

З. И. АЛИЗАДЕ

## О МАГНИСТРИКЦИИ БИНАРНЫХ СПЛАВОВ НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ ПЕРЕХОДНОЙ ГРУППЫ<sup>1</sup>

В связи с развитием теории технического намагничивания за последние 25 лет магнитострикция приобретает важное значение и начала подвергаться всестороннему экспериментальному и теоретическому изучению.

Несмотря на многочисленные работы, посвященные проблеме исследования магнитострикции ферромагнитных металлов и сплавов, вопрос магнитострикции сплавов ферромагнитных металлов с неферромагнитными компонентами до настоящего времени остается еще недостаточно изученным.

Исследование магнитострикции бинарных ферромагнитных сплавов с неферромагнитными компонентами представляет большой теоретический интерес для выявления роли магнитного взаимодействия атомов в решетке этих сплавов. До 1949 г. в литературе была известна только одна бинарная система Fe—Co [6], в состав которых входят сплавы: (например, 50 ат % Fe и 50 ат % Co) рекордно большой положительной магнитострикцией насыщения

$$(\lambda_s) = + 70 \cdot 10^{-6}.$$

Последняя в два с лишним раза превышает величину магнитострикции насыщения чистого отожженного никеля, где

$$(\lambda_s)_{\text{Ni}} = - 34 \cdot 10^{-6},$$

обладающего, как известно, высокими магнитострикционными свойствами.

В прошлом году были опубликованы результаты наших исследований по магнитострикции бинарных сплавов Fe—Pt [4], где было показано, что при закаленном состоянии максимальное значение стрикции насыщения этих сплавов более чем в два с половиной раза превышает магнитострикцию чистого никеля и имеют положительный знак.

Результаты наших исследований приведены на рис. 1. Из этих данных нетрудно заключить, что в системе Fe—Pt максимальным значением стрикции насыщения обладает сплав Fe<sub>3</sub>Pt (46% Fe и 54% Pt). При закаленном состоянии значение стрикции насыщения этого сплава

<sup>1</sup> Доложено на Ломоносовских чтениях 26 апреля 1950 г.

$(\lambda_s)_{\text{Fe}_3\text{Pt}} = +105 \cdot 10^{-6}$  в полтора раза больше, чем стрикция насыщения сплава FeCo (50 ат% Fe и 50 ат% Co) и в три раза больше, чем стрикция чистого отожженного никеля.

Таким образом, можно считать, что рекордным значением магнито-стрикции насыщения обладает не состоящий из двух ферромагнитных

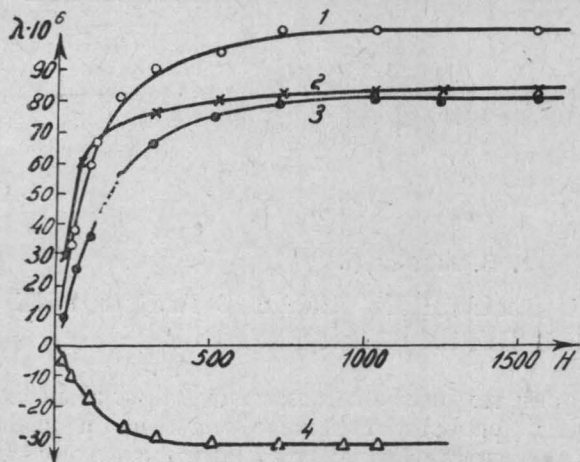


Рис. 1. Магнитострикция FePt и Ni. 1—46% Fe 54% Pt, 2—44% Fe 56% Pt, 3—42% Fe 58% Pt, 4—Ni

компонентов сплав FeCo, как это считалось раньше, а исследованный нами сплав Fe<sub>3</sub>Pt, состоящий из ферромагнитного компонента Fe и сильно парамагнитного компонента Pt.

Кроме вышеуказанных сплавов Fe—Pt, бинарные сплавы Fe—Pd, Ni—Pt и Ni—Pd также представляют значительный теоретический интерес. Данные о магнитных свойствах этих сплавов чрезвычайно скудны, а магнитострикция их еще никем не изучалась (за исключением краткого сообщения автора, напечатанного в ДАН СССР [4]).

Чтобы осветить этот вопрос, в настоящей работе мы ставили перед собой задачу исследовать линейную магнитострикцию непрерывных рядов твердых растворов Fe—Pd, Ni—Pt и особенно Ni—Pd в зависимости от концентрации ферромагнитных компонентов Pd и Pt. С этой целью в высокочастотной вакуумной печи нашей лаборатории нами были выплавлены ряд сплавов: железа или никеля с платиной и палладием, а также отдельно чистый (99,985%) никель.

В качестве объекта настоящего исследования было выбрано 9 сплавов следующего состава:

из бинарной системы Fe—Pd два образца:

- 1) Fe<sub>3</sub>Pd,
- 2) Pd<sub>3</sub>Fe.

Из бинарной системы Ni—Pt только один образец:



а из бинарной системы Ni—Pd шесть образцов:

- 1) 87,5 ат% Ni и 12,5 ат% Pd,
- 2) Ni<sub>3</sub>Pd,
- 3) 62,5 ат% Ni и 37,5 ат% Pd,
- 4) NiPd,
- 5) 37,5 ат% Ni и 62,5 ат% Pd,
- 6) Pd<sub>3</sub>Ni.

Все вышеуказанные образцы были выплавлены при одинаковых условиях. Компоненты, применяемые в качестве исходного материала, как Fe, Ni, Pt, так и Pd были химически чистыми. Полученные сплавы

перед проковкой, волочением и прокаткой были тщательно гомогенизированы в вакууме длительным отжигом при температуре  $950-1000^{\circ}\text{C}$  и из них изготавливались соответствующие образцы в виде проволоки  $d=2\text{ мм}$ ,  $l=250\text{ мм}$  и ленты толщиной  $0,3\text{ мм}$ , шириной  $5\text{ мм}$  и длиной  $250\text{ мм}$  с промежуточным отжигом в вакууме при той же температуре. Аналогичный образец был изготовлен из чистого переплавленного в вакууме никеля в качестве эталона для контроля работы нашей измерительной установки.

После прокатки, волочения и других механических обработок все образцы отжигались в вакууме в специальной трубке до  $1050^{\circ}\text{C}$  и выдерживались при этой температуре до 10 часов, после чего подвергались быстрому охлаждению до комнатной температуры со скоростью  $200-210^{\circ}\text{C}$  в минуту, не нарушая вакуум в трубке, где отжигались все образцы вместе. После такой термообработки приступали к измерениям магнитных и других свойств этих образцов.

Для измерения магнитострикции, как и ранее, нами был использован метод проволочных тензометров (датчиков), который для этих целей был впервые применен в нашей лаборатории проф. Н. С. Акуловым и доцентом Д. И. Волковым [2]. Аналогичный метод измерения магнитострикции был применен и Ю. Е. Гольдманом [5].

При хорошем навыке и внимательности этим методом можно мерить стрикцию с точностью  $\pm 2-3\%$ . На рис. 2 приведены кривые линейной магнитострикции чистого Ni и исследуемого образца  $\text{Fe}_3\text{Pd}$  (60% Fe и 40% Pd); из рис. 2 видно, что максимальная величина стрикции насыщения сплава  $\text{Fe}_3\text{Pd}$  равна:

$$(\lambda_s)_{\text{Fe}_3\text{Pd}} = +70 \cdot 10^{-6},$$

а знак ее является положительным, как у сплава FeCo.

Величина стрикции насыщения образца  $\text{Fe}_3\text{Pd}$  в два с лишним раза больше, чем стрикция эталонного образца из чистого никеля.  $(\lambda_s)_{\text{Ni}} = -34 \cdot 10^{-6}$ . На рис. 3 приведена кривая намагничивания сплава  $\text{Fe}_3\text{Pd}$ . Согласно вышеизложенному факту, мы можем заключить, что величина и знак стрикции насыщения у сплавов FeCo и  $\text{Fe}_3\text{Pd}$  одинаковы.

В бинарной системе на основе железа 25 ат% Pd и 50 ат% Co по отношению увеличения значения стрикции ведут себя аналогично в решетке твердого раствора с  $\gamma\text{Fe}$ . О наличии высокой магнитострикции в сплавах Fe—Pd указанного состава говорит также большая чувствительность их намагничивания к упругим деформациям. На рис. 4 приведены кривые намагничивания сплава  $\text{Fe}_3\text{Pd}$  (60% Fe и 40% Pd), снятые при отсутствии и при действии сравнительно слабых растягивающих напряжений.

Пользуясь простым термодинамическим соотношением [3]:

$$\int_0^I (H_0 - H_p) dI = \lambda_{\infty} \cdot P,$$

где справа стоит изменение магнитоупругой энергии, вызванной растяжением  $P$ , мы можем оценить из рис. 4 максимальную магнитострикцию исследуемого сплава. Определяя графическим интегрированием магнитоупругую энергию на рис. 4 (площадь, заключенную между кривыми

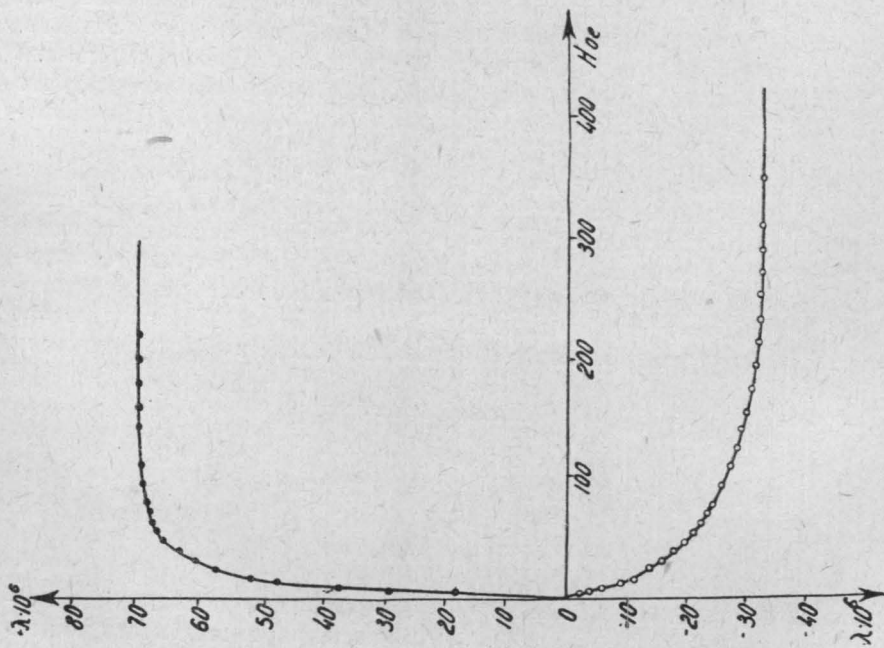


Рис. 2. Кривые магнитострикции Ni и сплава Fe<sub>3</sub>Pd (60% Fe 40% Pd).

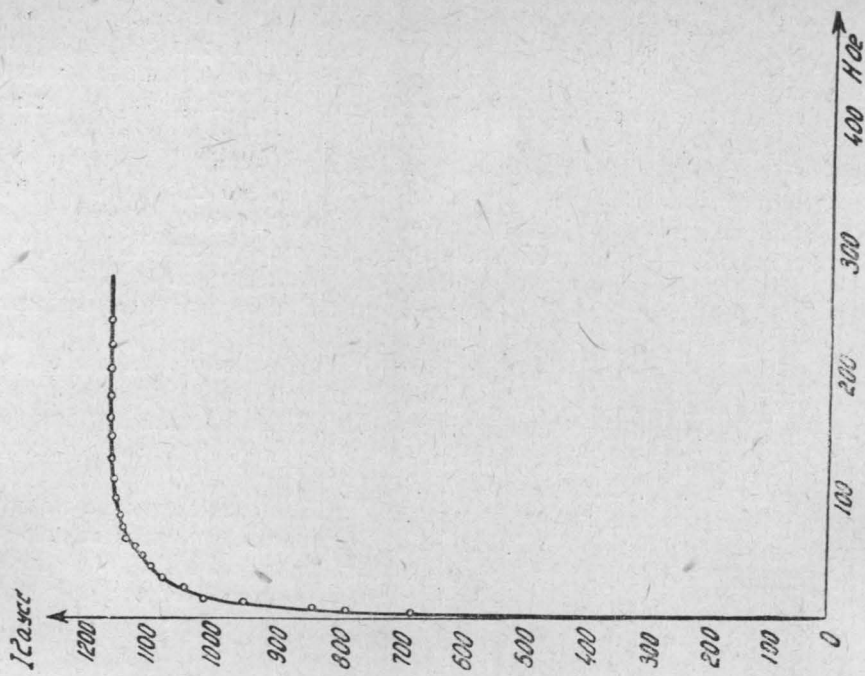


Рис. 3. Кривая намагничивания сплава Fe<sub>3</sub>Pd (60% Fe и 40% Pd)

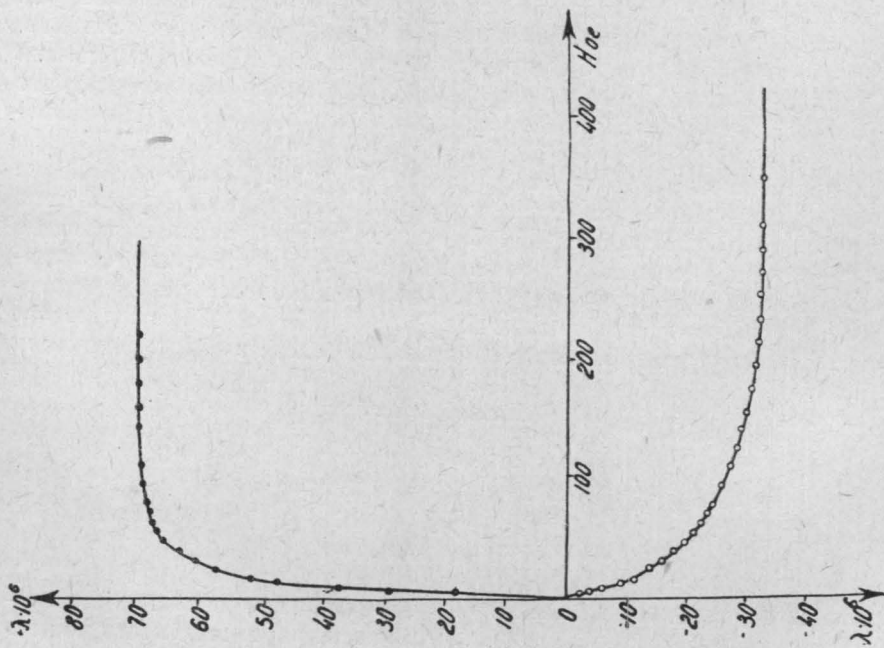


Рис. 2. Кривые магнитострикции Ni и сплава Fe<sub>3</sub>Pd (60% Fe 40% Pd).

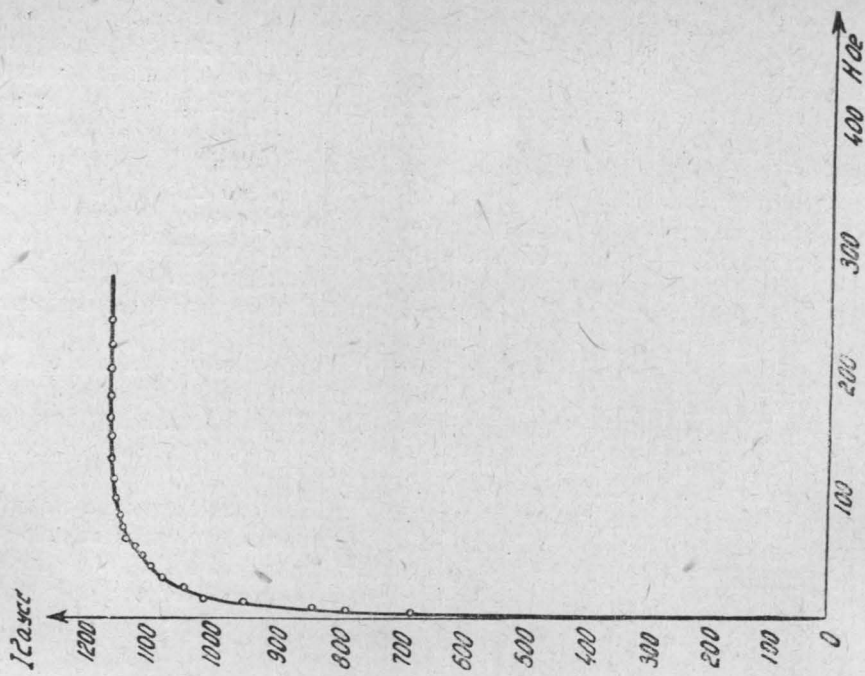


Рис. 3. Кривая намагничивания сплава Fe<sub>3</sub>Pd (60% Fe и 40% Pd)

намагничивания), мы получаем  $\lambda_{\infty} \cong 70 \cdot 10^{-6}$ , т. е. приблизительно такую же величину магнитострикции сплава  $\text{Fe}_3\text{Pd}$ , как из непосредственных измерений относительного удлинения в магнитном поле. Далее, нами были исследованы магнитострикция и намагниченность насыщения сплавов  $\text{Pd}_3\text{Fe}$  и  $\text{Ni}_3\text{Pt}$ .

На рис. 5 даны кривые магнитострикции и намагничивания этих сплавов. Видно, что значение стрикции насыщения для сплава  $\text{Pd}_3\text{Fe}$  равно:

$$(\lambda_s)_{\text{Pd}_3\text{Fe}} = +5 \cdot 10^{-6},$$

а для сплава  $\text{Ni}_3\text{Pt}$  равно:

$$(\lambda_s)_{\text{Ni}_3\text{Pt}} = -20 \cdot 10^{-6}.$$

Кроме магнитострикции и намагниченности насыщения этих сплавов и эталонного образца из чистого никеля, нами также производилось измерение удельного сопротивления  $\rho$  и коэрцитивной силы  $H_c$  этих сплавов и никеля при  $20^\circ\text{C}$ . Результаты наших измерений приведены в табл. 1.

До сих пор чистый отожженный никель считался материалом с максимальной отрицательной линейной стрикцией:

$$(\lambda_s)_{\text{Ni}} = -34 \cdot 10^{-6}.$$

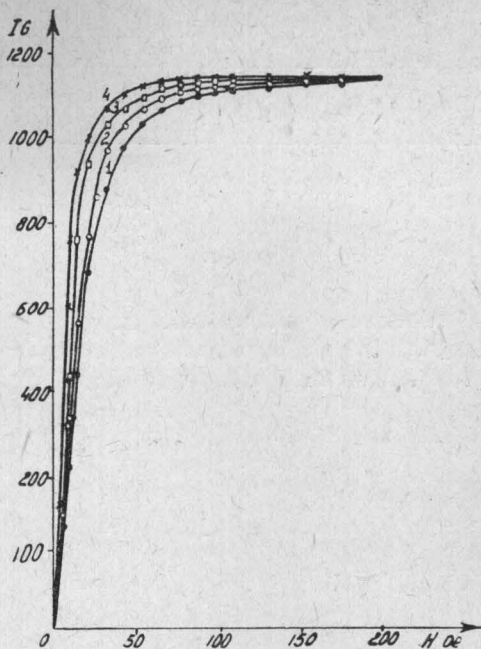


Рис. 4. Влияние упругих растяжений на намагниченность сплава  $\text{Fe}_3\text{Pd}$ .  
1—0,  $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$  2—1,5  $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ , 3—3  $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ , 4—6  $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$

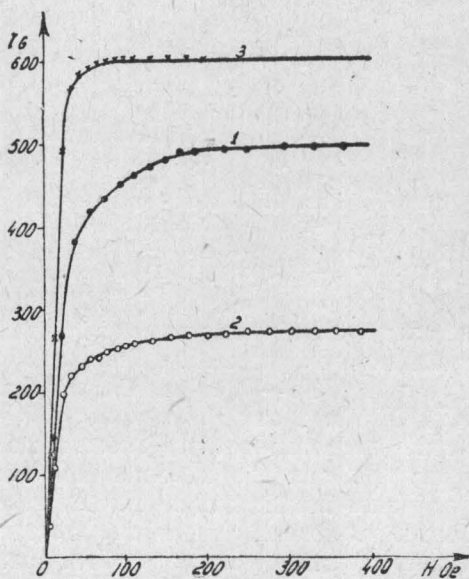
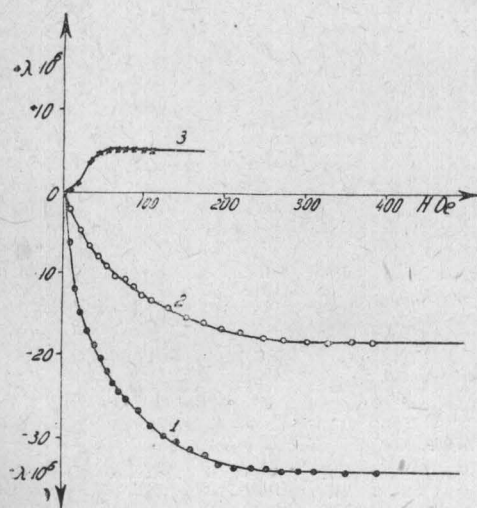


Рис. 5. Магнитострикция и кривые намагничивания чистого Ni и сплавов  $\text{Pd}_3\text{Fe}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Pt}$ . 1—Ni, 2— $\text{Ni}_3\text{Pt}$ , 3— $\text{Pd}_3\text{Fe}$

№ п/п.	Состав сплава	$I_s$ Гаусс	$\lambda_s \cdot 10^{-6}$	$H_s$ эрст.	$\rho$ $\mu\Omega$ см
1	Ni	496	-34	0,48	7,5
2	Fe <sub>3</sub> Pd	1150	+70	1,6	40
3	Pd <sub>3</sub> Fe	600	+5	0,7	62
4	Ni <sub>3</sub> Pt	265	-20	3,5	35

Согласно известным литературным данным, добавка различных сталлических присадок к никелю (за исключением малых добавок ольффрама, который, по данным Шульца [6], при слабых полях незна-

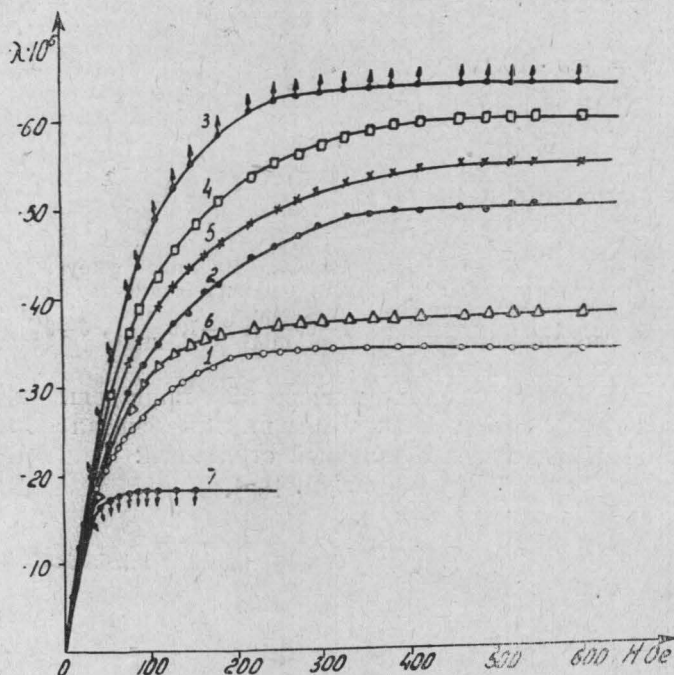


Рис. 6. Кривые магнитострикции Ni и сплавов Ni—Pd. 1—Ni, 2—87,5 ат% Ni+12,5 ат% Pd, 3—75 ат% Ni+25 ат% Pd; 4—62,5 ат% Ni+37,5 ат% Pd, 5—50 ат% Ni+50 ат% Pd, 6—37,5 ат% Ni+62,5 ат% Pd, 7—25 ат% Ni+75 ат% Pd

чительно повышает стрикцию никеля) понижает величину стрикции насыщения последнего. С целью проверки достоверности данных Шульца по сплавам Ni—W нами были выплавлены три образца с содержанием 0,5; 0,75 и 1 ат% или 1,55; 2,3 и 3,1 вес. % вольффрама в никеле. После изготовления соответствующих образцов и термообработки приступили к измерениям линейной магнитострикции.

Наши исследования не подтвердили обнаруженных Шульцем повышений значения стрикции насыщения никеля ни при каких полях в зависимости от присадок вольффрама. Мы убедились, что и здесь, как всегда, при добавке неферромагнитного компонента к никелю значение магнитострикции насыщения понижается, особенно это заметно при больших концентрациях вольффрама в никеле.

С этой точки зрения определенный интерес представляет изучение влияния присадок Pd на магнитострикцию никеля. На рис. 6 и 7

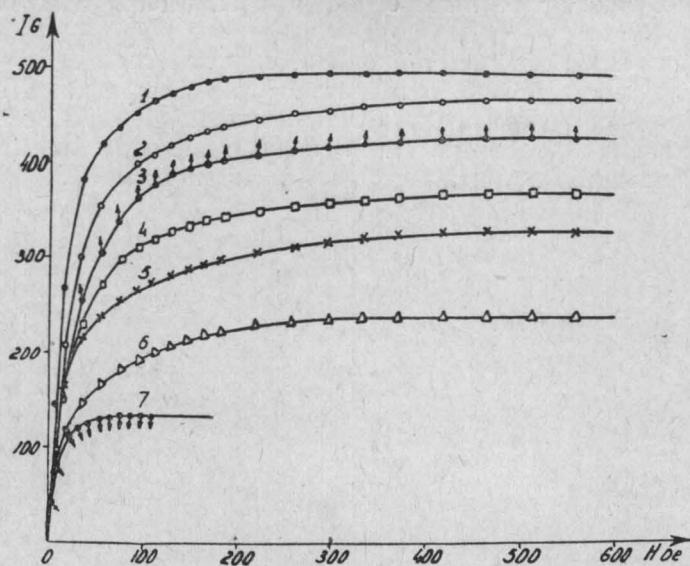


Рис. 7. Кривые намагничивания Ni и сплавов Ni—Pd. 1—Ni, 2—87,5 ат% Ni+12,5 ат% Pd, 3—75 ат% Ni+25 ат% Pd; 4—62,5 ат% Ni+37,5 ат% Pd, 5—50 ат% Ni+50 ат% Pd, 6—37,5 ат% Ni+62,5 ат% Pd, 7—25 ат% Ni+75 ат% Pd

приведены кривые магнитострикции и кривые намагничивания чистого отожженного никеля и шести сплавов бинарной системы Ni—Pd следующего состава:

- 1) 87,5 ат% Ni + 12,5 ат% Pd,
- 2) 75 ат% Ni + 25 ат% Pd,
- 3) 62,5 ат% Ni + 37,5 ат% Pd,
- 4) 50 ат% Ni + 50 ат% Pd,
- 5) 37,5 ат% Ni + 62,5 ат% Pd,
- 6) 25 ат% Ni + 75 ат% Pd.

Из рис. 6 нетрудно заключить, что максимальное значение линейной стрикции в бинарной системе Ni—Pd соответствует составу 75 ат% Ni + 25 ат% Pd ( $Ni_3Pd$ ) и она равна:

$$(\lambda_s)_{Ni_3Pd} = -64 \cdot 10^{-6},$$

т. е. она почти в два раза превышает максимальное значение стрикции насыщения чистого никеля, сохраняя отрицательный знак.

Далее, из рис. 6 видно, что в бинарной системе Ni—Pd имеется ряд сплавов, у которых значение стрикции насыщения намного больше, чем у никеля.

На рис. 8 приведена кривая магнитострикции насыщения  $\lambda_s$  в зависимости от концентрации Pd в бинарной системе Ni—Pd.

Из анализа экспериментальных кривых можно сделать следующее заключение: до 25 ат% Pd в твердом растворе Ni—Pd значение магнитострикции насыщения бинарной системы резко увеличивается, от 25 ат% до 50 ат% Pd она медленно, а от 50 ат% Pd и дальше очень



сильно падает и при составе Pd<sub>3</sub>Ni равна:

$$(\lambda_s)_{Pd_3Ni} = -18 \cdot 10^{-6},$$

т. е. примерно в два раза меньше, чем значение стрикции насыщения чистого Ni.

Такую аномалию магнотстрикции в бинарной системе Ni—Pd, особенно до 25 ат% Pd, можно объяснить только состоянием атома Pd в решетке твердого раствора с никелем, повидимому, атом Pd в твердом растворе с никелем до определенной концентрации (в данном случае до 25 ат%) находится в том же состоянии, что и атом Ni.

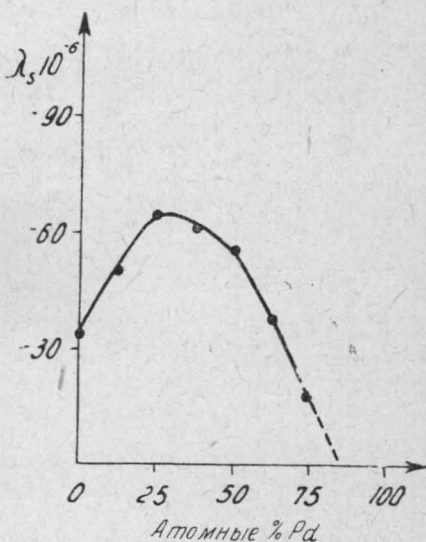


Рис. 8. Зависимости магнотстрикции насыщения  $\lambda_s$  от концентрации Pd в бинарной системе Ni—Pd

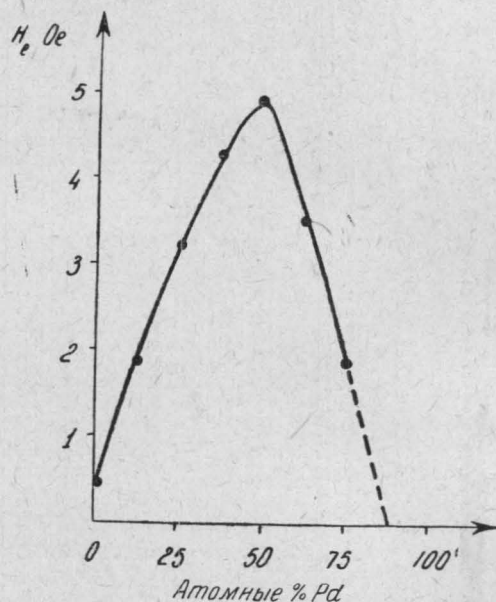


Рис. 9. Зависимость коэрцитивной силы от концентрации Pd в бинарной системе Ni—Pd

Кроме магнотстрикции и намагниченности насыщения, нами производились также измерения коэрцитивной силы удельного электросопротивления, точки Кюри, твердости всех образцов Ni—Pd при температуре 20°С. Результаты наших исследований  $H_c$  в зависимости от концентрации Pd приведены на рис. 9.

Из рис. 9 видно, что коэрцитивная сила в системе Ni—Pd в зависимости от процентного содержания палладия увеличивается и при 50 ат% Pd достигает максимального значения  $H_c = 5$  эрстед, а затем падает.

Аналогичный ход изменения (рис. 10) наблюдается и для удельного сопротивления, где максимальным сопротивлением обладает сплав того же состава

$$\rho_{NiPd} = 40 \mu\Omega \text{ см.}$$

На рис. 11 приведены кривые твердости  $H$  в зависимости от концентрации палладия. Из кривых видно, что максимальной твердостью по Бринеллю при закаленном состоянии обладает сплав 50 ат% Ni и 50 ат% Pd

$$H = 150.$$

Из анализа экспериментальных кривых можно сделать следующие выводы.

В бинарной системе Ni—Pd, при закаленном состоянии с 1050°C со скоростью 200°—210°C в минуту максимальным значением коэ-

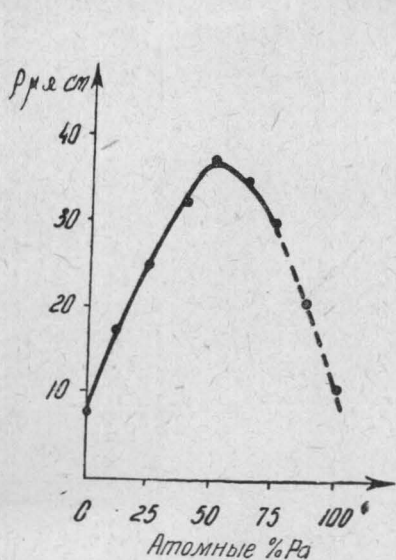


Рис. 10. Зависимость удельного электросопротивления от концентрации Pd в бинарной системе Ni—Pd

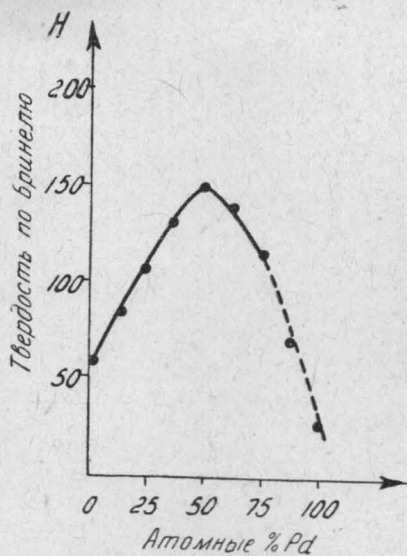


Рис. 11. Зависимость твердости от концентрации Pd в бинарной системе Ni—Pd.

тивной силы, удельного сопротивления и твердостью обладает сплав, соответствующий составу NiPd (50 ат% Ni и 50 ат% Pd).]

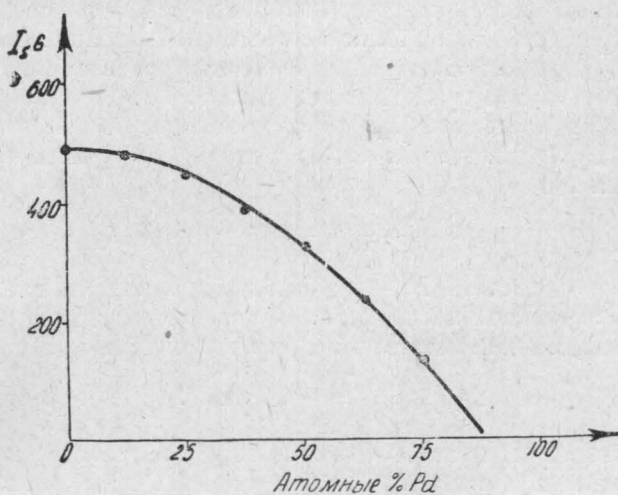


Рис. 12. Зависимость намагничивания при насыщении от концентрации Pd в бинарной системе Ni—Pd

И, наконец, на рис 12 и 13 приведены значения намагничивания при насыщении и точки Кюри в зависимости от концентрации Pd в атомных процентах в твердом растворе Ni—Pd. Из этих кривых видно, что как

намагниченность насыщения  $I_s$ , так и точки Кюри  $\theta_K$  в зависимости от содержания палладия в твердом растворе Ni—Pd падают вначале очень мед-

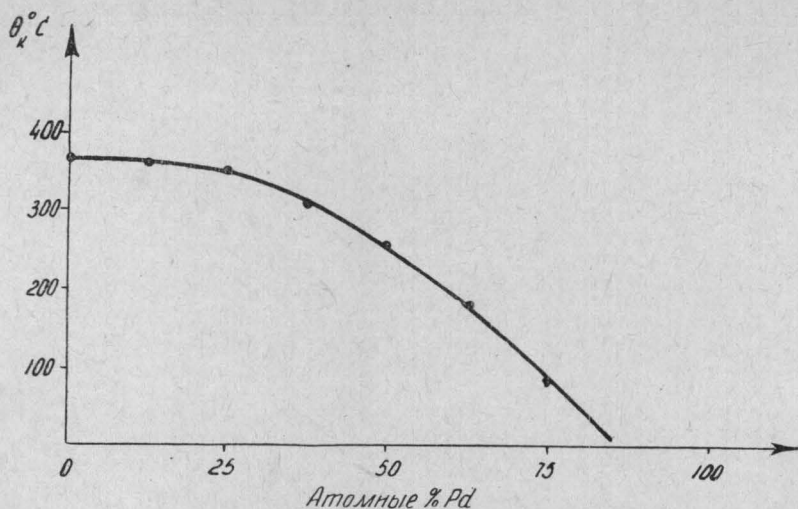


Рис. 13. Зависимость точки Кюри от концентрации Pd в бинарной системе Ni—Pd

ленно (примерно до 20—25 ат% Pd), а затем быстро и примерно при содержании 87,5 ат% Pd образец становится слабо магнитным.

#### ВЫВОДЫ

1. С помощью нового метода измерения магнитострикции посредством тензометров (датчиков) была исследована линейная магнитострикция бинарных ферромагнитных сплавов некоторых металлов переходной группы: (Fe, Ni, Pt и Pd) и отдельно чистого Ni.

2. В бинарной системе Fe—Pd, соответствующей составу  $Fe_3Pd$  (60% Fe и 40% Pd), был найден сплав с высокой положительной стрикцией насыщения

$$(\lambda_s)_{Fe_3Pd} = +70 \cdot 10^{-6}.$$

3. В бинарной системе Ni—Pd был найден ряд сплавов с высокой отрицательной стрикцией насыщения. В этой системе максимальной отрицательной стрикцией насыщения обладает сплав  $Ni_3Pd$ , где

$$(\lambda_s)_{Ni_3Pd} = -64 \cdot 10^{-6}.$$

4. Таким образом, в современной литературе, кроме уже известных высокострикционных сплавов FeCo [6] и  $Fe_3Pt$  [1], мы имеем теперь еще две бинарные системы Fe—Pd и Ni—Pd, в состав которых входят сплавы с высокой, первая—положительной, вторая—отрицательной стрикцией насыщения.

Насколько нам известно из литературы, исследование магнитострикции бинарных систем Fe—Pd, Ni—Pt и Ni—Pd производились нами впервые.

В заключение считаю своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность действительному члену АН БССР проф. Н. С. Акулову за весьма ценные советы при выполнении настоящей работы.

Поступила в редакцию  
30.5.1950 г.

Нии физики МГУ

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Акулов Н. С., Ализаде З. И., Белов К. П. ДАН СССР, 65, 815, 1949.
  2. Акулов Н. С. и Волков Д. И. «Вестник МГУ», № 10, 29, 1949.
  3. Акулов Н. С. Ферромагнетизм, 1939.
  4. Ализаде З. И. ДАН СССР, т. 73 1950.
  5. Гольдман Ю. Е. Phys. Rev., 72, 529, 1947.
  6. Ш у л ь ц е А. Русско-Германский вестник науки и техники, № 11, 5, 1933;
-