitt. K. W. Inst. f. Eisenforsch., str. 43 F. Körber i A. Pomp 925, VII i VI, str. 33.

²⁾ Stahl und Eisen 1925, str. 408. E. Mauer i R. Mailänder „Zur Fraze der Blausprödiskeit“.

³⁾ Iron and Steel Inst. 1925. H. Graves, D. Jones.

⁴⁾ Z. d. V. d. I 1924, str. 41.

kiem od temperatury otoczenia. Właściwością najczulszą na zmiany i to nawet na małe zmiany w zakresie temperatur zwyczajnych jest odporność na uderzenia.

A. Zależność odporności na uderzenie od temperatury.

Odporność na uderzenia była badana na próbach z karbem (60. 10. 10 mm) na 30 kgm

wahadłowym taranie budowy „Amslera”. Temperaturę 80°C osiągnięto zapomocą dwutlenku węgla w stanie stałym. Celem lepszego kontaktowania badaną próbkę polewano eterem; temperaturę mierzono termometrem toluolowym. W celu osiągnięcia równomiernej temperatury przetrzymywano próbkę w badanej temperaturze 15 minut poczem szybko łamano. Wyniki tych badań zestawiono w tabelicy 4 i na rys. 14.

Tablica 4.

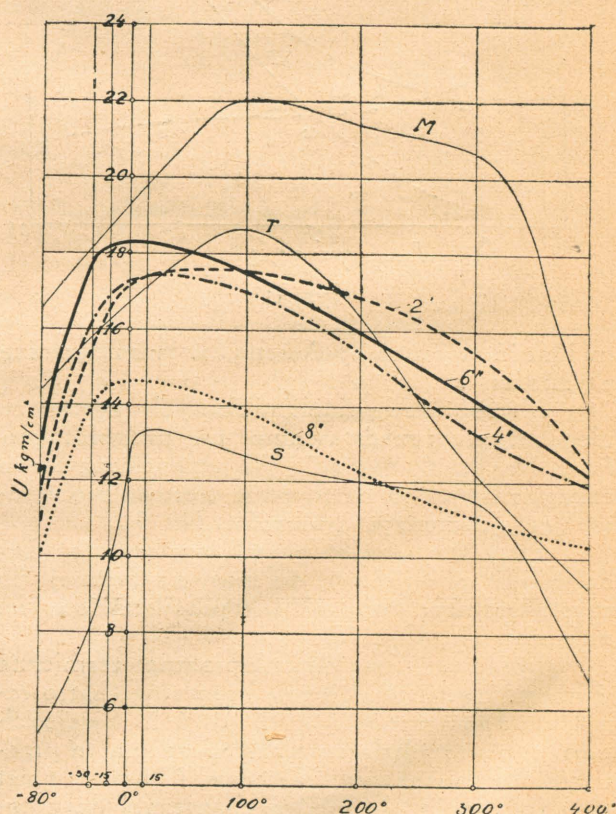
Temperatura badania	W stanie dostarczonym	W stanie wyżarzonym	W stanie znormalizowanym	W stanie termicznie ulepszonym		
				„na miękko”	„na twardo”	zwiększenie w % w stosunku do stanu dostarczonego
— 80°	5,3	5,4	6,0	16,7	14,7	215
— 30°	8,5	10,8	14,4	18,6	15,7	120
— 15°	10,0	13,7	16,1	19,3	15,9	93
+ 15°	13,4	14,4	16,7	19,7	16,6	60
+ 100°	12,9	13,0	14,6	22,5	18,8	74
+ 200°	11,9	12,7	14,2	20,7	13,7	73
+ 300°	11,8	13,6	14,9	22,0	11,3	86
+ 400°	6,7	10,8	11,4	14,1	9,2	110
+ 450°	5,4	—	—	—	—	—
+ 500°	5,3	—	—	—	—	—

Odporność badanej stali na uderzenie w stanie surowym (po przejściu zakresu kruchości na zimno, przesuniętego z powodu obecności w tworzywie niklu, do stosunkowo niższych temperatur, t. j. znacznie niższych od zera), osiąga swoje maksimum w zakresie temperatur około +15°C, w temperaturach wyższych zaczyna powoli spadać aż do +300°C w której to temperaturze wynosi jeszcze 11,8 kgm/cm² i odtąd zaczyna się gwałtowniejszy spadek udatności. Odporność na udary w temperaturze +500°C wynosi tyle, co odporność na udary tej stali w temperaturze —80°C, t. zn. około 5,3 kgm/cm².

Przebieg krzywych udatności tej stali w stanie wyżarzonym i znormalizowanym jest podobny; poszczególne wartości odporności na udary w stanie znormalizowanym są nieco wyższe niż w stanie zwyczajnym, a zakres kruchości na zimno (właściwie spadek udatności) jest w próbach znormalizowanych nieco przesunięty w stronę niższych temperatur. Z biegu krzywych wywnioskujemy, że maksimum zwięzłości dla stali niklowych jest szerokie (rozłogie), odpowiada bowiem dość szerokiemu zakresowi temperatur od +15°C do +300°C.

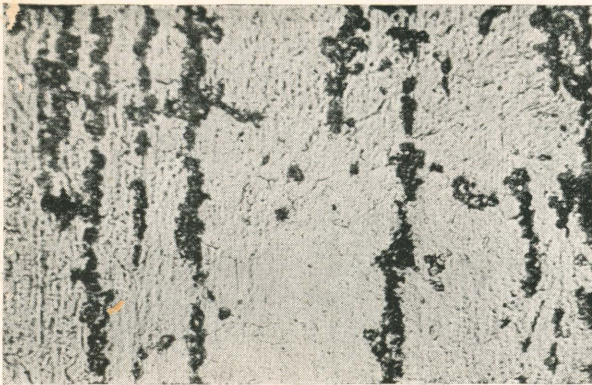
Termiczne ulepszanie badanej stali nadaje tym stalom specjalnie wysokie wartości odporności na uderzenia, również i w temperaturach najniższych. Tak np. dla —80°C takie zwiększenie zwięzłości wynosi do 215% pierwotnej wartości w stanie surowym. Przeważnie zwiększenie zwięzłości w zakresie temperatur od —15°C do +300°C wynosi około 75%—80% pierwotnej wartości (w stanie su-

wym. W temperaturach 400°C i wyższych ta wybitna przewaga termicznego ulepszenia szyb-



Rys. 14.

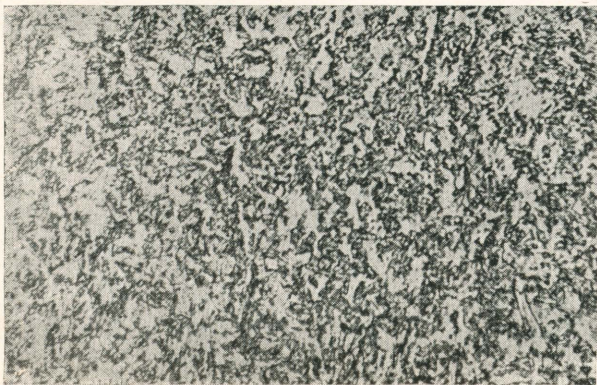
ko maleje, a prawie znika w temperaturach wyższych od 500°C. Przytem należy zazna-



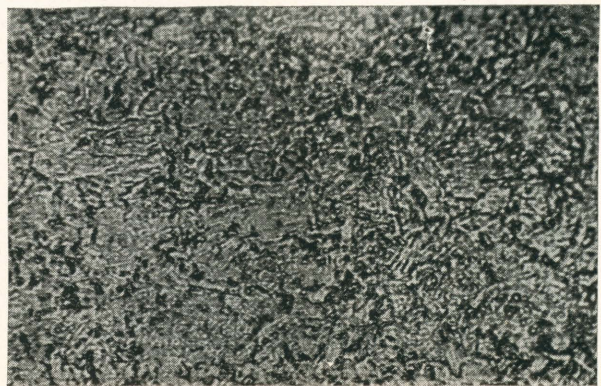
Mikrofotografia Nr. 5,
wyżarzona w temper. 790°C, pow. $\times 500$.



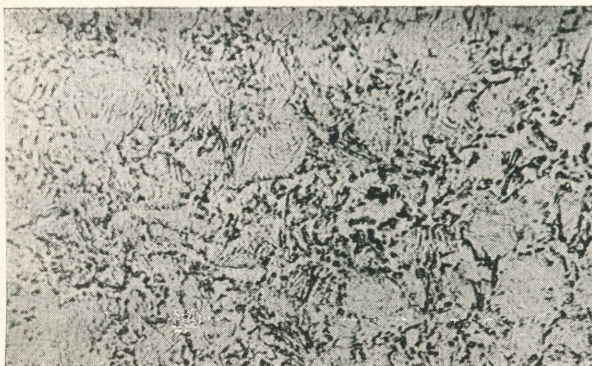
Mikrofotografia Nr. 6,
zahartowana, pow. $\times 500$.



Mikrofotografia Nr. 7,
termicznie ulepszona na twardo,
pow. $\times 500$.



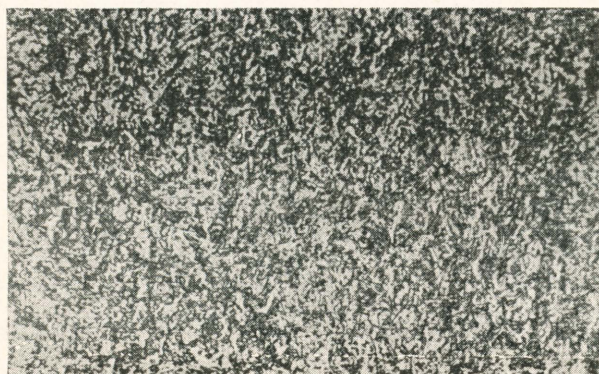
Mikrofotografia Nr. 9,
termicznie ulepszona zastępczo,
8" hartowana, pow. $\times 500$.



Mikrofotografia Nr. 10,
termicznie ulepszona zastępczo,
6" hartowana, pow. $\times 500$.

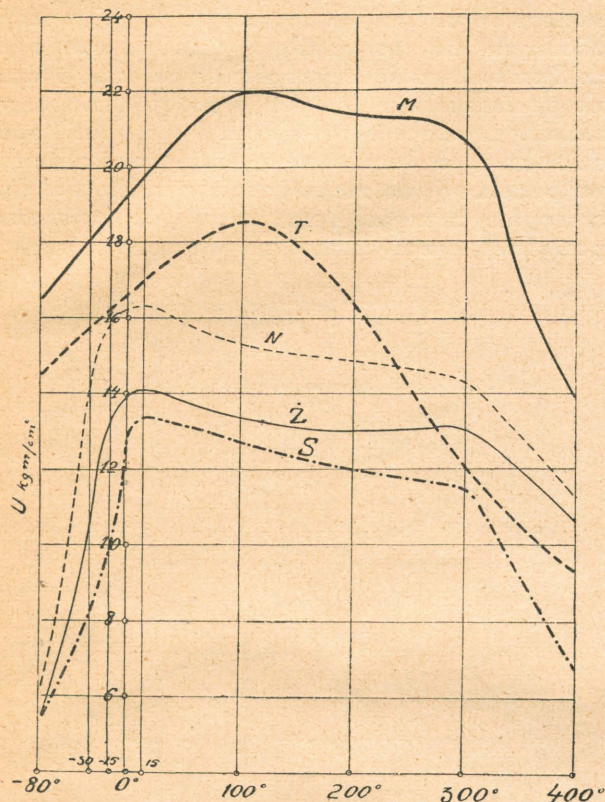


Mikrofotografia Nr. 11,
termicznie ulepszona zastępczo,
4" hartowana, pow. $\times 500$.



Mikrofotografia Nr. 12,
termicznie ulepszona zastępczo,
2" hartowana, pow. $\times 500$.

czyć, że t. zw. „termiczne ulepszanie na twardo“, to znaczy, że materiał był odpuszczony po zahartowaniu przy temperaturze stosunko-



Rys. 15.

wo niskiej (około 400°C) zwiększa odporność na uderzenie w znacznie mniejszym stopniu (dla -80°C o 180%, dla -30°C o 90%; dla

zakresu temperatur -15°C do +200°C przeciętnie zaledwie o 40% do 45%). W temperaturach powyżej 200°C nie ma żadnego zwiększenia zwięzłości w porównaniu ze stanem dostarczonym. Jest to rzeczą zrozumiałą, ponieważ przywracanie zwięzłości po zahartowaniu odbywa się z reguły tem prędzej, im wyższą jest temperatura odpuszczania. O ile chcemy uzyskać dobrą zwięzłość przy niższych temperaturach odpuszczania w takim razie czas odpuszczania musi być odpowiednio przedłużony. Przy krótkim odpuszczaniu w stosunkowo niskich temperaturach nie osiąga się nigdy optimum zwięzłości. Odpuszczanie w wysokich temperaturach (odpuszczanie na miękko) stanowi niebezpieczeństwo łatwego wyżarzania materiału, a tem samem nasuwa się obawa usunięcia wybitnych korzyści termicznego ulepszenia. Optimalne korzyści termicznego ulepszenia można osiągnąć umiejętnym kombinowaniem temperatury i czasu odpuszczania. Praktyka warsztatowa daje nam liczne dowody, że poszukiwane optimum termicznego ulepszenia można otrzymać z całą pewnością przy średniej temperaturze odpuszczania w czasie którego optymalną wartość pewnych własności mechanicznych osiąga się przez należyte przedłużenie czasu odpuszczania (patrz rys. 14).

Zmienność odporności na uderzenie z temperaturą miękkiej stali niklowej ulepszonej termicznie „zastępczo“, przedstawia rys. 15.

Zastępczo ulepszona stal posiada odporność na uderzenie pośrednią między udarnością stali, termicznie ulepszonej „na miękko“ a udarnością stali w stanie dostarczonym.

W tabeli 5 umieszczono wyniki poszczególnych badań.

Tablica 5.

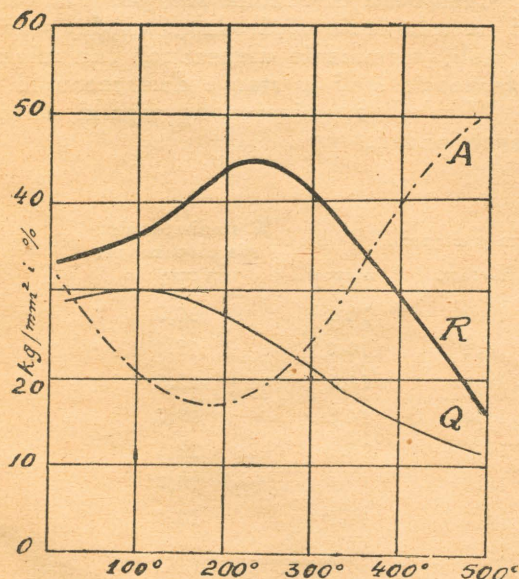
Temperatura badania	W stanie dostarczonym	W stanie ulepszonym zastępczo				W stanie termicznie ulepszonym na miękko
		2" hartow.	4" hartow.	6" hartow.	8" hartow.	
-80°	5,3	11,0	12,0	13,0	10,2	16,7
-30°	8,5	16,1	16,6	18,2	14,4	18,6
-15°	10,0	16,6	17,1	18,4	14,7	19,3
+15°	12,4	17,5	17,5	18,4	14,8	19,7
+100°	12,9	17,2	17,3	17,7	13,9	22,5
+200°	11,9	17,0	15,5	16,0	12,4	20,7
+300°	11,8	16,0	13,4	14,2	11,1	20,0
+400°	6,7	12,5	12,0	12,2	10,4	14,1

We wszystkich czterech próbach zastępczego ulepszenia, otrzymaliśmy bardzo korzystne przesunięcia zakresu odporności na uderzenia w stronę temperatur niższych. Absolutne wartości we wszystkich temperaturach są wyższe niż w materiale znajdującym się w stanie dostarczonym lub w stanie wyżarzonym, niższe niż w materiale termicznie ulepszonym na miękko i są bliskie do odpowiednich wartości w materiale termicznie ulepszonym na twardo.

Przebieg odporności na uderzenia w temperaturach do 300°C da się podzielić na dwa typy krzywych: a) typ krzywych odporności na uderzenie, biegnących do temperatury 300°C podobnie jak krzywa odporności na uderzenie stali termicznie ulepszonej na miękko, gdzie odporność na uderzenia spada do swego maksimum bardzo powoli. Taki przebieg spadku udarności wykazuje stal hartowana tylko 2 sekundy w wodzie w czasie namiastkowego ulepszenia t. z. samoodpuszczona przy

stosunkowo wysokiej temperaturze, b) typ krzywych odporności na uderzenie, zachowujących się podobnie jak krzywa udarności tejże stali termicznie ulepszonej na twardo, gdzie odporność na uderzenia, po osiągnięciu maksimum w temperaturze około 100°C spada dość szybko. W ten sposób zachowuje się stal namiastkowo ulepszona po 8 sekundach hartowania w wodzie, natomiast przebieg krzywych odporności na uderzenie stali namiastkowo ulepszonej po hartowaniu 6 i 4 sekundy, posiadają charakter pośredni pomiędzy oboma wyżej wskazanymi typami.

Krzywe zmian odporności na uderzenie w zależności od temperatury nasuwają następujący wniosek: początek spadku udarności czyli wzrost kruchości zależy w wysokim stopniu od temperatury odpuszczania. Im wyższą była temperatura odpuszczania lub początek samoodpuszczania, tem bardziej przesuwają się początek spadku odporności na uderzenie w stronę temperatur niższych i tem wyższe są absolutne wartości maksimum odporności na uderzenie. Natomiast niskie i krótkie odpuszczanie (termiczne ulepszanie na twardo), chociaż daje stosunkowo wysokie maksimum odporności na uderzenie (choć niższe od maksimum przy odpuszczaniu na miękko), jednak maksimum to leży w wyższych temperaturach (około $+100^{\circ}\text{C}$) i odtąd następuje dość gwałtowny wzrost kruchości w miarę obniżenia temperatury badania od tego optimum ($+100^{\circ}\text{C}$),



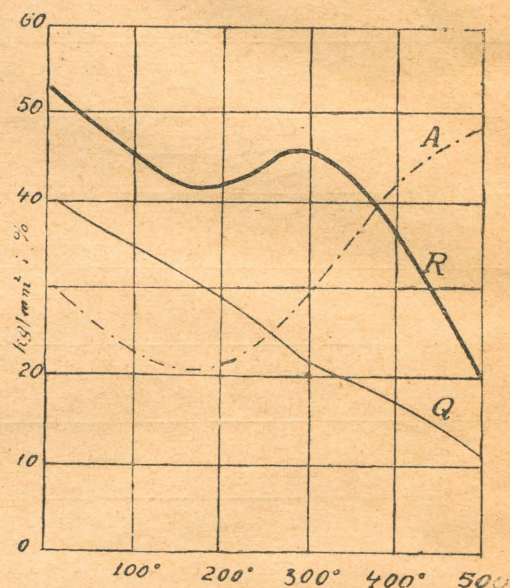
Rys. 16.

co nasuwa możliwość zidentyfikowania tego zjawiska z dawną „kruchością na niebiesko”. Stąd wyraźnie wypływa konieczność zmniejszenia szybkości stygnięcia w temperaturach poniżej 400°C we wszystkich wypadkach przemysłowego ochładzania wyrobów stalowych.

Należy przytem pamiętać, że proces namiastkowego ulepszania jest w jeszcze większym stopniu uzależniony od masy i wymia-

rów obrobionego termicznie przedmiotu, niż w czasie zwykłego ulepszania termicznego.

Przytoczone wyżej wyniki, z naszego punktu widzenia, udowadniają, że dla szeregu konstrukcji, wyrabianych ze stali niklowej o przybliżonym do powyższego składzie umiędzynokombinowanie szybkości stygnięcia w czasie ochładzania gotowych wyrobów może w znacznym stopniu ulepszyć własności mechaniczne, a tem samem daje konstruktorowi podstawę do zmniejszenia przekrojów poszczególnych części konstrukcji i do uzyskania poważnej oszczędności na wadze i kosztach



Rys. 17.

własnych. W każdym poszczególnym wypadku proces namiastkowego ulepszania da się w znacznej mierze zmechanizować a tem samem osiągnąć większą pewność w czasie masowej produkcji.

B. Zależność innych własności mechanicznych od temperatury.

P. Goerens pierwszy podał zależność własności wytrzymałościowych od temperatury dla 5% stali niklowej, i porównał tą zależność z takową w miękkiej stali zwyczajnej (rys. 16 i 17).

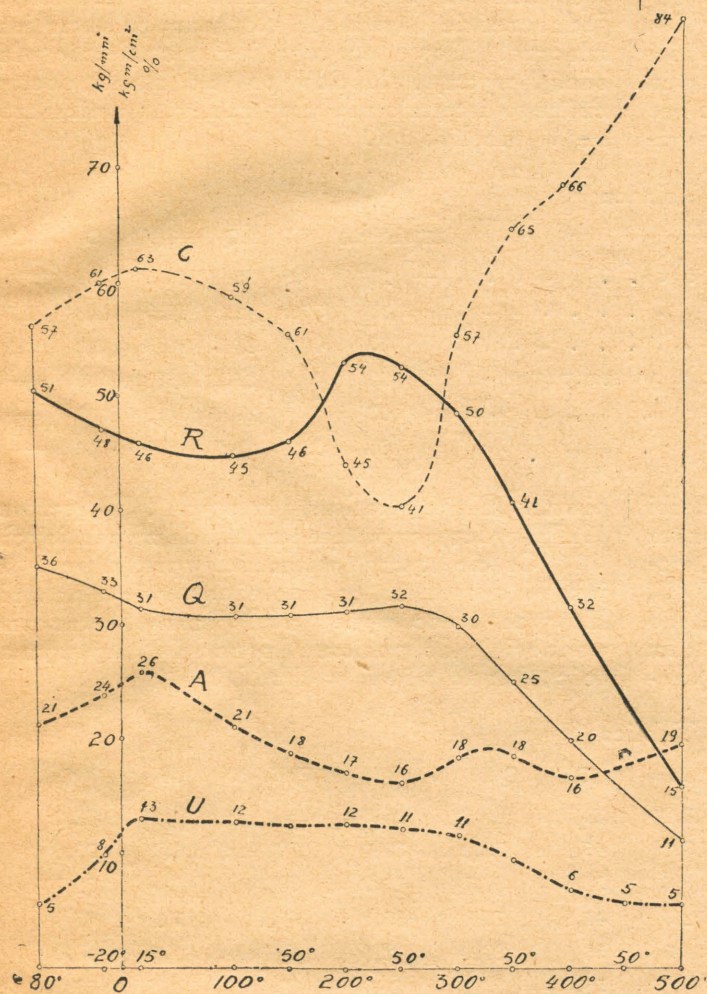
Celem naszych badań było ustalenie¹⁾ straty własności wytrzymałościowych w czasie pracy w temperaturach wyższych od zwyczajnych i wielkość korzyści o ile do konstrukcji używa się stali niklowych w stanie termicznie ulepszonym.

Po hartowaniu stal niklowa o powyższym składzie chemicznym (2,67% Ni, 0,135% C) była odpuszczona w temperaturze 530°C w ciągu 40 minut.

Pomiary własności wytrzymałościowych stali niklowej tak w stanie surowym jak i w stanie termicznie ulepszonym przeprowadziliśmy na płaskich próbach o wymiarach 12×11 ,

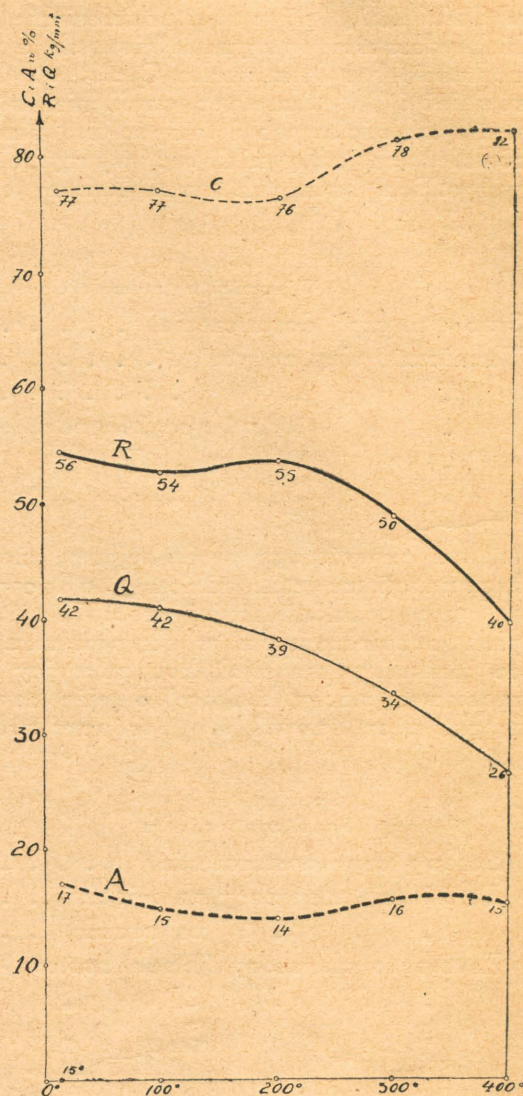
4×100 mm, przy długości uchwytów 128 mm i ogólnej długości badanej próby 400 mm. Żądaną temperaturę badania otrzymano w piecu elektrycznym. Badana próba była ogrzewana w dobrze uszczelnionym piecu elektrycz-

turze w ciągu tylko 15 minut, a to z powodu technicznych trudności utrzymania przez czas dłuższy niskich temperatur na stałym poziomie.



Rys. 18.

nym na długości 140 mm i wytrzymywana w odpowiedniej temperaturze w ciągu 30 minut. Przy badaniach w niższych temperaturach próby przetrzymywano w odpowiedniej tempera-



Rys. 19.

Średnie wyniki z dwóch badań zestawiono w tablicy 6 i na wykresach 18 i 19.

Tablica 6.

Temper. otoczenia w °C	W stanie dostarczonym					W stanie termicznie ulepszonym				
	R	Q	A	C	U	R	Q	A	C	U
-80°	51,5	36,0	21,8	57,0	5,3	—	—	—	—	16,7
-20°	48,5	35,3	24,0	61,0	9,5	58,0	45,2	16,5	75,0	19,0
+15°	46,8	31,7	26,5	62,7	13,4	56,0	42,8	17,5	82,3	19,7
+100°	45,9	31,3	21,5	59,6	12,9	54,2	42,0	15,4	77,0	22,5
+150°	46,6	31,6	19,0	56,1	—	—	—	—	—	—
+200°	54,3	31,9	17,5	45,0	11,9	55,0	39,2	14,2	76,2	20,7
+250°	53,7	32,0	16,5	43,1	—	—	—	—	—	—
+300°	50,0	30,4	18,9	56,9	11,8	50,0	34,7	16,2	78,4	22,0
+350°	41,4	25,1	18,7	65,8	—	—	—	—	—	—
+400°	32,1	20,3	16,5	66,1	6,7	40,1	26,7	15,3	82,3	22,0
+500°	15,9	11,0	19,7	84,7	5,3	—	—	—	—	—

Porównując zależność własności wytrzymałościowych od temperatury w stanie dostarczonego i w stanie termicznie ulepszonym stwierdzamy, że obecność niklu w tworzywie w ilości 2,67% powoduje podniesienie wszystkich własności wytrzymałościowych a to jednocześnie R i Q, stosunku $Q : R$, A, C i U a również i B. Charakter obniżenia własności wytrzymałościowych z temperaturą przemawia również za stałą niklową: wytrzymałość we wszystkich badanych temperaturach jest wyż-

sza, granica płynności pozostaje stałą aż do 300°C, wydłużenia jak również odporność na uderzenia pozostają prawie niezmienione, pierwsze aż do 500°C, a drugie prawie do 300°C, poza tem wszystkie własności wytrzymałościowe podnoszą się po termicznym ulepszaniu. Jednocześnie i trwałość ulepszanego stanu jest znaczną. Dowodem tego jest zestawienie własności wytrzymałościowych dla stanu dostarczonego i termicznie ulepszanego, umieszczone w tabeli 6 i 7.

Tablica 7.

Własności wytrzymałościowe w stanie							Temp. badania	R	Q	A	C	U	
Surowym czyli dostarczenia							+ 15 ⁰	46,8	31,7	26,5	62,7	13,4	
Termicznie ulepszonym							+ 15 ⁰	56,0	42,8	17,5	82,3	19,7	
"	"						+ 400 ⁰	40,1	26,7	15,3	82,3	14,1	
"	"	po 24 godz. leżenia w temper. 400 ⁰					+ 400 ⁰	40,0	27,0	18,0	83,5	—	
"	"	" 72	"	"	"	"	400 ⁰	+ 400 ⁰	40,1	27,0	18,5	83,5	—
"	"	" 48	"	"	"	"	500 ⁰	+ 500 ⁰	32,4	25,5	19,0	87,6	—

Z powyższego wnioskujemy, że części konstrukcji ze stali niklowej o powyższym składzie posiadają mniej więcej ten sam stopień bezpieczeństwa w temperaturze 400°C, co normalny materiał konstrukcyjny (żelazo mostowe, blachy kotłowe) o tejże zawartości węgla, lecz bez niklu, (Porównaj prof. Czo-

piwski „Blachy kotłów parowych“, Warszawa, 1927), pracujący w temperaturach zwyczajnych.

Co się tyczy własności sprężystych, to jak wiadomo, są one położone w stalach niklowych nieco wyżej, a ulepszanie termiczne podnosi je do poziomu ponad 70% wytrzymałości, jak to widać w tabeli 8.

Tablica 8.

Stan materiału	R	Q	Q/R. 100	P	P/R. 100	A	C
Surowy czyli dostarczenia	48,2	31,5	65,4	25,0	50,2	26,0	62,0
Termicznie ulepszony na miękko . .	58,2	45,1	79,2	39,4	70,0	16,2	75,0
" " na twardo . .	65,4	52,8	80,7	46,0	70,3	11,4	72,0
Zastępczo ulepszony (1 sek. hartow.)	52,3	41,8	79,9	35,1	67,1	15,1	65,0
" " (2 " ")	66,5	53,1	80,0	42,6	64,1	12,3	66,0
" " (3 " ")	70,2	58,4	83,2	49,0	70,0	10,0	68,0

Powyższa praca, jako praca dyplomowa, została wykonana w Zakładzie Metalografii Akademii Górniczej w Krakowie i miała za cel określenie szeregu znormalizowanych danych wytrzymałościowych dla mała węglistej

stali niklowej w zależności od obróbki termicznej i od zmiany temperatur otoczenia.

Na zakończenie zaznaczamy, że wykonanie powyższej pracy zostało ułatwione przez zakupienie materiału i koniecznych przyrządów z Daru Polskiego Hutnictwa Żelaznego.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA AGH



1000328210

BIBLIOTEKA
GŁÓWNA



AKADEMII
GÓRNICZO
HUTNICZEJ

III 23237

Nie

wypożycza się

NZB 6566