НОВЫЕ МАГНИТНЫЕ СПЛАВЫ.

Б. А. Введенский.

I. Сильно магнитные сплавы.

Сплавы железа с никелем давно уже [1] привлекали к себе внимание физиков и техников благодаря своим разнообразным замечательным свойствам. Действительно, в зависимости от состава можно, напр., получить материалы самой различной твердости, от весьма мягких и тягучих до очень твердых; можно получить материалы с коэффициентом расширения от 0,0000131 (чистый никель) до 0,0000016 — „инвар“ с 36% никеля: „инвар“ расширяется, таким образом, в 5,5 раза менее платины. Можно получить материалы с удельным сопротивлением от 7 микроомов (чистый никель) до 80 микроомов — при 35% содержания никеля. Наконец, и это является собственно предметом нашего рассмотрения, никелево-железные сплавы дают нам материалы с чрезвычайно интересными магнитными свойствами. Весьма характерно далее, что способ тепловой обработки имеет для проявления этих свойств исключительное и решающее значение.

Уже давно было известно, что никелевая сталь с 25-процентным содержанием никеля, в зависимости от тепловой обработки, может и обладать, и не обладать ферромагнитными свойствами: будучи нагрета до точки Кюри (для этой стали точка Кюри — точка магнитного превращения — лежит при 580° С.) и затем охлаждена до комнатной температуры, остается немагнитной, и лишь охлаждение ниже нуля возвращает этой стали магнитность.

Далее, за последнее время Енсен [2, 4, 6] обратил внимание на повышенную — даже по сравнению с железом — магнитность некоторых сплавов; в особенности же на чрезвычайно малую величину потерь на гистерезис в сплавах с 40 — 80% никеля. На повышенную магнитность указывал далее Вюршмидт [3]. Однако, открытый Арнольдом и Эльменом [5, 7] сплав, содержащий 78% никеля и называемый ими за свою исключительную магнитность пермэллоем (от permeability — проницаемость и alloy — сплав), оставляет по своим свойствам все исследовавшиеся ранее сплавы далеко позади.

Наиболее характерное и замечательное свойство этого нового сплава — совершенно исключительная способность намагничиваться в самых слабых магнитных полях порядка сотых и даже тысячных долей гаусса, где обычное железо еще весьма слабо магнитно; другими словами, этот сплав обладает чрезвычайно большой по сравнению с железом начальной проницаемостью. На рис. 1 даны для сравнения кривые магнитной индукции в пермэллое, с одной стороны, и в весьма чистом железе „Армко" (American Rolling Mill Company) — с другой, из которой видно, что пермэллой успевает при увеличении внешнего поля намагнититься до насыщения, прежде чем обычное железо еще только начнет сильно намагничиваться. Пермэллой намагничивается до насыщения уже в магнитном поле земли! Отсюда проистекает необходимость совершенно необычных предосторожностей при его исследовании.

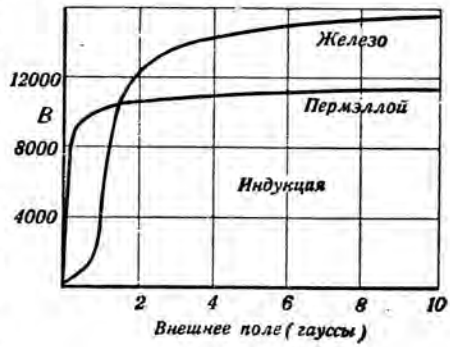

Рис. 1.

Исключительность магнитных свойств представлена с несколько иной точки зрения на кривых рис. 2, изображающих ход магнитной проницаемости для нового сплава и железа: у пермэллоя проницаемость не только достигает своих наибольших значений при гораздо меньших напряжениях поля, чем железо, но и самая величина этой проницаемости имеет совершенно необычайную величину, достигая вблизи 0,05 гаусса величины 85000.

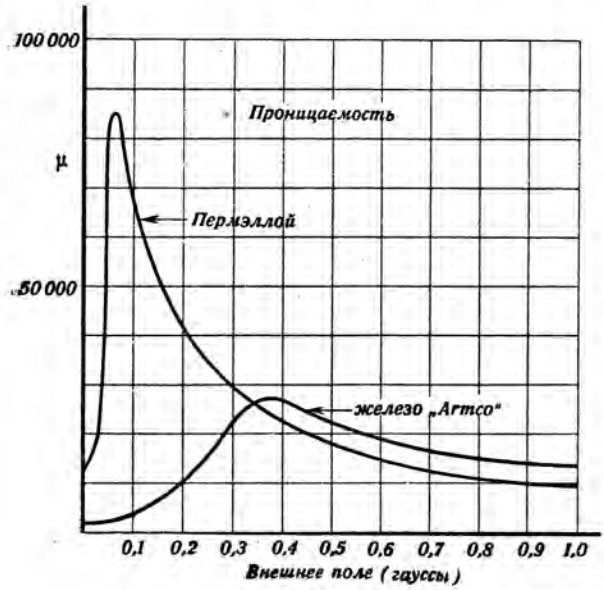

Рис. 2.

Однако, — и это чрезвычайно удивительно, как и почти все свойства этого с начала до конца необычайного сплава, — значения индукции при насыщении не только не выше, чем у железа, но даже процентов на 40 — 50 ниже. Отсюда вывод, что область применения, —

и притом чрезвычайно успешного уже в настоящее время и еще более обещающего в будущем, — это область слабых магнитных полей, область „слабых токов“ телеграфии и телефонии. Действительно, один из вопросов сигнализации по проводам большой длины, а именно вопрос об устранении мешающего действия емкости длинных линий, как будто дожидался открытия пермэллоя, чтобы сразу колоссально продвинуться вперед. С емкостью линий давно уже борются искусственным увеличением самоиндукции их; по способу Пупина в линию включают на определенных расстояниях специальные реактивные катушки, по способу Крарупа [8] провода обматывают железной проволокой, увеличивающей самоиндукцию провода. Второй способ во многих отношениях удобнее, но главным препятствием к его применению служила весьма слабая проницаемость обычного железа, да и других ранее известных материалов, при тех слабых полях, которые имеют место вокруг провода со слабыми, например, телефонными токами. Ясно, что открытие пермэллоя здесь оказалось как нельзя более кстати; в частности, сигнализацию по подводным кабелям это открытие прямо-таки революционизировало.

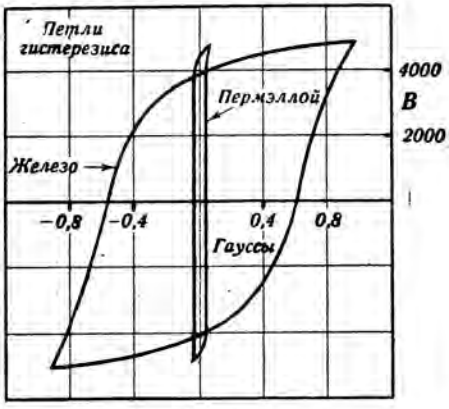

Рис. 3.

К этим необычайно ценным свойствам пермэллоя присоединяется еще одно: задерживающая сила его необычайно мала, петля гистерезиса узка, а следовательно, и потери на гистерезис также ничтожны [9] (рис. 3). Это делает его необычайно ценным материалом для всякого рода трансформаторов и реактивных катушек, работающих при слабых магнитных полях.

Как мы уже говорили, и сплавы с иным процентным содержанием никеля более магнитны, чем железо. На кривой рис. 4 сопоставлены величины начальных проницаемостей, полученные из соответствующих кривых экстраполяцией к значению поля $H = 0$ для различных $^0/_0$ содержания никеля. Из кривой видно, что вблизи $80^0/_0$ Ni проницаемость образует весьма резкий максимум, так что для своего открытия Арнольд и Эльмен должны были исследовать большое число различных сплавов, пока не нашли пермэллой. Точный состав их сплава следующий: никеля — $78{,}23^0/_0$, железа — $21{,}35^0/_0$, углерода — $0{,}04^0/_0$; остальное — прочие примеси, как-то: сера, кремний, марганец, хром. Примеси вообще чрезвычайно вредны, особенно углерод.

Так, например, в одном случае два сплава, один сильно магнитный, другой — с обычными свойствами, отличались друг от друга только разницей в содержании углерода в 0,01%.

Факт открытия выдающихся качеств никелевых сплавов становится еще более удивительным, если указать, что сплав, только что вышедший из печи и охлажденный, еще не обладает никакими особыми качествами. Только после весьма своеобразной термической обработки появляются эти свойства: пермэллой — в виде тонких лент — нагревается до 900° в течение часа и затем медленно охлаждается; далее снова нагревается до 600° и быстро охлаждается. При этом не только температуры, но и время их действия весьма важно; и, кроме того, изменения в составе сплава требуют и изменения в способе обработки (ср. ниже способ Енсена).

К этим необычайным свойствам присоединяется еще целый ряд других. Известно, что магнитные свойства меняются от механических воздействий, напр., от вытяжения. Точно также и проницаемость пермэллоя изменяется, а именно падает от этой же причины. Но замечательное заключается в том, что это изменение может достигать громадной величины, а именно под действием вытяжения проницаемость уменьшается до 10% своей первоначальной величины. При этом, пока при вытяжении мы не переходим предела упругости, изменения проницаемости обратимы так же, как и механические деформации.

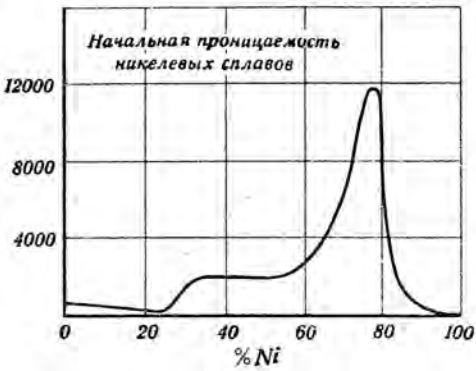

Рис. 4.

Последующие исследования Бэклея [10] внесли еще много нового. Оказалось, что сплавы с содержанием в 65% и в 84% никеля дают взаимно противоположный эффект натяжения на магнитные свойства. Сплав с 81% почти совершенно индифферентен по отношению к натяжению. Однако, неправильная тепловая обработка может совершенно замаскировать эти характерные отличия. Далее оказывается, что гистерезис сплава уменьшается от натяжения и может быть доведен до одной сотой величины гистерезиса (измеряемой площадью кривой намагничения) наилучшей кремниевой стали.

Вполне естественна постановка обратного вопроса: о влиянии магнитного поля на размеры тела, напр., проволоки, приготовленной из пермэллоя (магнитострикция). В этом направлении вопрос, насколько известно, еще не вполне выяснен: сами Арнольд и Эльмен нашли, что стрикционные явления в пермэллое больше обычных; наоборот, Хонда и Кидо [11], исследовавшие аналогичный сплав еще в 1919 г.

(они не подозревали его исключительных свойств, которые ведь выявляются только после тепловой обработки), нашли отсутствие стрикциональных явлений. Но в обоих случаях чрезвычайно интересно сопоставить аномалии магнитострикции с чрезвычайно малой величиной гистерезиса (рис. 3) в пермэллое. В случае, если бы оказалось, что с малым значением гистерезиса совпадает и малое значение магнитострикции, это привело бы к совершенно новому взгляду на природу гистерезиса вообще, так как до сих пор явления гистерезиса и магнитострикции не приводились в связь одно с другим. Мак Киган [12] высказывает тот взгляд, что натяжения внутри атомов, появляющиеся в результате действия внешнего поля („атомная магнитострикция"), являются главной причиной „магнитной твердости" стали, т.-е. гистерезиса. Стрикционные явления в железе и никеле в слабых полях имеют противоположные знаки: длина никелевой проволоки все время сокращается, тогда как в случае железа при слабых полях наблюдается удлинение. Поэтому при правильно подобранном процентном содержании никеля внутриатомные натяжения должны взаимно уничтожаться, что и должно привести — и приводит фактически — к исчезновению гистерезиса.

Следующим интересным фактом является сравнительно весьма значительное изменение электропроводности пермэллоя как под действием магнитного поля, так и под действием механического вытяжения. Поле в 1 гаусс уменьшает проводимость на 2%. При малых полях и вытягивающих силах, действующих одновременно, оба эффекта складываются, а если изменение, например, под действием магнитного поля достигло наибольшей возможной величины, то вытяжение уже ничего к эффекту не прибавляет. Это, повидимому, с несомненностью указывает на то, что механизм обоих явлений — изменения от поля и от вытяжения — одинаков.

Изменение проводимости от влияния поля так велико, что при помощи этого явления оказывается вполне возможным точное измерение таких слабых магнитных полей, как поле земли.

Как видим, свойства пермэллоя в достаточной мере загадочны и представляют весьма широкое поле для исследования. Дело, можно сказать, окончательно запутывается тем обстоятельством, что никакие другие свойства пермэллоя, кроме указанных, не представляют из себя ничего особенного: кристаллическая решетка такова же, как у никеля (т.-е. кубическая с центрированными гранями) и остается таковой, пока процентное содержание никеля не сделается ниже 35%. Механические свойства также нормальны, и — что самое удивительное — тепловая обработка, имеющая столь решающее значение для магнитных свойств, не оказывает на свойства механические ни малейшего влияния.

За самое последнее время у пермэллоя появился конкурент в виде 50%-ного сплава, предложенного и исследованного Енсе-

ном [13]; правда, начальная проницаемость этого сплава раза в 3—4 меньше, чем у пермэллоя, но наибольшая проницаемость — при 0,1 гаусса — достигает примерно той же колоссальной величины. К этому последнему обстоятельству присоединяется еще то, что индукция насыщения, благодаря большему содержанию железа, примерно на 40% выше, чем у пермэллоя. Если учесть еще сравнительную дешевизну, — меньшее содержание дорогого никеля, — то приходится признать, что в области сравнительно больших полей сплав Енсена может иметь над пермэллоем несомненное превосходство, но зато область чрезвычайно слабых полей остается, несомненно, за пермэллоем.

Интересен рецепт тепловой обработки, даваемый Енсеном для его сплава: отпуск в вакууме в течение часа при 900°, медленное охлаждение до 625° (точка Кюри); пребывание в этой температуре в течение 15 минут. За это время печь наполняется азотом. Затем образец быстро вынимается из печи и охлаждается на воздухе. Общее со способом Арнольда и Эльмена здесь—медленное охлаждение от температур выше точки Кюри. Енсен считает, что таким образом в сплаве сохраняются и при комнатной температуре особенности структуры, имеющие место при точке Кюри, эти же последние, повидимому, и сообщают различным магнитным материалам, в особенности железу, сильное повышение магнитности в непосредственном соседстве с точной Кюри.

II. Новая сталь для постоянных магнитов.

В блеске пермэллоя остался малозамеченным появившийся за последнее время еще один сплав, — на этот раз железа с кобальтом и рядом других элементов, — отличающийся громадной задерживающей силой (прямая противоположность пермэллою) и потому особенно пригодный для изготовления постоянных магнитов. Этот новый материал предложен Гумлихом [14].

Гумлих пришел к открытию этой стали из следующих фактов. Уже давно было известно, что сталь, содержащая в значительных количествах (до 12 %) марганец, в закаленном состоянии обладает весьма большой задерживающей силой в 130 гауссов, но, к несчастью, остаточная индукция при этом падает до очень малой величины (порядка 1000). Однако, с другой стороны, Вейсс и Прёйсс [15] нашли, что сплав 35 % кобальта с железом дает намагничение насыщения на 10 % выше, чем у чистого железа. Отсюда возникла мысль прибавкой к железу одновременно и марганца, и кобальта повысить задерживающую силу без вреда для величины индукции. После целого ряда проб различных сплавов (эти пробы изготовлялись у Круппа в Эссене) был, наконец, найден состав сплава (1, 11% C, 3,5 % Mn, 36 % Co и 4,8 % Cr), который при надлежаще подобранной температуре

закалки дал необычайно большую задерживающую силу в 227 гауссов (у лучших магнитных сталей и эта величина не превосходила 90 гауссов) при весьма хорошей остаточной индукции в 9300 гауссов.

Наивыгоднейшая температура закалки составляет, по Гумлиху, 850° С., и самая закалка производится в машинном масле, охлаждаемом до 0°.

Для техники новая сталь приносит двоякого рода выгоду: во-первых, магниты из новой стали гораздо более устойчивы по отношению к колебаниям температуры, сотрясениям, действию внешних полей и пр. — это делает их особенно пригодными для изготовления превизионных измерительных приборов; во-вторых, магнит с большой задерживающей силой гораздо лучше сопротивляется размагничивающему действию концов, благодаря чему магнит, сильно разомкнутый (т.-е. с большим размагничивающим фактором), будучи приготовлен из новой стали, гораздо сильнее приготовленного из стали обычной. Напр., палочка в 6 *см* длиной и 0,7 *см* в поперечнике, применяющаяся в магнетометре Кольрауша—Гольборна из кобальтовой стали имеет на 130% более высокое остаточное намагничение, чем такая же палочка из хромовой стали. Таким образом, новая сталь дает возможность экономить на материале и, что еще гораздо важнее, на весе и объеме.

Открытие замечательных свойств пермэллоя и других никелевых, а также и кобальтовых сплавов представляет, кроме чисто-технического, также и громадный научный интерес, несмотря, или, лучше сказать, именно благодаря загадочности этих свойств. Это открытие, несомненно, даст мощный толчок к выяснению таких капитальных, но еще весьма темных вопросов, как природа ферромагнетизма и металлической проводимости и их зависимость от других — например, механических — свойств тел. В частности, проблема сплавов, давшая уже столь много для магнетизма (магнитные стали, Гейслеровы сплавы и пр.), в связи с рациональной (термической, механической, может быть, и магнитной) обработкой сулит в будущем — есть все основания так думать — ряд новых богатых возможностей.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Hopkinson, Proc. Roy. Soc., Dec. 1889; см. J. Ewing „Magn. Ind...."
2. Bargess a. Aston. Metall. Chem. Eng. *8*, p. 23, 1910.
3. T. D. Jensen. Trans. Amer. Inst. El. Eng. *39*, I p. 791, 1920.
4. I. Würschmidt. Phys. Zs. *23*, 499, 1922 и Zs. f. Phys. *12*, p. 128, 1922.
5. T. D. Jensen. Trans. Am. Inst. El. Eng. *39*, p. 369, 1920.
6. H. D. Arnold u. G. W. Elmen. Journ. Frankl. Inst. *195*, p. 621, 1923; Electrician, June *22*, p. 672, 1923.
7. K. Zschiesche. Zs. f. Phys. *12*, p. 201, 1922.
8. A. E. Kennelly. Journ. Frankl. Inst. *197*, p. 62?, 1921.
9. См., напр., „Kramp Cable". Electrician, *91*, p. 692, 1923.
10. L. W. Mc. Keehan a. P. P. Cioffi. Phys. Rev. *23*, p. 305, 1924.

11. O. E. Buckley. Phys. Rev. *23*, p. 783, 1924.
12. K. Honda a. K. Kido. Sci. Rep. Tokohu Univ. *9*, p. 221, 1920.
13. L. W. Mc. Keehan. Phys. Rev. *23*, p. 783, 1924; о взглядах этого автора на механизм ферромагнетизма см. Journ. Frankl. Inst., *197*, p. 601 и 757, 1924.
14. T. D. Jensen. Journ. Frankl. Inst., *199*, p. 333, 1925.
15. E. Gumlich. Zs. f. Phys. *14*, p. 241, 1923.
16. Preuss. Дисс. Цюрих, 1912; ср. P. Weiss, Rev. Gén. des Sciences, 15 jan. 1914.