

ROZDZIAŁ XXVI.

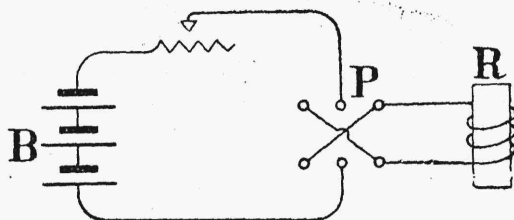
Ciepło histerezy magnetycznej.

W rozdziale XXII, przy rozważaniu powstawania energii pola magnetycznego skutkiem pracy prądu elektrycznego, podany był wzór, wyrażający pracę, zużytkowaną na wywołanie indukcji magnetycznej B w jednostce objętości pewnego ośrodka:

$$A_1 = \frac{1}{4\pi} \cdot \int_0^B H \cdot dB,$$

gdzie A_1 — praca, H — natężenie pola magnetycznego, B — indukcja magnetyczna. Na rys. 261 wskazany jest układ przyrządów, za pomocą których możemy przemagnesować rdzeń zwojnicy R . B oznacza tu źródło prądu, P — przełącznik do zmiany kierunku prądu. Opornik w obwodzie służy do zmiany natężenia prądu.

Rozważmy przedewszystkiem przypadek, gdy rdzeń zwojnicy R zupełnie nie ma własności histerezy. Przy magnesowaniu takiego rdzenia zależność indukcji



Rys. 261.

B od natężenia pola H wyraża się linią prostą (rys. 262). Aby przejść od stanu wyrażonego przez punkt O do stanu wyrażonego przez punkt D , należy zużytkować pewną ilość pracy prądu elektrycznego.

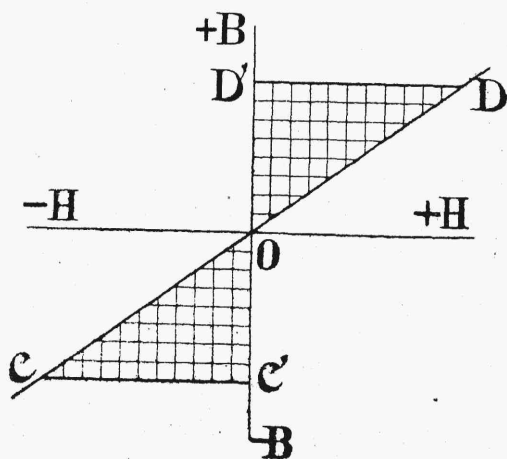
Praca ta, jak widzieliśmy, wyrazi się całką, podaną wyżej, albo też wykreślić — polem trójkąta ODD' (rys. 262).

Gdy następnie prąd magnesujący będziemy zmniejszali stopniowo do zera, pole magnetyczne zniknie i energia jego przetworzy się z powrotem na pracę prądu. Ilość tej energii znowu wyrażać będzie powyższa całka, tylko, że całka ta będzie teraz ujemna, ponieważ przy H dodatniem dB jest ujemne.

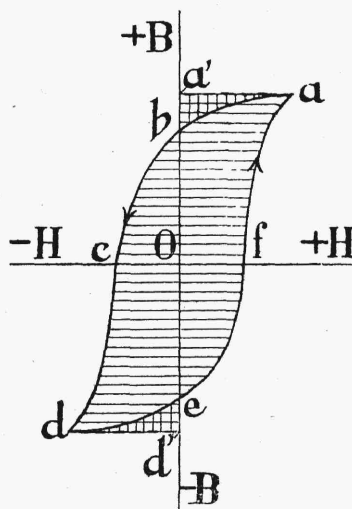
W podobny sposób zachodzić będzie przemiana energii przy magnesowaniu w kierunku odwrotnym. Wykreślnie zaś ilość energii, otrzymanej skutkiem pracy prądu w polu magnetycznym i odwrotnie, wytwarzanej z energii pola magnetycznego, wyrazi się tutaj polem trójkąta OCC' . Widzimy więc, że przy przemagnesowywaniu takiego ośrodka od D do C i od C do D z powrotem, w ośrodku tym nie zachodzi żadna nieodwracalna przemiana energii.

Inaczej przedstawia się sprawa, gdy ośrodek przemagnesowywany ma własności histerezy.

Wtedy zależność B od H przy przemagnesowywaniu kołowym wyraża się pętlą, wskazaną na rys. 263 (p. rozdział VI, § 8).



Rys. 262.



Rys. 263.

Przemiany energii, zachodzące przy przejściu żelaza z jednego stanu w drugi w kierunku strzałki wzdłuż pętlicy będą następujące:

Przy rozmagnesowywaniu żelaza od a do b energia pola magnetycznego wraca do obwodu elektrycznego i wynosi:

$$A_{ab} = \frac{1}{4\pi} \int_a^b (+H) \cdot (-dB) = -\frac{1}{4\pi} \int_a^b H \cdot dB.^1)$$

Tę ilość energii wyobraża na wykresie pole $a a' b$.

Dalej:

$$A_{bc} = \frac{1}{4\pi} \int_b^c (-H) \cdot (-dB) = +\frac{1}{4\pi} \int_b^c H \cdot dB,$$

¹⁾ H i dB oznaczają tu wartości bezwzględne odpowiednich wielkości.

gdzie A_{bc} jest to praca wyobrażona przez pole bco , a ponieważ wielkość ta jest dodatnią, przeto stanowi ona energję, dostarczoną przez prąd elektryczny.

Dalej:

$$A_{cd} = \frac{1}{4\pi} \cdot \int_c^d (-H) \cdot (-dB) = + \frac{1}{4\pi} \int_c^d H \cdot dB,$$

gdzie A_{cd} odpowiada polu $ocdd'o$; jest to również praca, dostarczona przez prąd.

Następnie:

$$A_{de} = \frac{1}{4\pi} \cdot \int_d^e (-H) \cdot (+dB) = - \frac{1}{4\pi} \cdot \int_d^e H \cdot dB$$

gdzie A_{de} odpowiada polu $dd'e$; jest to energja, powracająca z pola magnetycznego do obwodu elektrycznego.

Wreszcie:

$$A_{ef} = \frac{1}{4\pi} \cdot \int_e^f (+H) \cdot (+dB) = + \frac{1}{4\pi} \cdot \int_e^f H \cdot dB$$

$$A_{fa} = + \frac{1}{4\pi} \cdot \int_f^a H \cdot dB$$

gdzie A_{ef} odpowiada polu eof , a A_{fa} — polu $foa'a$.

Obie te prace są dodatnie, a więc dostarczone przez prąd elektryczny.

Na rys. 263 pola, wyrażające pracę dodatnią, są zakreskowane linjami poziomymi, pola zaś wyrażające pracę ujemną — linjami pionowymi. Za pomocą takiego kreskowania rysunek uwydatnia wyraźnie, że nadmiar pracy dodatniej nad ujemną wyraża się polem pętlicy histerezy; ta więc ilość pracy została dostarczona przez prąd elektryczny, w ciągu jednego obiegu kołowego, ośrodkowi przemagnesowywanemu. Stan magnetyczny tego ośrodka na początku i na końcu obiegu kołowego jest ten sam, ilość energii magnetycznej pozostała więc bez zmiany, zaś nadmiar pracy dodatniej prądu nad ujemną przekształca się, jak wskazuje doświadczenie, na ciepło. Z powyższego wypada, że im większe jest pole pętlicy histerezy, tem większa ilość ciepła wytwarza się przy przemagnesowywaniu.

W stali hartowanej wytwarza się przez histerezę dużo ciepła, w żelazie zaś miękkim — mało; widać to na rys. 38 i 39 z porównania pętlic histerezy dla żelaza i stali.

Na podstawie licznych pomiarów stwierdzono, że zależność tej pracy od maksymalnej indukcji magnetycznej (t. j. od rzędnych punktów a i d na rys. 263), można wyrazić w przybliżeniu wzorem:

$$A = a \cdot B_m^{1.6},$$

gdzie A — praca przetwarzająca się na ciepło w żelazie z powodu histerezy, a — stała, zależna od gatunku żelaza, B_m — indukcja maksymalna.

Wzór ten podany został przez Steinmetza. Nowsze badania wykazały, że, zależnie od najrozmaitszych okoliczności, wskaźnik potęgi przy B zmienia się w granicach od 1,5 do 2,2. Dla ułatwienia obliczeń, R. Richter¹⁾ proponuje wzór inny, oparty również na wynikach licznych doświadczeń, mianowicie:

$$A = \alpha \cdot B_m + \beta \cdot B_m^2,$$

gdzie α i β są to stałe, zależne od gatunku żelaza.

Średnio przyjąć można, że praca, wytwarzająca ciepło w ciągu jednego obiegu kołowego przemagnesowania w żelazie, wynosi w ergach na cm^3 :

$$A = 90 \frac{B_m}{1000} + 35 \left(\frac{B_m}{1000} \right)^2$$

dla zwykłej blachy magnetycznej.

$$A = 40 \frac{B_m}{1000} + 26 \left(\frac{B_m}{1000} \right)^2$$

dla blachy dobrze nakrzemionej. Wogóle jednak współczynniki α i β wahają się w szerokich granicach zależnie od gatunku żelaza.

Na wielkość strat skutkiem histerezy przy przemagnesowywaniu prądem zmiennym ma znaczny wpływ postać krzywej napięcia prądu magnesującego. Krzywa ostrzejsza wywołuje większe straty przy tej samej wartości skutecznej.

¹⁾ Elek. Techn. Zeitschr. 1910, str. 1241 i Deutscher Kalender für Elektrotechniker Uppenborn 1925—26 r.