

Член-корреспондент АН СССР Л. В. КИРЕНСКИЙ,
С. Г. РУСОВА, Г. И. РУСОВ, Н. И. СИВКОВ

НЕКОТОРЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Fe — Ni — Co

Изучению магнитных свойств монокристаллических пленок железа, никеля, кобальта и их двойных сплавов посвящены многочисленные работы (^{1, 2}); тонким пленкам тройных сплавов системы Fe — Ni — Co уделено значительно меньше внимания.

Целью настоящей работы является исследование пленочных монокристаллов сплавов Fe — Ni — Co в широком интервале их составов. Методика получения монокристаллических пленок таких сплавов и некоторые структурные их свойства изложены ранее (³). Исследованные пленки представляли собою мозаичные

Таблица 1

| № сплава | Состав распыляемого сплава, вес. % | | | Состав пленки, вес. % | | |
|----------|------------------------------------|------|------|-----------------------|------|----|
| | Fe | Ni | Co | Fe | Ni | Co |
| 1 | 17 | 80 | 3 | 17,5 | 80,5 | 2 |
| 2 | 15 | 74 | 11 | 15 | 76 | 9 |
| 3 | 14 | 66 | 20 | 15 | 69 | 16 |
| 4 | 12 | 55 | 33 | 10 | 59 | 31 |
| 5 | 22 | 53 | 25 | 19 | 58 | 23 |
| 6 | 45 | 52 | 3 | 44 | 54 | 2 |
| 7 | 50 | 45 | 5 | 47 | 49 | 4 |
| 8 | 29 | 46 | 25 | 29 | 49 | 22 |
| 9 | 35 | 37 | 28 | 34 | 40 | 26 |
| 10 | 60 | 30 | 10 | 58 | 34 | 8 |
| 11 | 55 | 22,5 | 22,5 | 54 | 26 | 20 |
| 12 | 30 | 22,5 | 47,5 | 30 | 25 | 45 |
| 13 | 25 | 15 | 60 | 23 | 19 | 58 |
| 14 | 10 | 10 | 80 | 10 | 15 | 75 |
| 15 | 80 | 10 | 10 | 77 | 15 | 8 |

гранецентрированные монокристаллы толщиной 700—800 Å. При их получении использовался метод никелевой «затравки» подложки (³). Химический состав пленок определялся с помощью рентгено-спектрального анализа и приведен в табл. 1 в сравнении с составом распыляемого материала.

Измерения намагниченности насыщения и величины магнитной кристаллографической анизотропии проведены методом ферромагнитного резонанса на частоте 9100 Мгц. Известно (³), что в уравнения для эффективного поля входит член, обусловленный упругими напряжениями, и поэтому эксперименты по ферромагнитному резонансу позволяют определить лишь

величину эффективной намагниченности $M_{эфф} = M_0 + 3\lambda\sigma / 4\pi M_0$ (M_0 — намагниченность насыщения, λ — значение насыщения для изотропной магнитоупругости, σ — упругие напряжения), которая может существенно отличаться от намагниченности насыщения. Это отличие естественно определяется величиной напряжений, имеющих место в пленке. Поскольку большая часть напряжений обычно возникает в процессе изготовления пленки вследствие взаимодействия ее с подложкой, то снятие пленки с подложки должно привести к существенному уменьшению напряжений и, следовательно, к малому отличию $M_{эфф}$ от M_0 .

Величина магнитной кристаллографической анизотропии определялась из измерений зависимости резонансного поля от угла между направлениями приложенного статического поля и осью легкого намагничивания. Поскольку для подсчета константы кристаллографической анизотропии K использовалось значение эффективной намагниченности, то из экспери-

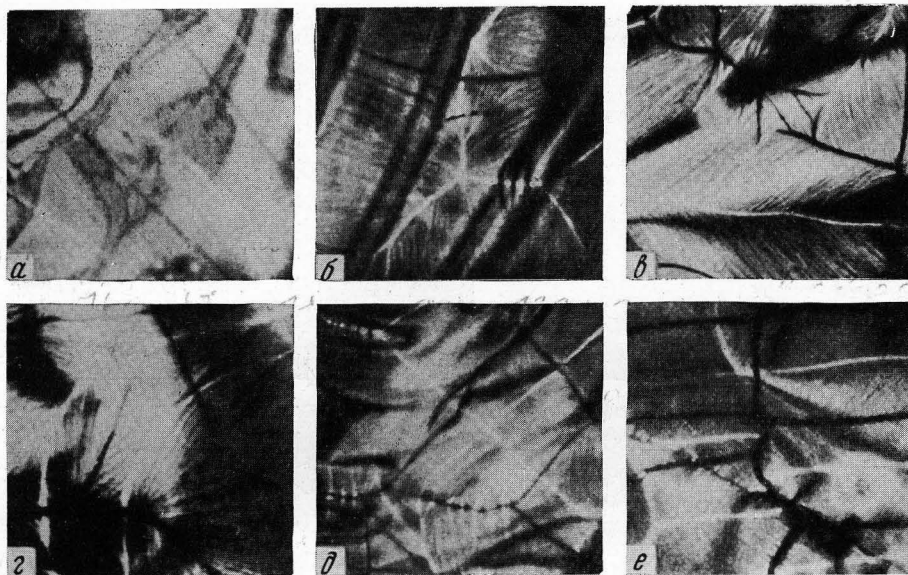


Рис. 2. Вид доменной структуры тонких монокристаллических пленок состава (в %): а — Ni 80,5, Co 2, Fe 17,5 ($K_{эфф} = 10^3$ эрг/см³); б — Ni 69, Co 16, Fe 15 ($K_{эфф} = 2 \cdot 10^3$ эрг/см³); в — Ni 59, Co 31, Fe 10 ($K_{эфф} = -4,7 \cdot 10^3$ эрг/см³); г — Ni 49, Co 22, Fe 29 ($K_{эфф} = 14 \cdot 10^3$ эрг/см³); д — Ni 25, Co 45, Fe 30 ($K_{эфф} = -22 \cdot 10^3$ эрг/см³); е — Ni 15, Co 75, Fe 10 ($K_{эфф} = -73 \cdot 10^3$ эрг/см³). 1300 ×

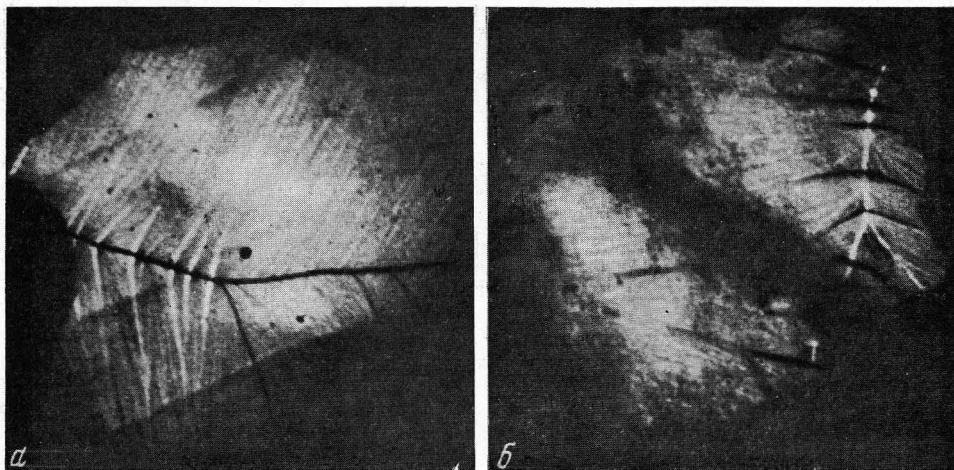


Рис. 3. Вид доменной структуры монокристаллической пленки состава (в %): Ni 69, Co 16, Fe 15 (а — до отжига, б — после отжига). 1000 ×

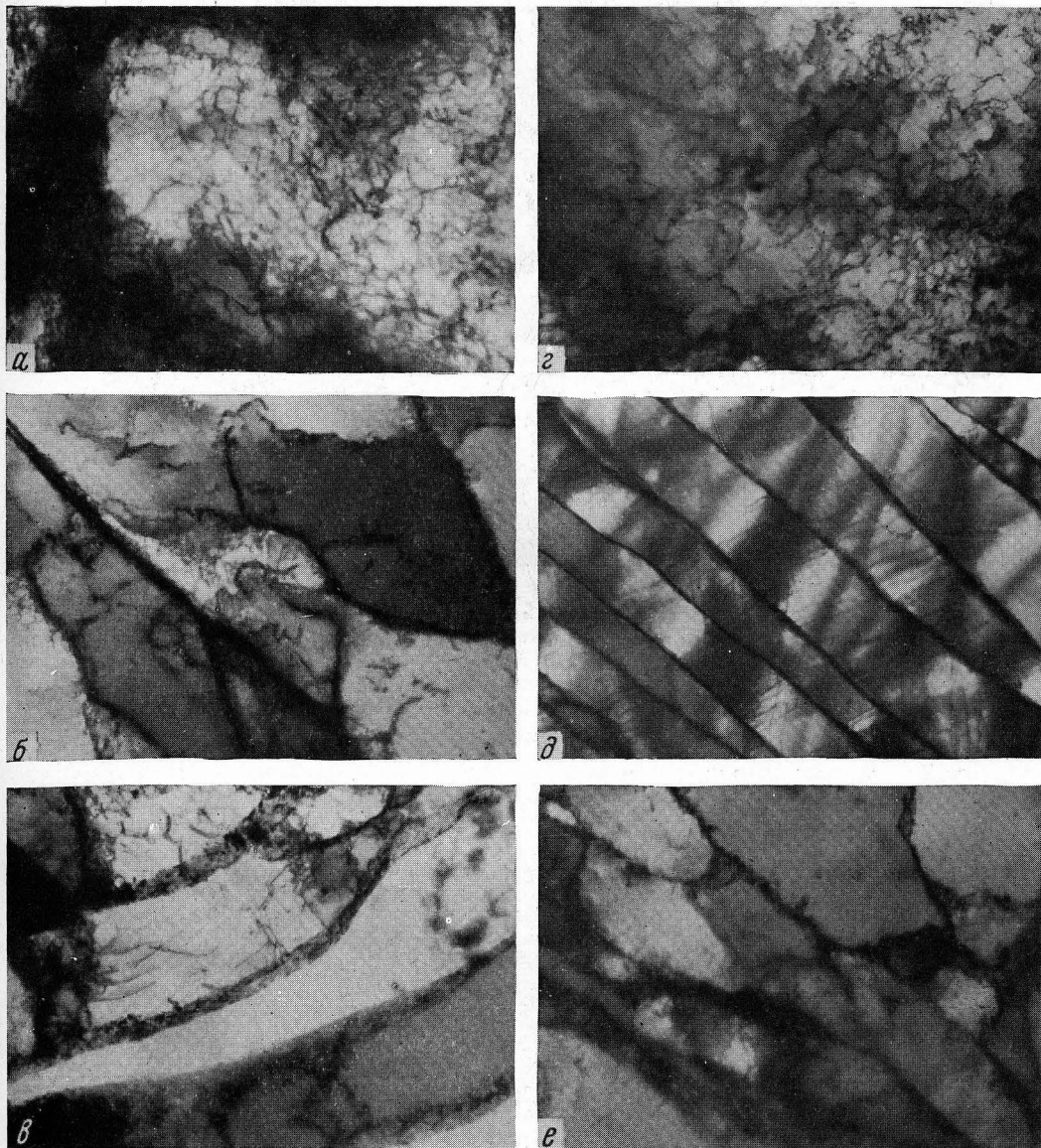


Рис. 1. Влияние гидростатического давления P , деформации ϵ и температуры деформирования T на дислокационную структуру хрома и молибдена (электронные микрофотографии, $20\,000\times$).
 а — хром, $P = 1$ атм., $\epsilon = 20\%$, $T = 20^\circ$; б — хром, $P = 16$ кбар, $\epsilon = 37\%$, $T = 20^\circ$; в — хром, $P = 18$ кбар, $\epsilon = 83\%$, $T = 20^\circ$; г — молибден, $P = 1$ атм., $\epsilon = 24\%$, $T = 20^\circ$; д — молибден, $P = 18$ кбар, $\epsilon = 80\%$, $T = 20^\circ$; е — молибден, $P = 18$ кбар, $\epsilon = 83\%$, $T = 250^\circ$.

мента можно было определить также лишь эффективное значение константы кристаллографической анизотропии $K_{эфф} = H_K M_{эфф} / 2$ (H_K — эффективное поле магнитной кристаллографической анизотропии). Все измерения выполнены на пленках, отделенных от подложки, поэтому изотропные напряжения в них можно считать малыми, а определенные из эксперимента значения $M_{эфф}$ и $K_{эфф}$ мало отличающимися от M_0 и K .

Исследована зависимость кристаллографической анизотропии от химического состава монокристаллических пленок. Результаты измерений приведены на рис. 1 в сравнении с данными, полученными другими авторами для массивных монокристаллов (4, 5). Видно, что в треугольнике концентраций порядок величины анизотропии и распределение ее по знаку для тонких пленок и массивных монокристаллов совпадают. Это, а также равенство величин спонтанной намагниченности, говорит о том, что монокристаллические пленки сохраняют основные свойства массивного монокристаллического ферромагнетика, но имеют некоторые особенности. В частности, в пленочных монокристаллах сплавов Fe — Ni — Co оси легкого намагничивания часто оказываются неравноценными, особенно при малых значениях кристаллографической анизотропии и магнитострикции (10). В связи с этим было исследовано влияние магнитного поля, приложенного во время получения пленки, на распределение осей легкого намагничивания в пленочном монокристалле. При величине магнитного поля около 150 эрст. полученные монокристаллические пленки оказывались одноосными в случае, если магнитострикция у них не была равна нулю, а значение кристаллографической анизотропии невелико. Это свидетельствует, по-видимому, о большом вкладе магнитоупругой энергии в возникновение одноосевой анизотропии.

С помощью электронного микроскопа УМВ-100 наблюдалась тонкая магнитная структура доменов монокристаллических пленок ряда указанных сплавов. Проводилось сопоставление тонкой структуры доменов с величиной кристаллографической анизотропии. Известны противоречивые высказывания (6, 7) по вопросу наличия подструктуры в пленках с нулевой анизотропией. Наши исследования показывают, что если анизотропия монокристаллической пленки близка к нулю ($K < 2 \cdot 10^3$ эрг/см³), то подструктура не наблюдается (рис. 2а). По мере увеличения анизотропии возникает неоднородность намагниченности доменов (рис. 2б—д), которая наблюдается до тех пор, пока величина кристаллографической анизотропии не станет достаточно большой для того, чтобы «выстроить» намагниченность в домене в определенном направлении (рис. 2е). Нижний предел анизотропии для исчезновения подструктуры в исследованных монокристаллических пленках не был строго определенным, а колебался, видимо, в зависимости от степени однородности пленок, в пределах $K_{эфф} =$

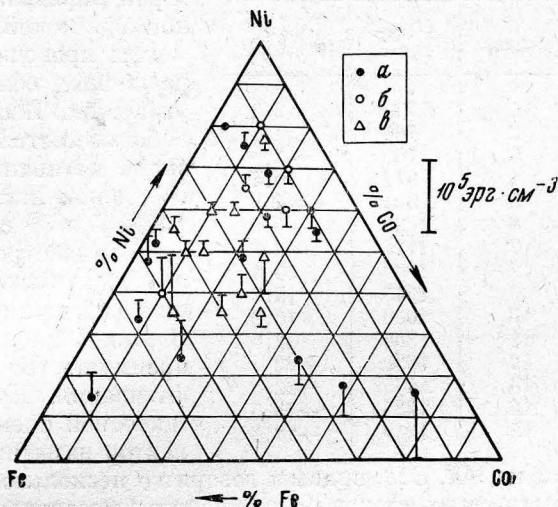


Рис. 1. Значения эффективной константы магнитной кристаллографической анизотропии для тонких магнитных монокристаллических пленок (a) и массивных монокристаллов (b — по данным (5), c — по данным (4))

$= (15 - 25) \cdot 10^3$ эрг/см³, (рис. 2, см. вкл. к стр. 1277).

Известно, что сплавы Fe — Ni — Co весьма чувствительны к различным видам термобработки, которая может менять величину коэрцитивной силы, вид петли гистерезиса, знак магнитной кристаллографической анизотропии ⁽⁴⁾. Исследованные участки пленки площадью до 3 мм² после резонансных измерений подвергались отжигу непосредственно в электронном микроскопе в вакууме $\sim 10^{-4}$ мм рт. ст. Доменная структура фотографировалась до отжига, затем пленки нагревались (без нарушения вакуума) до точки Кюри (около 700°) и выдерживались при этой температуре в течение 5—7 мин. После этого снова наблюдалась доменная структура, по виду которой определялся знак магнитной кристаллографической анизотропии. Такие эксперименты проводились с пленками 15 составов различных областей концентрационного треугольника. Исследования показали, что отжиг в большинстве случаев не может изменить знака магнитной анизотропии пленок. Только монокристаллические пленки сплавов (№№ 1 и 3) с небольшой кристаллографической анизотропией ($K_{\text{эфф}} \leq 2 \cdot 10^3$ эрг/см³), имеющие близкую к нулевой магнитострикцию ⁽¹⁰⁾, при отжиге изменили знак (рис. 3). В тонких пленках этих сплавов наблюдается преимущество одной из осей легкого намагничивания. При отжиге такой, фактически одноосной пленки (см. рис. 3, вкл. к стр 1277) вектор намагниченности поворачивается почти на 90°.

Таблица 2

| № сплава | $M_{\text{эфф}}$, гаусс | $K_{\text{эфф}}$, 10^3 эрг/см ³ |
|----------|--------------------------|---|
| 1 | 735 | 2,0 |
| 2 | 765 | 9,4 |
| 3 | 790 | —2,0 |
| 4 | 870 | 10,4 |
| 5 | 925 | —4,9 |
| 6 | 1030 | —5,6 |
| 7 | 1125 | 19,0 |
| 8 | 1200 | 14,0 |
| 9 | 1240 | 15,7 |
| 10 | 1000 | 16,0 |
| 11 | 1300 | 32,0 |
| 12 | 1330 | —22 |
| 13 | 1485 | —22 |
| 14 | 1225 | —73,5 |
| 15 | 1210 | —18,0 |

Это, видимо, говорит о несколько ином характере анизотропии магнитных пленок по сравнению с массивными образцами ⁽⁴⁾.

В табл. 2 приведены значения эффективной намагниченности и эффективной константы кристаллографической анизотропии пленочных монокристаллов различного состава, полученные из измерений ферромагнитного резонансного поглощения. Ввиду отсутствия в литературе данных о магнитных свойствах монокристаллических пленок сплавов Fe — Ni — Co, мы могли свои результаты сравнить только со значениями намагниченности насыщения и константы магнитной кристаллографической анизотропии массивных монокристаллических ферромагнетиков системы сплавов Fe — Ni — Co ⁽⁸⁾, и то в ряде случаев экстраполированными. Из этого сравнения можно заключить, что значительного расхождения не наблюдается; это прежде всего говорит о том, что неоднородности и напряжения в исследованных пленках невелики.

Институт физики
Сибирского отделения Академии наук СССР

Поступило
17 II 1967

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ W. Ruske, P. Weber, Phys. Stat. Solid., 12, № 1, 312 (1965). ² S. Usami, K. Iton et al., Bull. Fac. Eng. Yokohama Nat. Univ., 12, № 3, 97 (1963). ³ Z. Fraité, Phys. Stat. Solid., 2, 1417 (1962). ⁴ И. М. Пузей, ФММ, 16, № 2, 179 (1963). ⁵ L. W. Meekhan, Phys. Rev., 51, № 2, 136 (1937). ⁶ H. Hoffman, Phys. Stat. Solid., 5, 3 (1964). ⁷ Р. В. Суханова, В. Г. Пынько, Н. И. Сивков, Изв. АН СССР, сер. физ., 31, № 3, 435 (1967). ⁸ Р. Бозорт, Ферромагнетизм, ИЛ, 1956. ⁹ В. Г. Пынько, А. С. Комалов, и др., Изв. АН СССР, сер. физ., 31, № 3, 485 (1967). ¹⁰ E. M. Bradley, J. Appl. Phys., 33, № 3, 1051S (1962).