

Badania nad zgniotem żelaza.

W. BRONIEWSKI i J. KRÓL.

Zarys historyczny. Metale i stopy trwale odkształcone na zimno, np. za pomocą walcowania, przeciągania lub kucia, podlegają zgniotowi którego stopień (Z) ustalony zostaje procentowo przez stosunek zmniejszenia przekroju do przekroju pierwotnego

$$Z = \frac{S_0 - S_1}{S_0} 100,$$

gdzie S_0 jest przekrojem pierwotnym badanej próbki, zaś S_1 jej przekrojem po zgniocie.

Zgniót wpływa znacznie na mechaniczne własności. Równocześnie, w mniejszym stopniu, zmienione zostają inne własności jak, gęstość, opór elektryczny, rozpuszczalność w odczynnikach i t. d.

Utwardzanie metali zapomocą zgniotu było od dawna empirycznie znane i, jak to stwierdza Réaumur,¹⁾ szeroko stosowane przez szpilkarzy na początku XVIII wieku. Również znane było zmiękczenie utwardzonego przez zgniót metalu zapomocą wyżarzania.

Badanie zgniotu metodami nowoczesnymi rozpoczęte zostało przez Charpy²⁾, który wykazał zmiany mikrograficzne towarzyszące samemu zgniotowi i wyżarzaniu po zgniocie.

Grard³⁾ bada systematycznie zmianę własności mechanicznych mosiądzu i miedzi w zależności od stopnia zgniotu i od temperatury wyżarzenia. Znajduje on że zgniót powoduje stały wzrost wytrzymałości na rozerwanie i że równocześnie zmniejsza się wydłużenie przy

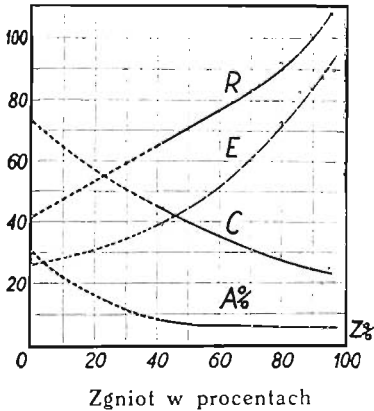
¹⁾ Réaumur, Art. de l'épinglier, avec addition de MM. Duhamel et Perronet, Paris, 1761, str. 8 i 11.

²⁾ Charpy, C. R. 116 — 1131 — 1893; 117 — 850 — 1893.

³⁾ Grard, Revue de Métall. 6 — 1069 — 1909.

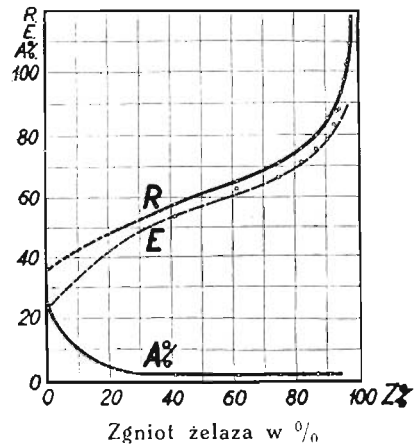
rozerwaniu, z początku mocno, następnie coraz słabiej. Powyżej pewnej, właściwej dla każdego metalu, temperatury następuje rekrytalizacja zgniecionego materiału, zaś wielkość nowoutworzonych kryształów zależy od temperatury wyżarzania.

Mechanicznymi własnościami zgniecionego żelaza zajmowali się już Bauschinger¹⁾, Unwin²⁾, Heyn³⁾, Rudeloff⁷⁾ i Stribeck⁸⁾. Systematyczne badania w tej dziedzinie zostały jednak przedsięwzięte dopiero przez Goerensa⁹⁾, który bada zmianę przez zgniot spowodowaną fizycznych właściwości stali węglistej. Z pośród własności mechanicznych zbadane zostały wytrzymałość na rozerwanie, granica sprężystości, wydłużenie przy rozerwaniu, przewężenie i, dla niektórych próbek, twardość.



Rys. 1.

Zgniot b. miękkiej stali według Goerensa. *R* — wytrzymałość na rozerwanie w kg/mm^2 ; *E* — granica sprężystości; *A* — wydłużenie przy rozerwaniu w $\%$; *C* — przewężenie.



Rys. 2.

Zgniot b. miękkiej stali według Altpe-tera. *R* — wytrzymałość na rozerwanie w kg/mm^2 , *E* — granica sprężystości, *A* — wydłużenie przy rozerwaniu.

¹⁾ Bauschinger, Zivilingenieur z 1881 r., str. 289.

²⁾ Unwin, Proc. Roy. Soc. 57 — 178 — 1895.

³⁾ Heyn, Zs. Ver. d. 1. 1900 r., str. 433.

⁷⁾ Rudeloff, Mitt. Kgl. Techn. Versuchsanst. Berlin, 1901, zeszyt 1, str. 1.

⁸⁾ Stribeck, Zs. d. Ver. d. I., 1909 r., str. 241.

⁹⁾ Goerens, Revue de Métall. 10 — 608 — 1931. Ferrum, 1 — 65 — 1912

Sród zbadanych przez Goerensa próbek najbardziej zbliża się do żelaza stal thomasowska o 0,07^o/_o węgla i 0,5^o/_o manganu. Wyniki dla niej otrzymane przedstawia rys. 1.

Pomiary Goerensa obejmują przy małych i średnich zgniotach dość nieznaczną ilość próbek i nie dają np. możności ustalenia punktu przegięcia na krzywej wydłużeń przy rozerwaniu.

W nieco późniejszych badaniach Altpetera¹⁰⁾ nad przeciąganiem b. miękkiej stali o zawartości węgla zbliżonej do 0,1^o/_o, uwzględniona została wytrzymałość na rozerwanie, granica sprężystości i wydłużenie przy rozerwaniu, jak to wskazuje rys. 2. unaczyniający najliczniejszą serję doświadczeń.

W tej pracy próbki odpowiadające słabym i średnim zgniotom są równie mało liczne jak u Goerensa. Natomiast zgniot maksymalny osiąga 98,3^o/_o. Przy najsilniejszych zgniotach widzimy na wykresie znaczny wzrost wytrzymałości przekraczającej 100 kg/mm².

Zarówno badania Goerensa jak i Altpetera nie dają zadawalającego rozwiązania zagadnień zgniotu czystego żelaza, gdyż wykonane zostały na zanieczyszczonym materiale przemysłowym, nie określają, z powodu zbyt małej ilości próbek, dostatecznie dokładnego przebiegu własności mechanicznych i różnią się znacznie w swych wynikach pomiarowych.

Warunki rekrytalizacji żelaza po zgniocie były badane przez Goerensa¹¹⁾. Próby zostały przeprowadzone na bardzo miękkiej stali o 0,8^o/_o węgla i 0,4^o/_o manganu zgniecionej do 85^o/_o.

Wpływ 25 minutowego odpuszczania na wytrzymałość i na wydłużenie wskazuje rys. 3.

Według tych wyników rekrytalizacja zgniecionej stali zachodzi przy 520^o, co uwidocznione jest przez nagły spadek wytrzymałości i wzrost wydłużenia.

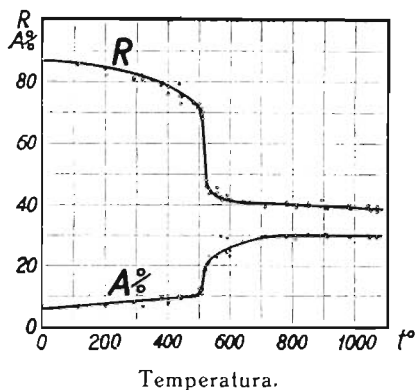
Poniżej temperatury rekrytalizacji, wpływ odpuszczania daje się również zauważyć w znacznie mniejszym jednak stopniu aniżeli przy rekrytalizacji.

Wpływ czasu odpuszczania poniżej temperatury rekrytalizacji badany był przy 300^o, 360^o, 400^o i 495^o (rys. 4).

¹⁰⁾ Altpeter, St. u. E. 35 — 362 — 1915.

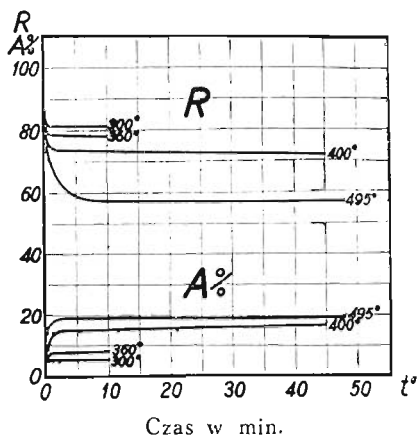
¹¹⁾ Goerens, Revue de Métall. 10 — 1337 1913.

Widzimy na wykresie, że przy temperaturach od 300° do 400° ostateczne własności mechaniczne ustalone zostają już po godzinnem odpuszczeniu. Natomiast przy temperaturze 495° zbliżonej do temperatury rekrytalizacji, potrzeba na taką stabilizację przeszło 5 godzin.



Rys. 3.

Wpływ odpuszczania na wytrzymałość na rozerwanie R i na wydłużenie przy rozerwaniu A według Goerensa.



Rys. 4.

Wpływ czasu odpuszczania na wytrzymałość na rozerwanie R i na wydłużenie przy rozerwaniu A według Goerensa.

Próbki i pomiary. Badania nasze wykonane zostały na żelazie Armco, wyrobu francuskiego, w którym suma zanieczyszczeń wynosiła zaledwie 0,13%. Skład jego był następujący:

| C | Mn | Si | S | P |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,080 | ślady | 0,007 | 0,019 | 0,024 |

Materiał ten, dostarczony w formie prętów o średnicy 20 i 10 mm poddawany był kolejno walcowaniu i przeciąganiu dla otrzymania właściwego zgniotu. Wyżarzania dokonywano przez godzinę w atmosferze CO_2 przy temperaturze 650°. Zgnioty słabe, nie przekraczające 10% otrzymywano przez rozciąganie pręta na maszynie wytrzymałościowej, co, według doświadczeń L. Guillet'a¹²⁾ daje takie same wyniki jak walcowanie lub przeciąganie.

¹²⁾ L. Guillet, R. de Métallurgie, 20 — 63 — 1923.

Normalne nasze próbki miały 5 mm średnicy i 25 cm całkowitej długości, gdyż krótsze próbki nie zawsze rozrywały się po środku przy znaczniejszych zgniotach. Mniejszą średnicę miały jedynie próbki o zgniocie przekraczającym 94%. Długość pomiarowa wynosiła 10 średnic, próbki były jednak znaczone punktowo wzdłuż 12 cm odległościami dwukrotnej średnicy.

Rozrywanie probierki odbywało się na 10-tonnowej prasie Amslera z dodatkowym 1-tonnowym tłokiem.

Granice sprężystości utożsamiono z granicą proporcjonalności uwidocznioną na wykresie wytrzymałościowym automatycznie zarejestrowanym. Przekrój probierki mierzono śrubą mikrometryczną z dokładnością 0,01 mm. Pomiar wydłużenia wykonywany był z dokładnością 0,1 mm; przewężenie ustalano zapomocą mikroskopu, przesuwanego śrubą mikrometryczną dającą pomiar 0,01 mm.

Uważaliśmy za wskazane rozdzielić całkowite wydłużenie przy rozerwaniu (A) na wydłużenie równomierne (a) i na przewężeniowe.

Wydłużenie równomierne obliczone było na podstawie zmniejszenia średnicy próbki

$$a = 100 \left(\frac{d_0^2}{d_1^2} - 1 \right)$$

gdzie d_0 i d_1 oznaczają średnice próbki przed i po rozerwaniu mierzone na punktach ograniczających jej długość pomiarową.

Wydłużenie przewężeniowe otrzymywano jako różnicę

$$b = A - a$$

Próby wytrzymałościowe były robione conajmniej na dwóch próbkach.

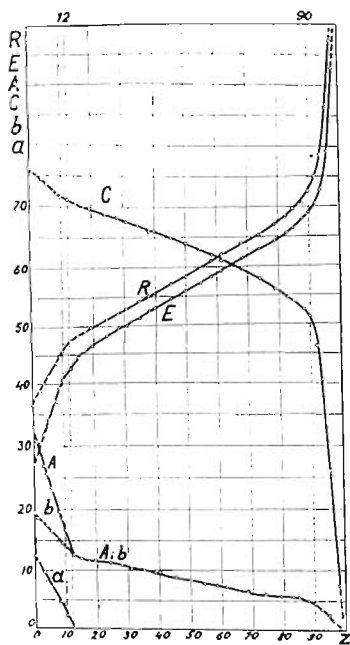
Pomiary twardości wykonywano kulką 1 mm pod ciśnieniem 12 kg na próbkach odciętych z probierek wytrzymałościowych. Próbki te były inkludowane i polerowane jak do mikrografji. Średnice śladów odciskowych odczytywano pod mikroskopem, którego każda działka pomiarowa wynosiła 0,005 mm. Przy obliczaniu liczby twardości wprowadzano poprawkę by przyrównać wyniki pomiaru do normalnych warunków otrzymywanych kulką 10 mm pod ciśnieniem 3000 kg.

Wyniki pomiarów wytrzymałościowych. Wyniki te podane zostały w tablicy I i na rys. 5.

Tablica I.

Pomiary wytrzymałościowe. Z — zgniot w %; R — wytrzymałość na rozerwanie w kg/mm^2 ; E — granica sprężystości w kg/mm^2 ; A — całkowite wydłużenie przy rozerwaniu w %; a — wydłużenie równomierne w %; b — wydłużenie przewężeniowe w %; C — przewężenie w %.

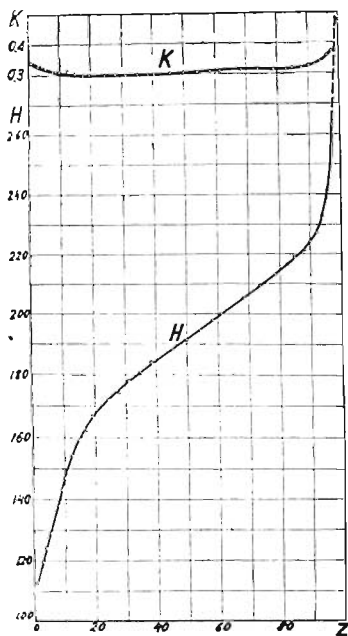
| Z | R | E | A | a | b | C |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| 0.0 | 36.7 | 27.2 | 31.8 | 12.4 | 19.4 | 76.1 |
| 1.0 | 37.5 | 28.2 | 30.4 | 11.7 | 18.4 | 75.5 |
| 3.0 | 39.2 | 31.8 | 26.7 | 9.7 | 17.0 | 74.9 |
| 4.25 | 40.4 | 33.3 | 25.5 | 8.0 | 17.5 | 74.2 |
| 8.0 | 43.2 | 37.2 | 20.1 | 4.6 | 15.5 | 72.7 |
| 5.5 | 41.4 | 34.1 | 23.7 | 7.1 | 16.6 | 73.7 |
| 9.0 | 44.8 | 39.0 | 18.4 | 3.7 | 14.7 | 72.2 |
| 10.2 | 45.6 | 40.5 | 16.6 | 2.4 | 14.2 | 71.6 |
| 12.75 | 47.6 | 43.5 | 12.5 | — | 12.5 | 71.1 |
| 15.0 | 48.3 | 44.7 | 12.2 | — | 12.2 | 70.5 |
| 17.5 | 49.0 | 45.5 | 11.8 | — | 11.8 | 69.8 |
| 19.6 | 49.8 | 46.5 | 11.4 | — | 11.4 | 69.7 |
| 24.8 | 51.0 | 48.0 | 11.4 | — | 11.4 | 68.7 |
| 27.9 | 52.2 | 49.6 | 10.8 | — | 10.8 | 68.3 |
| 31.3 | 53.2 | 50.0 | 10.1 | — | 10.1 | 67.5 |
| 35.0 | 54.5 | 51.0 | 10.0 | — | 10.0 | 67.0 |
| 38.5 | 55.1 | 52.5 | 9.8 | — | 9.8 | 66.2 |
| 40.2 | 55.5 | 53.0 | 9.6 | — | 9.6 | 66.0 |
| 45.6 | 57.3 | 54.5 | 8.7 | — | 8.7 | 64.7 |
| 50.0 | 58.5 | 55.8 | 8.4 | — | 8.4 | 64.0 |
| 54.6 | 59.8 | 57.0 | 7.9 | — | 7.9 | 62.8 |
| 58.4 | 61.0 | 58.0 | 7.5 | — | 7.5 | 62.0 |
| 61.7 | 62.0 | 59.0 | 7.2 | — | 7.2 | 61.0 |
| 68.5 | 64.0 | 61.5 | 6.6 | — | 6.6 | 59.2 |
| 73.9 | 65.7 | 63.0 | 6.1 | — | 6.1 | 57.9 |
| 79.1 | 67.2 | 64.0 | 5.7 | — | 5.7 | 56.0 |
| 82.9 | 68.0 | 65.8 | 5.6 | — | 5.6 | 54.6 |
| 85.0 | 70.2 | 66.8 | 5.4 | — | 5.4 | 54.1 |
| 88.0 | 70.5 | 68.0 | 5.0 | — | 5.0 | 52.5 |
| 90.3 | 72.5 | 69.0 | 4.7 | — | 4.7 | 51.7 |
| 92.2 | 75.0 | 70.3 | 3.7 | — | 3.7 | 46.1 |
| 93.9 | 78.5 | 72.0 | 2.9 | — | 2.9 | 40.6 |
| 96.2 | 86.6 | 79.4 | 1.7 | — | 1.7 | 26.2 |
| 97.6 | 97.6 | 93.2 | 1.0 | — | 1.0 | 7.2 |



Zgniot

Rys. 5.

Współczynniki wytrzymałościowe w zależności od zgniotu; R — wytrzymałość na rozerwanie; E — granica sprężystości; A — całkowite wydłużenie przy rozerwaniu; a — wydłużenie równomierne; b — wydłużenie przewężeniowe; c — przewężenie.



Zgniot

Rys. 6.

Zależność twardości od zgniotu; Z — zgniot; H — twardość; k — stosunek wytrzymałości do twardości $= \frac{R}{H}$

Na wykresie (rys. 5) dają się zauważyć trzy kolejne stopnie zgniotu. Pierwszy stopień sięga do 12% zgniotu i uwidoczniiony jest przez zanikanie równomiernego wydłużenia (a). W trzecim stopniu, powyżej 90% zgniotu, zdąża do zaniku przewężenie (c), które dotąd utrzymywało się na wysokim poziomie, powyżej 50%, natomiast silnie wzrasta wytrzymałość na rozerwanie R , osiągając wartość o 165% wyższą od właściwej dla metalu przed zgniotem.

Widzimy więc, że załamanie krzywej całkowitego wydłużenia (A) normalnie dające się zauważyć przy badaniu zgniotu metali, spowodowane jest przez zanik równomiernego wydłużenia i odpowiada końcowi pierwszego stopnia zgniotu. Przy wyższych zgniotach zachodzi jedynie wydłużenie przewężeniowe.

Granice pierwszego stopnia zgniotu (Z_1) można obliczyć z wystarczającym przybliżeniem na podstawie wzoru prof. Krupkowskiego¹³⁾, o ile się zna wydłużenie równomierne metalu niezgniecionego (a). Dla żelaza otrzymujemy wtedy:

$$Z = 100 \frac{a}{a + 100} = 100 \frac{12,4}{12,4 + 100} = 11\%$$

gdy doświadczenie wskazuje na granicę pierwszego stopnia zgniotu przy 12^{0/0}.

Tablica II.

Pomiary twardości. Z — zgniot w %, H — twardość w kg/mm²,
 k — stosunek wytrzymałości na rozzerwanie do twardości.

| Z | H | $k = \frac{R}{H}$ | Z | H | $k = \frac{R}{H}$ |
|-------|-----|-------------------|------|-----|-------------------|
| 0.0 | 108 | 0.340 | 40.2 | 184 | 0.302 |
| 1.0 | 111 | 0.337 | 45.6 | 188 | 0.305 |
| 3.0 | 120 | 0.327 | 50.0 | 191 | 0.306 |
| 4.25 | 124 | 0.326 | 54.6 | 194 | 0.308 |
| 8.0 | 139 | 0.311 | 58.4 | 198 | 0.308 |
| 5.5 | 129 | 0.321 | 61.7 | 200 | 0.310 |
| 9.0 | 143 | 0.313 | 68.5 | 205 | 0.316 |
| 10.2 | 147 | 0.310 | 73.9 | 209 | 0.314 |
| 12.75 | 154 | 0.309 | 79.1 | 213 | 0.315 |
| 15.0 | 159 | 0.304 | 82.9 | 217 | 0.313 |
| 17.5 | 163 | 0.301 | 85.0 | 219 | 0.320 |
| 19.6 | 167 | 0.298 | 88.0 | 222 | 0.318 |
| 24.8 | 172 | 0.297 | 90.3 | 224 | 0.324 |
| 27.9 | 174 | 0.300 | 92.2 | 227 | 0.330 |
| 31.3 | 178 | 0.299 | 93.9 | 231 | 0.340 |
| 35.0 | 181 | 0.301 | 96.2 | 241 | 0.359 |
| 38.5 | 184 | 0.299 | 97.6 | 263 | 0.372 |

¹³⁾ Krupkowski, Mechaniczne własności miedzi, Prace Zakładu Metalurgicznego P. W. t. II, Nakł. Akad. Nauk Techn. 1930 r., str. 27, wzór (37).

Wynik pomiarów twardości. Tablica II i rys. 6 wskazują twardość *Brinella* (H) w zależności od zgniotu oraz stosunek wytrzymałości na rozerwanie do twardości

$$k = \frac{R}{H}.$$

Widzimy na wykresie (rys. 6), że przebieg krzywej twardości jest analogiczny do przebiegu krzywej wytrzymałości na rozerwanie (R , rys. 5). Pomiędzy temi dwiema własnościami niema jednak ścisłej proporcjonalności jak na to wskazuje wartość współczynnika k . Spada on nieco na początku pierwszego stopnia zgniotu, utrzymuje się na stałym prawie poziomie w obrębie drugiego stopnia i wzrasta znowu pod koniec trzeciego stopnia zgniotu. Wiadomo, że dla stali bardzo miękkiej wynosi $k = 0,345$ i spada dla stali twardej do $k = 0,321$ (Grard)¹⁴.

Wyżarzanie. Próbki o rozmaitym stopniu zgniotu wyżarzane były przez 1 ½ godziny w atmosferze wodoru przy temperaturach od 300° do 1000°. Po wyżarzeniu inkludowano próbki i polerowano je jak do mikrografji. Próbki te trawiono 3% roztworem wodnym kwasu azotowego dla pomiaru wielkości kryształów, poczem polerowano je ponownie i badano twardość na aparacie Le Grix robiąc odciski 1 mm kulką pod ciśnieniem 12 kg, jak przy pomiarach próbek zgniecionych.

Wyniki badań twardości w zależności od stopnia zgniotu i od temperatury wyżarzania podane zostały w tablicy III.

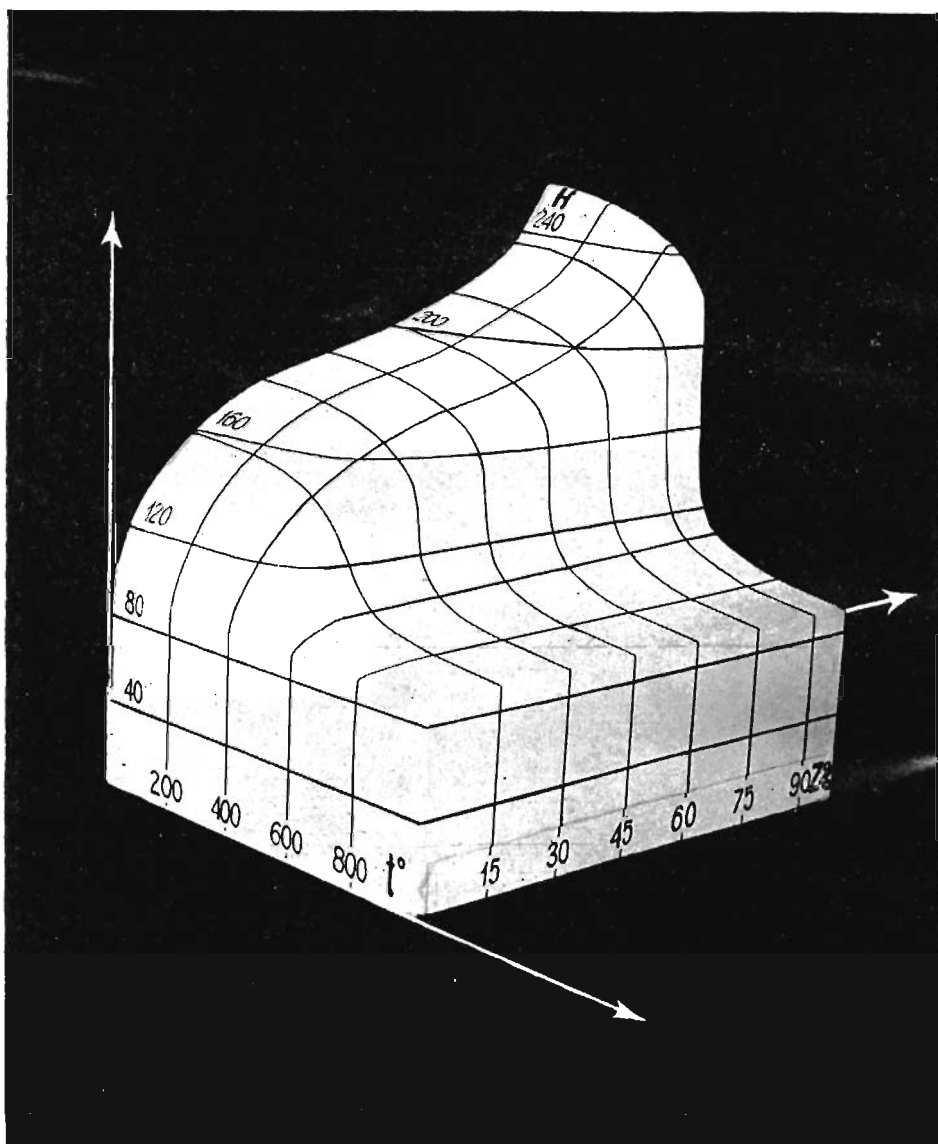
Na podstawie tych cyfr wykonany został model gipsowy, przedstawiony na rys. 7.

Na tym modelu widzimy powyżej 500° charakterystyczny spadek twardości, wywołany przez ustąpienie zgniotu i rekrytalizację materiału.

Na rys. 8-ym uwidocznione zostały trzy przekroje pionowe tego modelu odpowiadające zgniotom 2%, 54% i 98%.

Widzimy na tym wykresie, że przy wysokim i średnim zgniocie dość gwałtowny spadek twardości następuje pomiędzy 525° i 550°. Natomiast przy słabym zgniocie przebieg krzywej jest bardziej łagodny.

¹⁴) Revue de Métall. 8 — 244 — 1911.



Rys. 7.

Zmiana twardości zgnieczonego żelaza w zależności od temperatury wyżarzania.

H — twardość; t — temperatura wyżarzania; Z — stopień zgnioću w %.

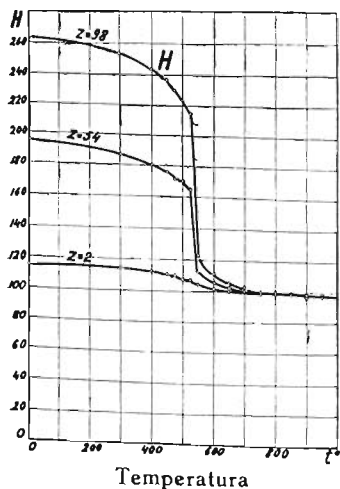
Już powyżej tych temperatur daje się zauważyć stopniowe zmniejszanie twardości, zwłaszcza przy silnym zgnioću, świadczące,

Tablica III.

Twardość w zależności od stopnia zgniotu i od wyżarzania. Z — zgniot w %;
 t — temperatura wyżarzania.

| Z_0^0 °C | 2 | 4 | 6 | 8 | 12 | 17.0 | 24.0 | 31.0 | 40.0 | 54.0 | 60.0 | 70.0 | 80.0 | 90.0 | 92.0 | 96.0 | 98.0 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 115 | 125 | 133 | 141 | 150 | 163 | 173 | 179 | 185 | 195 | 199 | 205 | 214 | 228 | 240 | 250 | 263 |
| 300 | 114 | 121 | 127 | 135 | 144 | 154 | 165 | 171 | 177 | 186 | 191 | 196 | 205 | 220 | 231 | 241 | 253 |
| 400 | 112 | 116 | 122 | 130 | 138 | 146 | 156 | 164 | 171 | 180 | 184 | 189 | 198 | 212 | 222 | 232 | 243 |
| 450 | 110 | 113 | 116 | 125 | 133 | 141 | 150 | 157 | 166 | 175 | 180 | 185 | 193 | 206 | 215 | 225 | 236 |
| 475 | 109 | 111 | 113 | 122 | 130 | 138 | 147 | 155 | 164 | 172 | 177 | 182 | 190 | 203 | 212 | 221 | 230 |
| 500 | 107 | 110 | 111 | 120 | 126 | 134 | 143 | 150 | 159 | 169 | 172 | 179 | 185 | 199 | 208 | 215 | 225 |
| 525 | 106 | 107 | 108 | 116 | 122 | 130 | 140 | 146 | 155 | 165 | 169 | 174 | 182 | 192 | 200 | 207 | 215 |
| 550 | 105 | 105 | 106 | 110 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 118 | 117 | 112 | 117 | 121 | 121 |
| 600 | 103 | 103 | 104 | 105 | 105 | 106 | 106 | 107 | 107 | 106 | 108 | 109 | 106 | 105 | 109 | 109 | 109 |
| 650 | 100 | 100 | 100 | 101 | 101 | 101 | 100 | 102 | 102 | 102 | 100 | 103 | 104 | 105 | 103 | 105 | 105 |
| 700 | 99 | 98 | 99 | 99 | 99 | 100 | 100 | 99 | 101 | 102 | 99 | 103 | 103 | 103 | 103 | 103 | 103 |
| 750 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 99 | 100 | 99 | 100 | 100 | 99 | 100 | 100 |
| 800 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 97 | 99 | 98 |
| 850 | 99 | 98 | 98 | 98 | 98 | 97 | 97 | 99 | 98 | 98 | 97 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 |
| 900 | 96 | 97 | 97 | 97 | 98 | 99 | 97 | 97 | 97 | 97 | 98 | 97 | 99 | 98 | 96 | 98 | 97 |
| 950 | 96 | 97 | 96 | 96 | 96 | 98 | 97 | 97 | 97 | 97 | 97 | 98 | 97 | 97 | 97 | 96 | 96 |
| 1000 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 |

Twardość



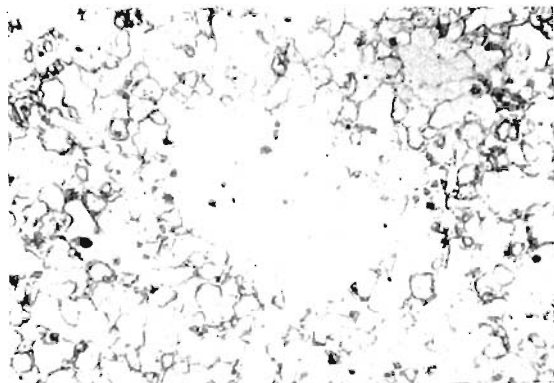
Rys. 8.
 Zależność twardości od zgniotu (Z) i od
 temperatury wyżarzania (t).

że nawet poniżej temperatury regeneracji metalu możliwe jest odpuszczanie, zmieniające jego własności mechaniczne.

Wzrost kryształów. Wyżarzanie po zgnieciu powoduje znaczny wzrost kryształów, zwłaszcza przy słabych zgniotach, jak to wykazał Chapell¹⁵⁾. Zazwyczaj przyjmuje się, że temperatura najbardziej sprzyjająca wzrostowi kryształów żelaza i stali ograniczona jest punktami przełomowymi A_1 i A_3 , jednakże Charpy¹⁶⁾, który pierwszy zauważył to zjawisko, zaznacza, że uwidocznione zostaje ono zwłaszcza w stalach zawierających większą ilość fosforu.

W naszych badaniach pomiar przeciętnej wielkości krzysztalów wykonany był na próbkach użytych do pomiaru twardości.

Bezpośrednio po spadku twardości pomiędzy 525° i 550° nie daje się jeszcze zauważyć zmiana budowy i metal zachowuje nadal pseudomorficzne pozory zgniotu. Dopiero powyżej 600° dają się zauważyć pojedyncze ośrodki rekrytalizacji, dokoła których tworzą się gniazda większych kryształów jak to widać na rys. 9. Poniżej tej temperatury rekrytalizacji pomiar wielkości jest bardzo niepewny i podane liczby mogą być uważane tylko za orientacyjne.



Rys. 9.
Początek rekrytalizacji
zgniecionego żelaza. Tra-
wienie kwasem azotowym.
Pow. = 160.

Przy początkach rekrytalizacji mamy do czynienia z metalem niejednorodnym, zawierającym nieliczne większe kryształy na tle pozornie nie podległym rekrytalizacji.

Wyniki pomiarów wielkości kryształów w zależności od temperatury wyżarzania wskazane zostały w tablicy IV.

¹⁵⁾ Chapell, J. of Iron a Steel Inst. 89 — 460 — 1914. Ferrum, 13 — 6, 17 — 1915/16.

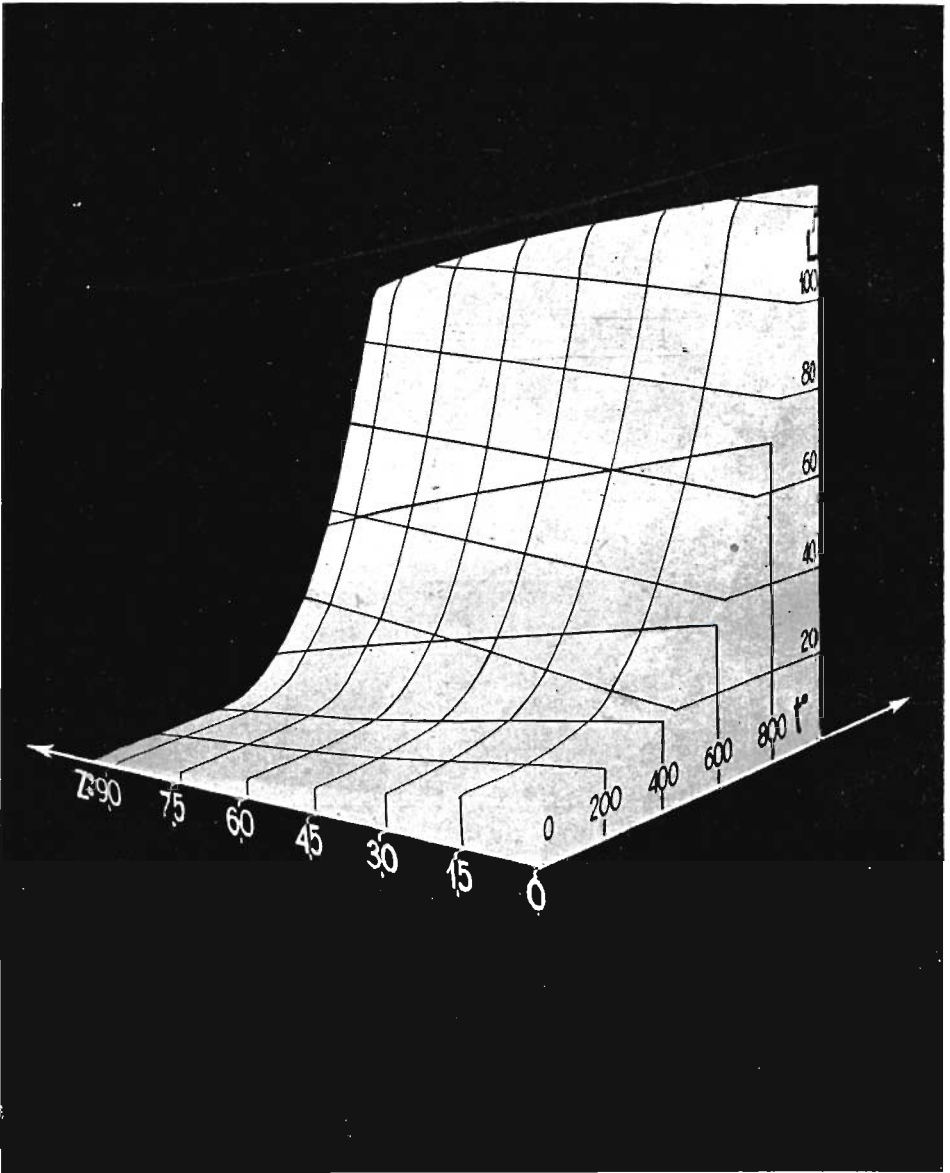
¹⁶⁾ Charpy, R. de Métall. 7 — 655 — 1910; 8 — 371 — 1911.

Tablica IV.
Wielkość kryształów, wyrażona w mikronach (0,001 mm) w zależności od stopnia zgniotu i od temperatury wyzarzania.
Z — zgniot w %, t — temperatura wyzarzania.

| $\frac{z\%}{t^{\circ}C}$ | 2 | 4 | 6 | 8 | 12 | 17,0 | 24,0 | 31,0 | 40,0 | 54,0 | 60,0 | 70,0 | 80,0 | 90,0 | 92,0 | 96,0 | 98,0 |
|--------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| 0 | 13,0 | 12,5 | 12,0 | 11,5 | 10,0 | 9,0 | 8,0 | 6,5 | 4,5 | 2,5 | 2,0 | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 1,0 | 0,5 | 0,0 |
| 300 | 15,0 | 14,5 | 14,0 | 14,5 | 13,0 | 11,5 | 10,0 | 9,0 | 6,5 | 4,5 | 4,0 | 3,0 | 1,5 | 1,5 | 1,0 | 0,5 | 0,0 |
| 400 | 17,5 | 17,0 | 16,0 | 16,0 | 15,0 | 14,0 | 12,5 | 11,0 | 9,0 | 6,0 | 5,0 | 3,5 | 2,0 | 2,0 | 1,5 | 1,0 | 0,5 |
| 450 | 19,5 | 19,0 | 18,0 | 18,5 | 17,0 | 16,0 | 14,0 | 12,5 | 10,5 | 7,5 | 6,0 | 4,0 | 2,5 | 2,0 | 2,0 | 1,5 | 0,5 |
| 475 | 21,0 | 20,0 | 19,0 | 19,5 | 18,0 | 17,0 | 15,0 | 13,5 | 11,5 | 8,5 | 7,0 | 5,0 | 3,0 | 2,5 | 2,5 | 2,0 | 1,0 |
| 500 | 22,5 | 22,0 | 21,5 | 21,0 | 19,0 | 18,5 | 17,0 | 15,0 | 12,5 | 10,0 | 8,0 | 6,0 | 4,0 | 3,0 | 3,0 | 2,5 | 1,5 |
| 525 | 25,0 | 24,0 | 24,5 | 23,0 | 21,0 | 20,0 | 18,0 | 16,5 | 14,0 | 11,0 | 9,0 | 7,0 | 5,0 | 4,0 | 3,5 | 3,0 | 2,0 |
| 550 | 27,0 | 26,0 | 25,5 | 25,0 | 23,0 | 22,5 | 20,0 | 18,5 | 16,0 | 13,0 | 10,0 | 9,5 | 7,0 | 6,0 | 5,0 | 4,0 | 3,5 |
| 600 | 32,5 | 32,0 | 31,5 | 31,0 | 29,0 | 28,5 | 26,0 | 24,0 | 21,5 | 17,5 | 16,0 | 14,5 | 11,5 | 10,0 | 9,0 | 8,0 | 7,0 |
| 650 | 40,0 | 38,0 | 37,0 | 37,5 | 36,0 | 35,0 | 32,5 | 30,0 | 27,5 | 24,0 | 22,0 | 20,0 | 16,5 | 15,0 | 14,0 | 13,0 | 12,0 |
| 700 | 47,5 | 46,0 | 45,5 | 45,0 | 43,0 | 42,5 | 40,0 | 38,5 | 35,0 | 31,0 | 29,0 | 27,0 | 23,5 | 21,0 | 20,0 | 19,0 | 17,5 |
| 750 | 55,0 | 54,0 | 53,5 | 53,0 | 52,0 | 51,0 | 49,0 | 47,5 | 45,0 | 40,0 | 37,0 | 35,0 | 32,0 | 30,0 | 27,5 | 26,0 | 25,0 |
| 800 | 65,0 | 64,0 | 63,5 | 63,0 | 62,0 | 61,5 | 60,0 | 58,0 | 55,0 | 50,0 | 47,0 | 45,0 | 41,5 | 39,0 | 36,5 | 34,0 | 33,5 |
| 850 | 76,5 | 76,0 | 75,5 | 75,0 | 74,0 | 73,0 | 71,0 | 70,0 | 67,5 | 62,2 | 60,0 | 57,0 | 53,0 | 50,0 | 48,0 | 46,0 | 44,0 |
| 900 | 90,0 | 89,0 | 88,5 | 88,0 | 87,0 | 86,5 | 85,0 | 83,0 | 80,0 | 75,0 | 72,0 | 70,0 | 63,5 | 59,0 | 61,0 | 59,0 | 57,5 |
| 950 | 105 | 103 | 102,5 | 102,0 | 102 | 101,5 | 100,0 | 98,0 | 95,0 | 91,0 | 88,0 | 85,0 | 81,0 | 79,0 | 76,0 | 74,0 | 72,5 |
| 1000 | 122 | 121 | 120 | 120 | 119,5 | 119 | 117,0 | 115 | 113 | 110 | 107 | 104 | 100,0 | 97,0 | 94 | 92,0 | 90,0 |

Wielkość kryształów

Na podstawie tych wyników sporządzony został model gipsowv, przedstawiony na rys. 10.



Rys. 10.

Zależność wielkości kryształów od zgniotu (Z) i od temperatury wyżarzania (t).

Wyniki te potwierdzają obserwację, że przy jednakowych warunkach wyżarzania wzrost kryształów większy jest dla słabszych zgniotów niż dla mocniejszych. Natomiast przy określonym zgniocie wielkość kryształów stale wzrasta w zależności od temperatury wyżarzania i nie daje się zauważyć żadne maximum kryształów w obrębie temperatur punktów przełomowych A_1 i A_3 .

Prawdopodobnym więc się wydaje, że maksymalny wzrost kryształów w obrębie punktów przełomowych jest nie tylko wzmacniany ale i wywołany przez obecność fosforu w ilości większej aniżeli w żelazie Armco (0,024%).

Na rys. 11-ym przedstawione zostały trzy przekroje modelu, odpowiadające zgniotom 2%, 54% i 98%.

Twardość rzeczywista. Zasada pomiaru twardości metodą Brinella polega na znalezieniu stanu równowagi pomiędzy naciskiem kulki i sprężystą reakcją śladu odcisku tej kulki. Przy wykonaniu pomiaru dokonywuje się równocześnie zgniot badanego metalu, tak że równowagę ciśnienie kulki metal nie w tym stanie jaki pragniemy zbadać, lecz zgnieciony w stopniu nam nieznanym. Otrzymujemy więc twardość większą, niż gdyby na ciśnienie kulki reagował metal w stanie pierwotnym, czyli nie zgnieciony.

Dla uzyskania tej rzeczywistej twardości można zastosować metodę, wskazaną przez Hanriota¹⁷⁾, według której po wykonaniu odcisku twardości wyżarza się próbkę powyżej temperatury rekryształizacji i powtarza się odcisk na tem samym miejscu. Po kilkudziesięciu takich kolejnych pomiarach i wyżarzaniach, otrzymana liczba twardości przestaje wzrastać co wskazuje na ustalenie się równowagi pomiędzy ciśnieniem kulki i nie podlegającym już zgniotowi śladem odcisku.

Pomiar twardości rzeczywistej odbywał się równolegle na 2 próbkach żelaza Armco o średnicy 20 mm. Na jednej z nich wykonywano kolejne odciski twardości kulką 10 mm pod naciskiem 500 kg na prasie Amslera, na drugiej próbce odcisk był uskuteczniiony stożkiem o kącie 120° pod ciśnieniem 150 kg otrzymanym za pomocą aparatu firmy Alpha. W obu pomiarach za liczbę twardości przyjmowano stosunek ciśnienia w kg do powierzchni odcisku wyrażonej w mm². Wyżarzanie odbywało się przy 650°.

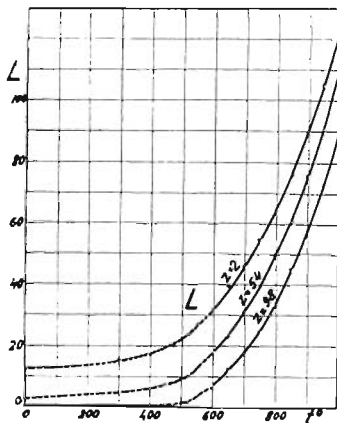
Wyniki pomiarów wskazane zostały w tablicy V i na rys. 12-ym.

¹⁷⁾ Hanriot, Revue de Métall. 10 — 595 — 1913.

T a b l i c a V.

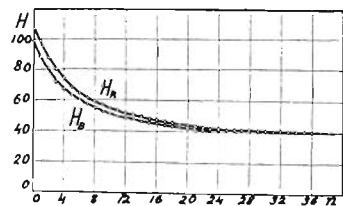
Twardość rzeczywista. n —ilość wyżarzeń. H_R —twardość otrzymana stożkiem o kącie 120 pod ciśnieniem 150 kg. H_B —twardość otrzymana kulką 10 mm pod ciśnieniem 500 kg.

| n | H_R | H_B | n | H_R | H_B | n | H_R | H_B |
|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|
| 0 | 109,0 | 98,0 | 11 | 53,0 | 50,0 | 22 | 42,5 | 42,0 |
| 1 | 98,0 | 89,0 | 12 | 51,5 | 48,5 | 23 | 42,0 | 41,5 |
| 2 | 87,5 | 80,0 | 13 | 50,0 | 48,0 | 24 | 41,5 | 41,0 |
| 3 | 80,0 | 72,5 | 14 | 49,0 | 47,0 | 25 | 41,5 | 41,0 |
| 4 | 73,0 | 66,0 | 15 | 48,0 | 45,5 | 26 | 41,0 | 41,0 |
| 5 | 68,0 | 63,0 | 16 | 47,0 | 45,0 | 27 | 41,0 | 41,0 |
| 6 | 65,0 | 60,0 | 17 | 46,0 | 44,0 | 28 | 40,5 | 40,5 |
| 7 | 61,0 | 57,5 | 18 | 45,0 | 43,5 | 29 | 40,5 | 40,5 |
| 8 | 59,0 | 55,0 | 19 | 44,0 | 43,0 | 30 | 40,0 | 40,0 |
| 9 | 57,0 | 52,0 | 20 | 43,5 | 42,5 | 31 | 40,0 | 40,0 |
| 10 | 54,0 | 51,0 | 21 | 43,0 | 42,0 | 32 | 40,0 | 40,0 |



Temperatura
Rys. 11.

Zmiana wielkości kryształów zgniecionego żelaza w zależności od temperatury wyżarzania. L —wielkość kryształów w mikronach; t —temperatura wyżarzania; Z —stopień zgniotu w %.



Ilość wyżarzeń.
Rys. 12.

Pomiar twardości rzeczywistej; n —ilość wyżarzeń; H_R —twardość otrzymana stożkiem o kącie 120° pod ciśnieniem 150 kg H_B —twardość otrzymana kulką 10 mm pod ciśnieniem 500 kg.

Widzimy na wykresie (rys. 12), że próba stożkiem daje liczbę twardości nieco większą niż próba kulką. Po trzydziestu kilku wyżarzaniach oba pomiary prowadzą do wspólnej twardości rzeczywistej, zbliżonej do 40. Początkowa różnica wyników pomiaru stożkiem i kulką spowodowana więc była głównie odmiennym zgniotem śladu odcisku.

Wnioski.

1. Zbadane zostały dla żelaza, w zależności od zgniotu, wytrzymałość na rozerwanie, granice sprężystości, wydłużenie całkowite, wydłużenie równomierne, wydłużenie przewężeniowe, przewężenie i twardość.
2. Stwierdzono, że przy zgniocie żelaza mogą być wyróżnione trzy stopnie. W pierwszym do 12^{0/0} zgniotu dąży do zaniku wydłużenie równomierne. W ostatnim dąży do zaniku przewężenie, natomiast mocno wzrastają twardość i wytrzymałość na rozerwanie, przekraczając przeszło dwukrotnie swą wartość pierwotną.
3. W drugim stopniu zgniotu stosunek wytrzymałości do twardości zachowuje wartość stałą ($k = 0,3$), natomiast wzrasta w pierwszym i w trzecim okresie.
4. Zanik zgniotu, któremu towarzyszy zmniejszenie twardości, odbywa się zwłaszcza pomiędzy 525⁰ i 550⁰, gdy rekrytalizacja, widoczna pod mikroskopem rozpoczyna się dopiero powyżej 600⁰.
5. Wzrost kryształów zgniecionego żelaza przy wyżarzaniu odbywa się regularnie aż do 1000⁰ i nie daje się zauważyć maximum tego wzrostu pomiędzy punktami przelomowymi A_1 i A_3 obserwowane dla żelaza i stali przy większej zawartości fosforu.
6. Na rzeczywistą twardość żelaza, mierzoną metodą kolejnych odcisków, otrzymano wartość 40 jednostek Brinella.

R É S U M É *)

L'écrouissage des métaux est depuis longtemps appliqué dans l'industrie, comme l'indique Réaumur dans son *Art de l'épinglier*

*) C. R. 193 — 38 — 1931.

(1761). Au point de vue métallographique, les premières études sur l'écrouissage furent faites par M. Charpy (1893).

En ce qui concerne l'écrouissage du fer, les études faites par M. Goerens (1913) et M. Altpeter (1915) sur un nombre restreint d'échantillons n'ont pas donné de résultats suffisamment complets.

Notre étude a porté sur le fer Armco de fabrication française contenant au total moins de 0,15 pour 100 d'impuretés. La déformation obtenue par étirage était évaluée en pour 100 de la réduction rapportée à la section primitive, soit

$$z = 100 \frac{S_0 - S_1}{S_0} .$$

En étudiant les coefficients des propriétés mécaniques, nous avons cru utile de séparer dans l'allongement total à la rupture (A), l'allongement proportionnel (a) mesuré par la réduction de la section de l'éprouvette aux environs de ses traits extrêmes et l'allongement par striction (b) défini par la relation $b = A - a$.

Les résultats des mesures des propriétés mécaniques, en fonction de l'écrouissage, sont donnés sur les diagrammes de la figure 5. On y voit nettement trois phases de l'écrouissage. La première, caractérisée par la chute de l'allongement proportionnel a , s'étend jusqu'à un écrouissage de 12 pour 100. La dernière, caractérisée par la chute de la striction C et une montée rapide de la résistance de la traction R ainsi que de la dureté H (fig. 6), s'étend au-dessus d'un écrouissage de 90 pour 100. Au delà de la première phase, l'allongement à la rupture ne se fait que par striction et un coude accentué manifeste sur la courbe A ce changement du mode de rupture (fig. 5).

Le recuit après écrouissage produit, au dessus d'une certaine température la régénération des cristaux ce qui se manifeste par une chute de la dureté (H) et par l'augmentation moyenne des dimensions des cristaux (L), comme le montrent les figures 8 et 11 pour des écrouissages de 2, 8, 54 et 98 p. 100. Nous y voyons qu'un recuit au dessus de 500° fait tomber, assez brusquement la dureté, alors que les dimensions des cristaux croissent d'une façon parfaitement continue.

Comme l'essai de dureté à la bille ou au cône produit un écrouissage du métal étudié, nous avons déterminé la vraie dureté du fer par la méthode des empreintes successives proposée par

M. Hanriot (1913). Après chaque essai de dureté, le métal était recuit à 650° et une nouvelle empreinte était faite à la même place que l'ancienne. La figure 12 nous montre qu'après une trentaine de recuits la dureté se stabilise à un nombre voisin de 40 aussi bien pour l'essai à la bille (H_B) que pour celui fait au cône (H_R). La différence entre ces deux essais provenait donc surtout d'un écrouissage différent du métal.

Nous voyons combien l'écrouissage donne un moyen puissant pour le durcissement des métaux malléables. Une étude plus approfondie des phénomènes de l'écrouissage faciliterait probablement beaucoup le travail par estampage à froid, qui est de plus en plus répandu dans l'industrie.