

МАГНИТНЫЙ ОТКЛИК ПОКРЫТИЯ Co/Ni, ОСАЖДЕННОГО НА Cu,
НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ,
ПРОТЕКАЮЩИЕ В МЕДИ В ХОДЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А. А. Букаемский, Н. А. Шепета, Г. Н. Бондаренко*

*Методом ферромагнитного резонанса в работе было исследовано влияние ударно-волнового воздействия на статические и динамические магнитные характеристики тонких магнитных пленок: однослойного Co, толщиной 200 нм; мультислойных пленок [Co(20нм)/Ni(20нм)]*5 и [Co(5нм)/Ni(5нм)]*20. Образцы были получены методом химического осаждения на прокатанную медную фольгу толщиной 30 мкм. Полученная в ходе исследований информация позволяет делать выводы о волновом характере деформационных процессов, происходящих в материале – основе (меди).*

Исследования процессов деформации поликристаллических металлов и сплавов под действием статической либо динамической нагрузки всегда актуальны и в настоящее время проводятся на все более высоком методическом уровне [1].

Сегодня, благодаря усилиям Томской школы [2], развивается взгляд на пластическую деформацию как на волновой процесс, длина волны и скорость которого определяется как структурой материала, так и условиями нагружения. Анализ дифференциальных уравнений механического поля, полученных в [3], показывает, что они допускают решения в виде волн трансляционной и ротационной мод, соответственно. К настоящему моменту уже получено определенное количество экспериментальных доказательств волнового характера пластического течения для различных классов твердых тел [2].

Цель нашей работы – показать, что при нанесении тонкого ферромагнитного покрытия на материал, который затем испытывает ударно-волновое воздействие (УВВ), и дальнейшим исследовании магнитных характеристик этого покрытия после УВВ (например, методом ферромагнитного резонанса) можно сравнительно просто получить информацию о деформационных процессах, происходящих в материале – основе, в частности о волновом характере этих процессов.

Таким образом, задачей данной работы явилось исследование деформационных процессов, протекающих в меди, которая в отличие от большинства металлов имеет широкую область пластического течения. В качестве покрытия, позволяющего применять магнитные методы исследования, были использованы мультислойные пленки типа Co/Ni.

В данной работе были исследованы магнитные характеристики мультислойных пленок Co/Ni, полученных методом химического осаждения на прокатанную медь толщиной 30 мкм, до и после ударно-волнового воздействия (УВВ). Суммарная толщина ферромагнитного покрытия для всех образцов составляла 0.2 мкм, длина образца $L=40$ мм. В качестве реперного образца использовалась однослойная пленка Co той же толщины. Особенностью метода химического осаждения, основанного на реакции восстановления металлов из соответствующих солей, является присутствие в получаемых осадках элементарного фосфора. Как в однослойной, так и в мультислойных пленках [Co(20нм)/Ni(20нм)]*5 и [Co(5нм)/Ni(5нм)]*20 содержание фосфора поддерживалось постоянным и равным 6 ат.%, что определило мелкокристаллическую структуру магнитных покрытий с ГЦК решеткой [4]. Так как процентное содержание металлоида не изменялось, для упрощения записи формул символ Р в тексте опущен.

Ударно-волновое воздействие на образцы проводили в режиме скользящей детонации. В качестве взрывчатого вещества использовался гексоген насыпной плотности. После УВВ из медной фольги с магнитным покрытием вдоль направления распространения фронта ударной волны нарезались кусочки размерами $1,5 \times 2$ мм.

Рентгенофазовые исследования проводились на аппарате ДРОН - 4 ($Cu_{K\alpha}$ – излучение). Методом ферромагнитного резонанса (ФМР) были исследованы динамические характеристики образцов до и после УВВ: резонансное поле (H_p), ширина линии резонансного поглощения (ΔH), эффективная намагниченность ($M_{эфф}$). Измерения проводили на стандартном спектрометре ЭПА-2М на частоте 9.2 ГГц при параллельной ориентации пленок во внешнем магнитном поле, ориентированном вдоль и перпендикулярно направлению распространения ударной волны. Исследование изменения величины коэрцитивной силы (H_c) проводили методом осциллографирования петель гистерезиса.

Исследование структуры образцов было проведено методом рентгеноструктурного анализа. На рис. 1 представлены типичные рентгенограммы композитных систем: мультислойной пленки общей толщиной 200 нм, нанесенной на прокатанную медную фольгу толщиной 30 мкм до и после ударно-волнового воздействия. На рентгенограмме исходной пленки наблюдаются рефлексы, положение которых определяется углами 2θ равными $43,28^\circ$, $50,41^\circ$ и $75,92^\circ$. Данные рефлексы идентифицируются как линии ГЦК меди, возникновение которых обусловлено отражением рентгеновского излучения от плоскостей (111), (200) и (220), соответственно. Анализ рентгенограмм показал, что рефлексы от кобальта и никеля не видны, что связано с несопоставимыми массами этих металлов и массой материала – основы (меди). Известно, что при отражении от ГЦК - меди с поликристаллической структурой

рой наибольшей интенсивности должна быть линия отражения от плоскости (111), однако на рентгенограммах исследуемых образцов наибольшую интенсивность имеет рефлекс, обусловленный отражением от плоскости (220), а рефлекс, найденный на $43,28^\circ$, имеет наименьшую интенсивность. Подобное перераспределение интенсивности рефлексов является следствием холодной прокатки меди, которая создает текстуру в направлении прокатки. После ударно-волнового воздействия на рентгенограммах видно перераспределение интенсивности рефлексов. Хотя интенсивность отражения от плоскости (220) по-прежнему остается наибольшей, заметно вырастает интенсивность отражения от плоскости (111), тогда как рефлекс (200) практически не меняется по интенсивности. Данный факт указывает на поворот зерен в меди под воздействием ударной волны.

В работе [5] были проведены исследования, которые показали, что при получении ферромагнитной пленки на медь электрохимическим осаждением (являющимся аналогом используемого в данной работе метода получения) структура магнитного покрытия вследствие высокой адгезии повторяет структуру материала основы - меди. Об этом же косвенно свидетельствует то обстоятельство, что после УВВ на наших образцах не наблюдались нарушения поверхности пленки и отслоение верхнего магнитного слоя. Так как структура - это определяющий фактор для физических свойств материалов, можно ожидать, что изменение структуры в процессе УВВ повлечет за собой и изменение магнитных характеристик образцов.

Исследование коэрцитивной силы пленок (статической характеристики магнитных материалов) показали, что в исходном состоянии пленки изотропны в плоскости образца. Величина коэрцитивной силы (H_c) при уменьшении толщины индивидуального ферромагнитного слоя уменьшается (см. таблицу). После УВВ пленки становятся анизотропными с осью легкого намагничивания, перпендикулярной направлению распространения ударной волны. Величина коэрцитивного поля для каждого образца увеличивается (рис. 2).

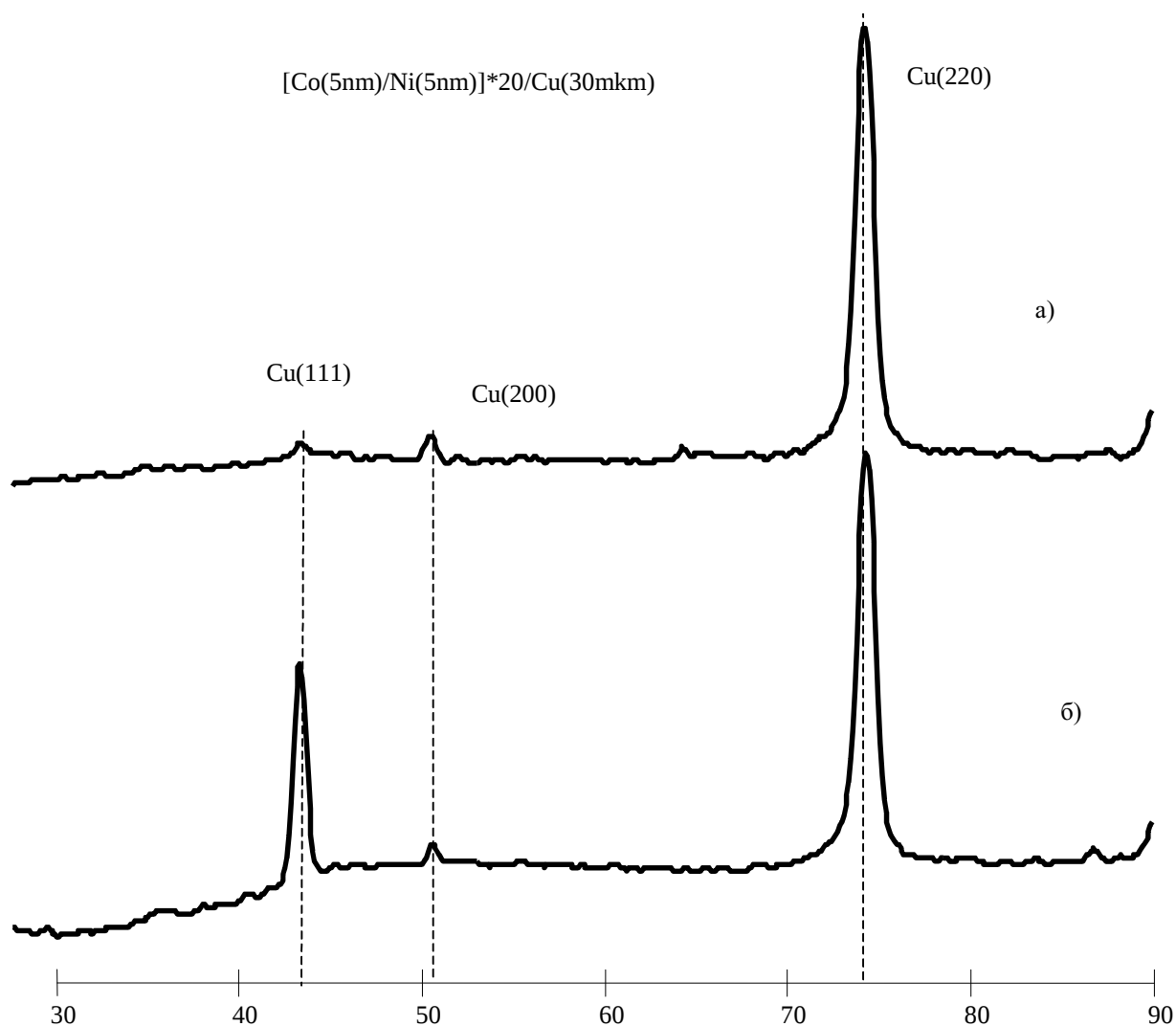


Рис.1. Рентгенограммы композитной системы:
 мультислойной пленки $[Co(5nm)/Ni(5nm)]*20$, осажденной на медную прокатанную фольгу толщиной 30 мкм:
 а) рентгенограмма образца в исходном состоянии; б) после ударно-волнового воздействия

Образец	H_c до УВВ, Э	H_c после УВВ, Э	H_p исх., Э	ΔH до УВВ, Э	ΔH (средн.) после УВВ, Э
СоР моносл.	27	35	590	215	325
5 бислоев	14	20	670	225	320
20 бислоев	7	10	720	120	240

Исследование образцов методом ферромагнитного резонанса было проведено при параллельной ориентации пленок во внешнем магнитном поле. При повороте пленок в исходном состоянии вокруг оси перпендикулярной плоскости пленки образцы также оказались изотропными в плоскости. Результаты определения резонансного поля исходных образцов (H_p) и ширины линии резонансного поглощения (ΔH) представлены в таблице. Видно, что при уменьшении толщины ферромагнитного слоя величина H_p растет, а ΔH падает. Таким образом, по своим магнитным характеристикам многослойные пленки превосходят однослойные образцы, что позволяет более четко отслеживать структурные изменения, происходящие в системе. После ударно-волнового воздействия фольга с магнитным покрытием была разрезана на кусочки размерами 1,5×2 мм, при этом отслеживалось направление распространения фронта ударной волны. В дальнейшем для каждого образца были измерены H_p и ΔH вдоль и перпендикулярно направлению распространения ударной волны.

Как известно, величина резонансного поля зависит от поля анизотропии образца. Если образец, имеющий одноосную анизотропию поместить во внешнее поле параллельно плоскости образца, то резонансное поле вдоль

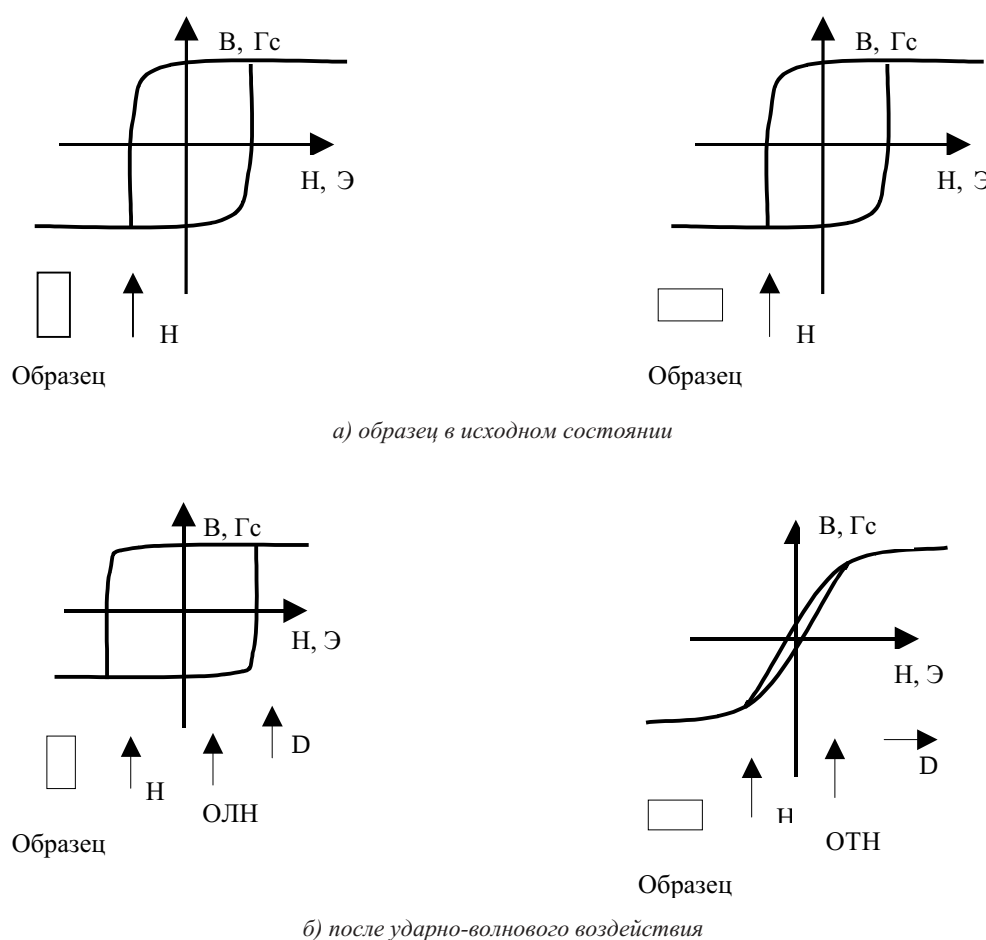


Рис. 2. Вид петель гистерезиса при различной ориентации образца относительно направления внешнего приложенного поля: D – направление распространения ударной волны, OLN и OTN – оси легкого и трудного намагничивания, соответственно

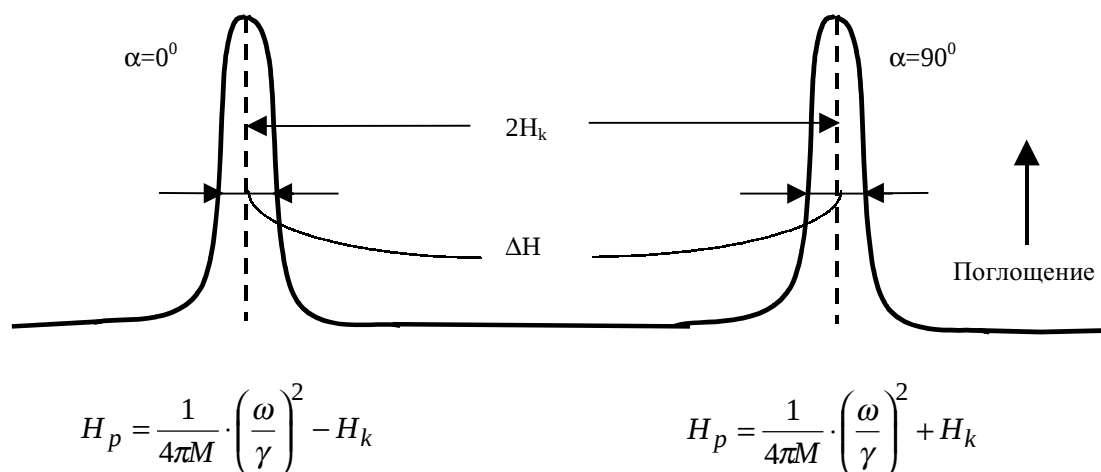


Рис. 3. Зависимость поглощения от внешнего поля, приложенного параллельно к плоскости пленки: при $\alpha=0^\circ$ поле параллельно легкой оси намагниченности, при $\alpha=90^\circ$ перпендикулярно ей

направления оси легкого намагничивания будет определяться как: $H_p^\uparrow = \frac{1}{4\pi M} \cdot \left(\frac{\omega}{\gamma} \right)^2 - H_k$, а перпендикулярно

этому направлению - $H_p^\perp = \frac{1}{4\pi M} \cdot \left(\frac{\omega}{\gamma} \right)^2 + H_k$ (рис. 3). Отсюда:

$$H_k = \frac{H_p^\perp - H_p^\uparrow}{2}, \quad (1)$$

где $H_k = 2 \frac{K_1}{M}$ - поле кристаллографической анизотропии (K_1 – первая константа анизотропии) [6].

На рис. 4 представлена типичная зависимость величины резонансного поля по длине исследуемых пленок. Метками " $\uparrow$ " и " $\perp$ " обозначены графики зависимости величины резонансного поля вдоль и перпендикулярно распространению ударной волны в пленках, соответственно; сплошной линией отмечено значение резонансного поля исходного образца. На рис. 4 видно, что после УВВ зависимость $H_p(L)$ имеет осциллирующий характер с длинно-волновым периодом порядка 30 мм. Графики зависимостей $H_p^\uparrow(L)$ и $H_p^\perp(L)$ асимметричны относительно друг друга, максимумам одной кривой соответствуют минимумы на другой кривой и наоборот. С по-

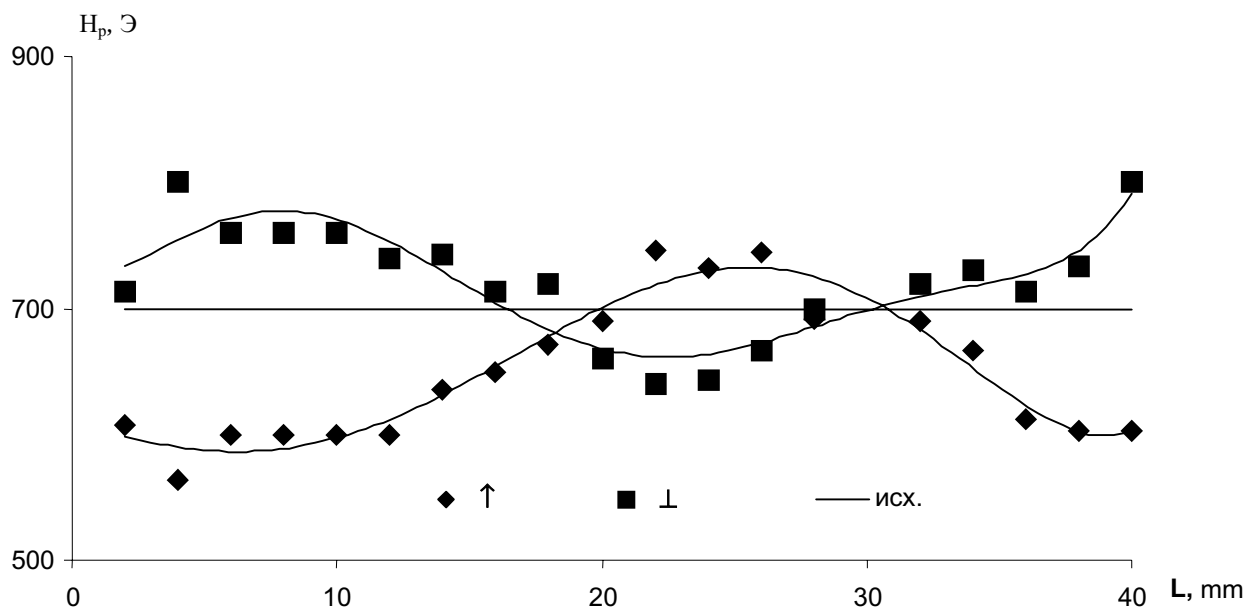


Рис. 4. Зависимость резонансного поля от длины образца $[\text{Co}(20\text{nm})/\text{Ni}(20\text{nm})]^*5/\text{Cu}$

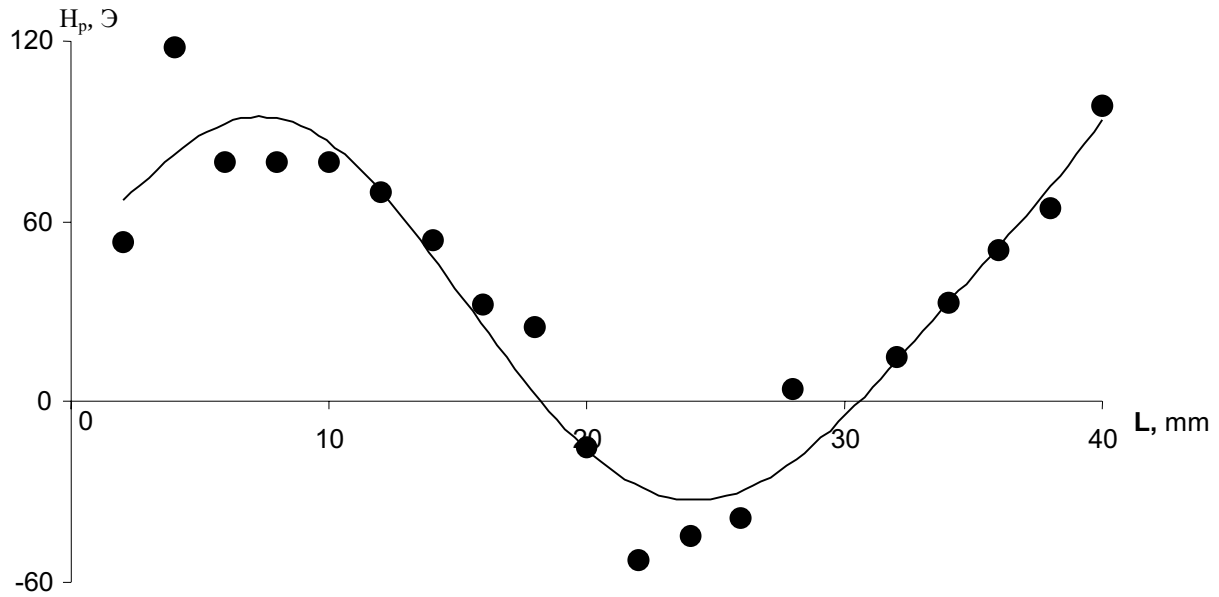


Рис. 5. График распределения поля анизотропии по длине образцов $[Co(20\text{нм})/Ni(20\text{нм})]*5/Cu$

грешностью $\sim 5\%$ (что не превышает экспериментальной ошибки) для образцов после УВВ выполняется равенство $2H_p(\text{исх.}) = H_p^{\uparrow}(L) + H_p^{\downarrow}(L)$, что однозначно указывает на наличие поля одноосной анизотропии в образцах после УВВ.

На рис.5 представлена зависимость величины поля анизотропии, вычисленной по формуле (1), по длине образца $[Co(20\text{нм})/Ni(20\text{нм})]*5/Cu$. Видно, что поле анизотропии меняет свое направление и величину по длине пленки. Более того, ударно-волновое воздействие приводит к наличию в средней части образца оси легкого намагничивания, перпендикулярной направлению распространения ударного фронта (на это указывает участок графика, где кривая $H_k(L)$ проходит ниже нулевого уровня). Подобное изменение величины поля анизотропии по длине образца возможно как из-за возникающих упругих напряжений на границе медь – мультислойная пленка за счет различного протекания деформационных процессов в этих материалах, так и из-за деформации зерен внутри материала основы. Наиболее вероятной представляется модель неоднородного распределения внутренних напряжений по длине образца. При этом если в данной точке $H_k > 0$ и элемент структуры является растянутым вдоль направления распространения ударной волны (РУВ), то в точке $H_k < 0$ он сжат перпендикулярно направлению РУВ. Таким образом, в графиках зависимостей $H_p(L)$, $H_k(L)$ проявляется влияние трансляционной (сдвиговой) моды механического поля, возникающего во время ударно-волнового воздействия.

Трансляционная и ротационная моды деформационного процесса взаимосвязаны, и изменение одной из них вызывает соответствующее изменение другой. Поэтому влияние ротационной моды, имеющей вихревой характер, также должно отражаться на структуре, (рис. 1), и, соответственно, на магнитных характеристиках исследуемых композитных систем.

На рис. 6 представлена типичная зависимость величины ширины линии резонансного поглощения (ΔH) по длине образца, где сплошной линией отмечена величина ΔH исходного образца; пунктиром и пунктиром с точкой обозначены средние значения ΔH образцов после УВВ вдоль и перпендикулярно направлению распространения ударной волны, соответственно. Видно, что значение ширины резонансной линии также осциллирует вокруг средней величины по длине образца. Однако в данном случае максимумы кривых фактически совпадают, а период осцилляций составляет ~ 8 мм. Практически для всех образцов разница между величинами $\Delta H(\text{исх.})$ и $\Delta H(\text{сред.})$, определенная для пленок после УВВ, одинакова и равна ~ 110 Э (см. таблицу).

Ширина резонансного поля зависит от многих факторов: внутренних напряжений, шероховатости поверхности, пор и немагнитных включений. Но данные параметры, скорее всего, могут привести лишь к общему повышению ΔH [7]. С другой стороны, ширина резонансной линии пропорциональна среднеквадратичной флуктуации поля локальной анизотропии, т.е. $\Delta H \sim \sqrt{D} H_a$, где H_a – поле локальной анизотропии, а D – константа, характеризующая дисперсию легких осей намагничивания при равномерном распределении их ориентации [8, 9].

Фактически изменение величины $\Delta H(L)$ отражает влияние ротационной моды деформационного процесса, протекающего во время УВВ. В работе [10] методом спекл – интерферометрии исследовалось распределение вдоль оси растяжения сдвиговой (ϵ_{xy}) и поворотной (ротационной) (ω_z) компонент. Было установлено, что значения $\omega_z(L)$ (где L – также длина образца) осциллируют с периодом, равным по порядку величины, полученному в результатах наших исследований.

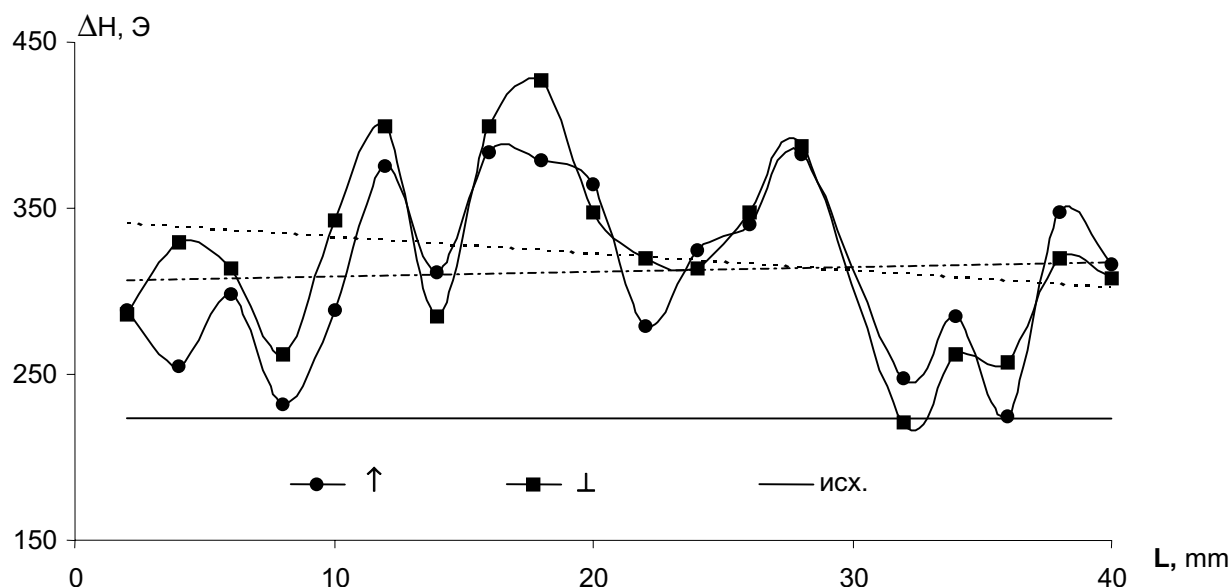


Рис. 6. Зависимость величины ширины линии резонансного поглощения по длине образца до и после УВВ образца $[Co(20nm)/Ni(20nm)] \times 5/Cu$: пунктир - ΔH (среднее) $\perp$ направлению распространению ударной волны, пунктир с точкой – вдоль направления распространения УВ

В данной работе представлены результаты исследования магнитных характеристик сложной композиционной системы: мультислойных пленок Co/Ni с постоянной общей толщиной 200 нм, химически осажденных на медную фольгу толщиной 30 мкм. По результатам рентгенофазовых исследований установлено, что в исходном состоянии медь текстурирована в направлении (220). Ударно-волновое воздействие частично снимает текстуру вследствие разворота зерен в процессе деформации. Изменения в структуре материала - основы (меди) отражаются на магнитных характеристиках покрытия (мультислойных пленок Co/Ni). В исходном состоянии образцы будут изотропными в плоскости пленки, после УВВ возникает выделенное направление легкого намагничивания, совпадающее с направлением распространения ударной волны. Влияние трансляционной моды механического поля деформации проявляется на осциллирующей кривой зависимости величины резонансного поля (полученной из

ФМР измерений) по длине образца. Вычисления поля анизотропии по формуле $H_k = \frac{H_p^\perp - H_p^\parallel}{2}$ показали, что

величина и направление этого поля меняется по длине образца, как некая периодическая функция, которая показывает неоднородное распределение внутренних напряжений по длине образца. Поведение величины ширины линии резонансного поля по длине образца в большей степени обусловлено дисперсией легких осей анизотропии, т.е. отражает влияние ротационной моды деформационного процесса, протекающего во время ударно-волнового воздействия, также описывается периодической функцией. Однако период функции $\Delta H(L)$ в три раза меньше периода функции $H_k(L)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. - Новосибирск: Наука-1985 - 227 с.
2. Фролов К.В., Панин В.Е., Зуев Л.Б. и др. // Изв. вузов. Физика. - 1990. - №2. - С. 19-35.
3. Панин В.Е., Зуев Л.Б., Данилов В.И., Мних Н.М. Пластическая деформация как волновой процесс // Докл. АН СССР. - 1989. - Т.308 - №6 - С.1375 -79.
4. Федосюк В.М., Шелег М.У., Касютин О.И. Многослойные магнитные структуры // Зарубежная радиоэлектроника. - 1990. - №5 - С.88 -98.
5. Тоичцкий, Федосюк, Болтушкин, Дмитриева О механизме формирования ультратонких электролитически осажденных пленок Ni на меди. // Электрохимия. - 1994. - Т.30 - №2 - С.201-205.
6. Суху Р. Магнитные тонкие пленки. - Москва: Мир. - 1967. - 269с.
7. Бержанский В.Н., Чеканова Л.А., Чистяков Н.С. Ферромагнитный резонанс в кристаллических и аморфных магнитных пленках // ФММ. - 1978. - Т.46 - В.1. - С. 33-37
8. Саланский Н.М., Ерухимов М.Ш. Физические свойства и применение магнитных пленок. Новосибирск: Наука (сибирское отделение). - 1975. - 133с.
9. Игнатченко В.А., Исаков Р.С., Попов В.Г. Закон приближения намагниченности к насыщению в аморфных ферромагнетиках // ЖЭТФ. - 1982. - Т.82. - №5 - С.1518-1531