

«Резонансные» явления в магнитной подсистеме при одновременном воздействии кручения и давления

Ю.Д. Заворотнев, Е.Г. Пашинская

*Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины,
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина
E-mail: zavorotnev.yurii@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 26 марта 2014 г., после переработки 21 мая 2014 г.,
опубликована онлайн 22 сентября 2014 г.

Изучены виды распределений структурного и магнитного параметров порядка (ПП) при наложении кручения и давления, приложенных перпендикулярно «легкой оси» ферромагнетика. Установлено появление двухсторонних одно- и противофазных пространственных амплитудных модуляций ПП при таком воздействии. Показано, что увеличение давления приводит к росту амплитуды модуляций ПП. Указаны возможные случаи резонансных явлений в структурной и магнитной подсистемах.

Вивчено види розподілів структурного і магнітного параметрів порядку (ПП) при накладенні кручення і тиску, прикладених перпендикулярно до «легкої осі» ферромагнетика. Встановлено появу двосторонніх одно- і протифазних просторових амплітудних модуляцій ПП при такому впливі. Показано, що збільшення тиску призводить до зростання амплітуди модуляцій ПП. Вказано можливі випадки резонансних явищ у структурній та магнітній підсистемах.

PACS: 75.25.-j Спиновые упорядочения в магнитоупорядоченных материалах (включая исследования с помощью нейтронов, поляризованных электронов, синхротронного рентгеновского рассеяния и т.д.);
75.40.Cx Статические свойства (параметр порядка, статическая восприимчивость, тепловые свойства, критические показатели и т.д.);
75.40.Mg Численное моделирование;
81.40.Vw Воздействие давления.

Ключевые слова: ферромагнетик, давление, термодинамический потенциал, параметр порядка, фазовый переход.

1. Введение

При изучении структурных и магнитных свойств кристаллов часто возникают ситуации, при которых необходимо учитывать влияние этих подсистем друг на друга. Их взаимодействие может приводить к различным эффектам, в частности к изменению рода фазового перехода (ФП) [1–4], возникновению вынужденного упорядочения [5], появлению предмартенситных и постмартенситных ФП [6], температурному смещению одного из ФП [7]. Во всех перечисленных работах ФП были результатом внутренних процессов. Такой ФП всегда происходит по одному из лучей звезды волнового вектора, что приводит к возникновению различных структурных и магнитных параметров порядка (ПП). Однако отличный от нуля ПП может возникнуть и при ФП второго рода, обусловленном каким-либо внешним воздействием, в частности приложенной внешней силой. В работе [8] исследовалось

поведение магнитного и структурного ПП под влиянием интенсивной пластической деформации кручением (ИПДКР), ось которой направлена перпендикулярно «легкой оси» ферромагнетика. В результате в магнитной подсистеме возникала спиральная структура с изменяющимся по величине модулем магнитного ПП. Показано, что, изменяя температуру, можно управлять видом пространственного распределения этого модуля. Процессы, исследованные в [8], являются пространственными аналогами временных колебательных процессов. Из теории и практики известно, что при наложении внешней переменной силы возможно появление резонанса, при котором амплитуда собственного колебания многократно увеличивается. В случае пространственных колебательных процессов возможны подобные ситуации, причем роль вынуждающей силы может играть направленное перпендикулярно «легкой оси» периодически изменяющееся в пространстве одноосное давление.

В настоящей работе изучаются виды распределений структурного и магнитного ПП при наложении ИПДКР и периодического постоянного давления (ППД), изменяющегося в пространстве в направлении, перпендикулярном «легкой оси» ферромагнетика.

2. Теория

Пусть в модельном ферромагнетике с анизотропией типа «легкая ось» (OZ) приложена ИПДКР, направленная по оси OY . Кроме этого, по оси OX приложено одноосное ППД с вектором распространения k . При описании такой модели с использованием теории Ландау в неравновесном термодинамическом потенциале (НТДП) необходимо учитывать упругую и магнитоупругую энергии. В равновесных ситуациях можно найти выражения для компонент тензоров упругого и магнитоупругого взаимодействий как функции термодинамических постоянных, а также структурного и магнитного ПП. Подставляя найденные выражения в НТДП, получим выражение, которое формально совпадает с НТДП без учета упругого и магнитоупругого взаимодействий. В итоге для кристаллов, допускающих существование инвариантов Лифшица, получаем

$$\begin{aligned} \Phi = & \frac{\alpha_1}{2} q^2 + \frac{\alpha_2}{4} q^4 + \frac{\alpha_3}{6} q^6 + \frac{\beta_1}{2} F_z^2 + \frac{\beta_2}{4} F_z^4 + \frac{\beta_3}{6} F_z^6 + \\ & + \frac{\beta_4}{2} F_x^2 + \frac{\beta_5}{4} F_x^4 + \gamma_1 q^2 (F_x^2 + F_z^2) + \gamma_4 F_x^2 F_z^2 - \\ & - \gamma_2 M^r \left(q_z \frac{\partial q_x}{\partial y} - q_x \frac{\partial q_z}{\partial y} \right) + \gamma_3 M^s \left[\left(\frac{\partial q_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial q_z}{\partial y} \right)^2 \right] - \\ & - P_x q_x (1 + \delta \cos ky). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta$ — феноменологические константы, q и F — структурный и ферромагнитный ПП. Ось OZ направлена по «легкой оси», вращение происходит в плоскости XZ , OY — ось вращения, M — момент кручения ИПДКР, P_x — величина ППД. В (1) предполагается, что $\alpha_1, \beta_1, \beta_4$ зависят от температуры и меняют знак в критических точках, $\alpha_3 > 0, \beta_3 > 0, \beta_5 > 0, \gamma_1 < 0, \gamma_4 < 0, \beta_4 > 0, \delta > 0$. Знаки остальных коэффициентов будут меняться при постановке вычислительного эксперимента. Слагаемые с пространственными производными описывают возникающую в результате наложения ИПДКР пространственную спиральную структуру. Как показано в [8], разница $r - s = 4$. В силу этого в настоящей работе принято $r = 6, s = 2$. Величина вектора распространения спиральной структуры при постоянном моменте кручения существенно зависит от материала и его толщины. Для образца, представленного в работе [8], величина этого вектора варьируется от нуля до 15 м^{-1} при изменении значения модуля момента ИПДКР от нуля до $95 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Необходимо отметить, что для достижения резонанса, который рассматривается в следующем разделе, период пространственного изменения ППД должен примерно совпадать с периодом изменения величины модуля ферромагнитного ПП, т.е. величина вектора распространения k ППД должна быть примерно на порядок больше величины вектора распространения ИПДКР.

При отказе от приближения постоянства модулей неприводимых векторов получаем следующую систему уравнений Эйлера:

$$\begin{cases} 2\gamma_3 M^s \frac{\partial^2 q_x}{\partial y^2} + 2\gamma_2 M^r \frac{\partial q_z}{\partial y} - q_x [\alpha_1 + \alpha_2 q^2 + \alpha_3 q^4 + 2\gamma_1 (F_x^2 + F_z^2)] + P_x (1 + \delta \cos ky) = 0, \\ 2\gamma_3 M^s \frac{\partial^2 q_z}{\partial y^2} - 2\gamma_2 M^r \frac{\partial q_x}{\partial y} - q_z [\alpha_1 + \alpha_2 q^2 + \alpha_3 q^4 + 2\gamma_1 (F_x^2 + F_z^2)] = 0, \\ \beta_1 + \beta_2 F_z^2 + \beta_3 F_z^4 + 2\gamma_1 q^2 + 2\gamma_4 F_x^2 = 0, \\ \beta_4 + \beta_5 F_x^2 + 2\gamma_1 q^2 + 2\gamma_4 F_z^2 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Систему дифференциально-алгебраических уравнений (2) аналитически решить затруднительно. Поэтому с помощью математического пакета MatLab7 с использованием вырожденной матрицы масс был проведен численный анализ этой системы, результаты которого обсуждаются далее. Этот анализ позволил также выявить наличие некратных гармоник, которые обуславливают ряд специфических эффектов, подробно разбираемых ниже.

3. Численный эксперимент. Обсуждение результатов

Результаты, представленные в настоящем разделе, имеют модельный характер. Это объясняется тем, что при решении системы (2) численные значения феноменологических коэффициентов подбирались таким образом, чтобы решение существовало [8]. В случае рассмотрения кристалла с определенной химической

формулой необходимо использовать конкретные значения этих коэффициентов. Следует отметить, что случай $P_x = 0$ подробно рассмотрен в работе [8].

1) $\alpha_1 < 0, \alpha_2 < 0, \alpha_3 > 0, \beta_1 > 0, \beta_2 > 0, \beta_3 > 0, \beta_4 > 0, \beta_5 > 0, \gamma_1 < 0, \gamma_2 < 0, \gamma_3 > 0, \gamma_4 < 0, M > 0$. Такой набор коэффициентов означает, что кристалл по температуре находится ниже структурного ФП первого рода, но выше магнитного ФП второго рода. В отсутствие ППД, как показано в [8], зависимости $q_x(y)$ и $q_z(y)$ имеют вид пространственно модулированных колебаний, причем несущее и модулирующее колебания имеют примерно одинаковый вектор распространения. Этот вывод подтверждается фурье-анализом, который показывает справа и слева от нуля наличие двух пиков, разнесенных друг от друга достаточно далеко. При этом колебательный процесс модулей является практически синусоидальным. Благодаря наложению ППД появляется постоянный сдвиг составляющей q_x (пик в

точке $y=0$ на рис. 1(а)). Два отстоящих достаточно далеко друг от друга пика в правой части на рис. 1(а) свидетельствуют о наличии двухсторонней однофазной модуляции (рис. 1(б)). Следует отметить, что график такой же формы имеет консервативная колебательная система из двух взаимосвязанных маятников, которую можно описать формулой $\sin(k_1 y) \sin(k_2 y)$ с близкими значениями k_1 и k_2 . Аналогичный вид имеют кривые зависимостей $F_x(y), F_z(y), q_z(y)$, но у двух последних отсутствует постоянный сдвиг. Поскольку разность фаз колебаний $q_x(y)$ и $q_z(y)$ ($F_x(y)$ и $F_z(y)$) оказывается зависящей от переменной y , результирующее колебание модулей ПП будет иметь сложный вид.

На рис. 1(в,г) представлены зависимости $F(y)$ и ее амплитуды Фурье. Видно, что спектр представляет собой наложение трех совокупностей колебаний. Гармоники с 6-й по 9-ю, а также с 11-й по 14-ю эквивалентны двум двойным маятникам. Совокупность гар-

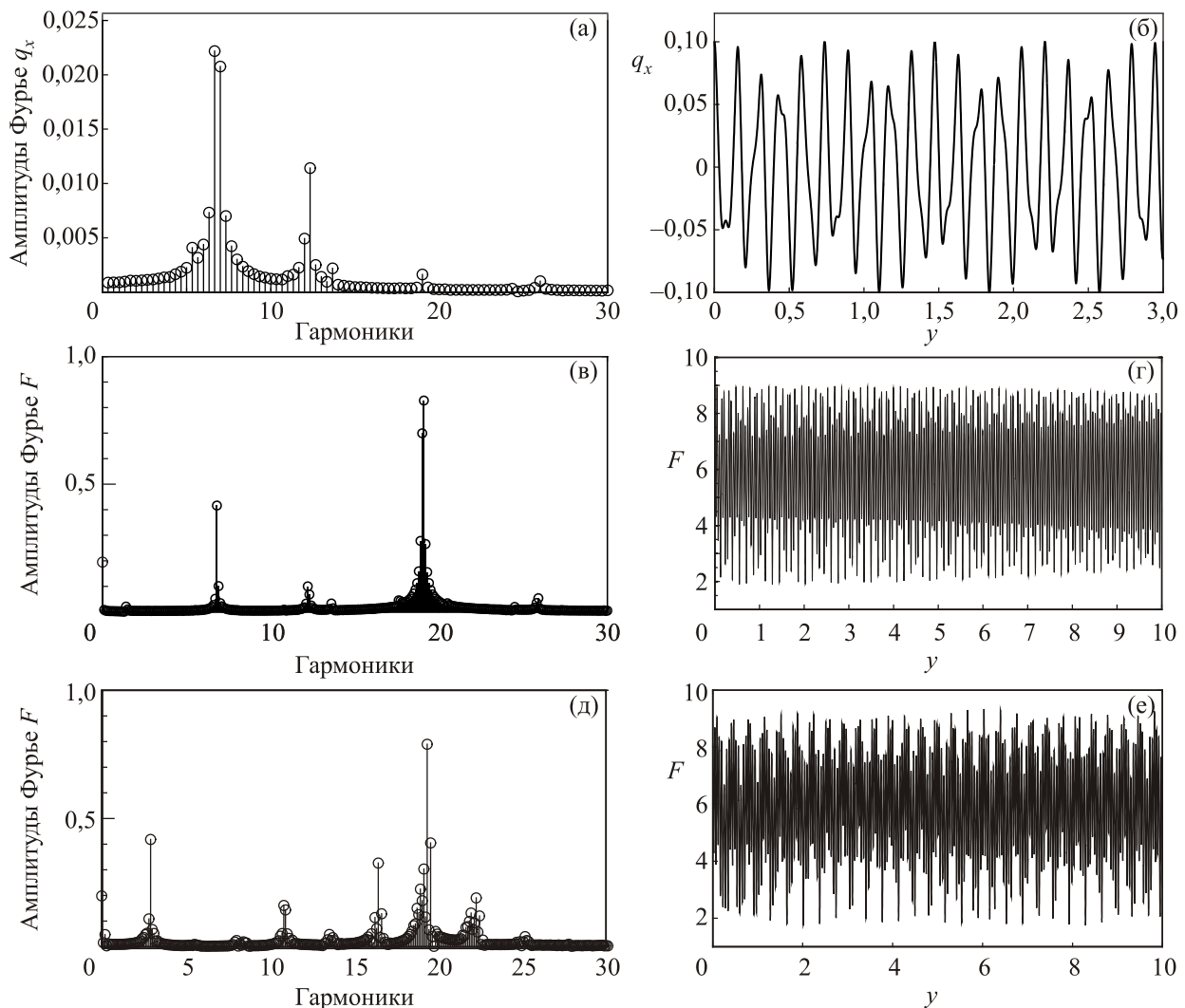


Рис. 1. Вид зависимостей $q_x(y)$ и $F(y)$ ниже структурного ФП первого рода, но выше магнитного ФП второго рода. Малая величина P_x — фурье-анализ (а), (в) и пространственные зависимости $q_x(y)$ (б) и $F(y)$ (г). Большая величина P_x — фурье-анализ (д) и пространственная зависимость $F(y)$ (е).

моник с 17-й по 20-ю, которые имеют выраженный центральный пик, свидетельствует о наличии пространственной амплитудной модуляции. Увеличение давления приводит к росту амплитуды модуляций. Небольшое увеличение величины k обуславливает рост шумовой составляющей модулей и компонент обоих ПП. При дальнейшем росте k , как показывает фурье-анализ (рис. 1(д)), появляются дополнительные частоты, ответственные за образование однофазной амплитудной модуляции компонент и модулей ПП. Кроме этого, появляются частоты вблизи основной, что свидетельствует о возникновении слабой двухсторонней однофазной амплитудной модуляции (двойной маятник), которая усиливается с ростом k и при больших значениях вектора распространения внешнего синусоидального постоянного давления становится доминирующей (рис. 1(е)).

2) $\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0, \alpha_3 > 0, \beta_1 < 0, \beta_2 > 0, \beta_3 > 0, \beta_4 > 0, \beta_5 > 0, \gamma_1 < 0, \gamma_2 < 0, \gamma_3 > 0, \gamma_4 < 0, M > 0$. Такое соотношение коэффициентов означает, что кристалл по температуре находится выше структурного ФП второго рода, но ниже магнитного ФП второго рода. Структурный ПП возникает вынужденно. В отсутствие ППД колебательные характеристики составляющих и модулей практически синусоидальные со слабыми шумовыми частотами, обуславливающими наличие малой двухсторонней противофазной амплитудной модуляции [8]. При наложении ППД с малым вектором распространения благодаря постоянно меняющемуся фазовому рассогласованию между q_x и q_z возникает двухчастотный колебательный процесс (рис. 2(а)) векторов q и F . Как показывает фурье-анализ, имеет место сложный процесс, в котором отсутствует пространственная амплитудная модуляция (нет центрального пика на рис. 2(а)), а колебание можно представить как два связанных маятника, частоты которых различаются примерно в два раза (рис. 2(б)). Увеличение P_x приводит к росту размаха колебаний структурного и

магнитного ПП. Относительно малое увеличение вектора распространения ведет к уменьшению амплитуды гармоник с меньшим вектором k . При некотором критическом значении k на фурье-диаграмме появляется много дополнительных пиков (рис. 3(а)), обуславливающих сложную форму пространственного колебания обоих ПП (рис. 3(б)). Видно, что процесс является суперпозицией пяти колебаний. Гармоники 2, 6 и 8 соответствуют трем независимым колебаниям с пространственной амплитудной модуляцией, каждую из которых можно описать выражением вида $\sin(k_1 y) \sin(k_2 y)$ с далекими друг от друга значениями векторов распространения. Четвертая и десятая гармоники представляют практически неискаженные колебания синусоидального типа. С увеличением k амплитуды этих частот уменьшаются и в пределе $k \rightarrow \infty$ вид колебательного процесса возвращается к случаю $P_x = 0$.

3) $\alpha_1 < 0, \alpha_2 > 0, \alpha_3 > 0, \beta_1 < 0, \beta_2 > 0, \beta_3 > 0, \beta_4 > 0, \beta_5 > 0, \gamma_1 < 0, \gamma_2 < 0, \gamma_3 > 0, \gamma_4 < 0, M > 0$. Температура кристалла ниже обоих ФП второго рода. При $P_x = 0$ колебательные процессы модулей q и F имеют, как показывает фурье-анализ, двухстороннюю противофазную амплитудную модуляцию [8]. При наложении ППД появляются дополнительные пики (рис. 4(а)), т.е. суммарный процесс можно представить в виде наложения двух синусоидальных колебаний с многочисленными амплитудными модуляциями, которые имеют разные векторы распространения, возрастающие с ростом P_x (рис. 4(б)). При увеличении значения модуля вектора распространения k возрастает вес однофазной модуляции. Спектр пространственных колебаний при примерном совпадении модулей векторов распространения ИПДКР и ППД приведен на рис. 5(а). Соответствующий фурье-анализ показывает наличие многочисленных шумовых составляющих (рис. 5(б)), обуславливающих появление разных форм пространственной модуляции, что приводит к появлению резонансного эффекта, показанного на рис. 5(а).

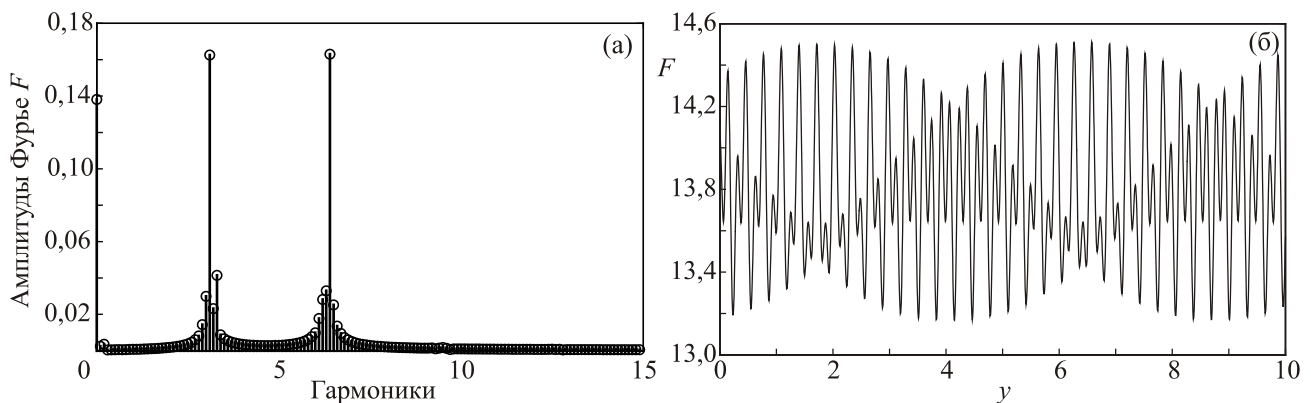


Рис. 2. Фурье-анализ (а) и пространственная зависимость $F(y)$ (б) выше структурного ФП второго рода, но ниже магнитного ФП второго рода.

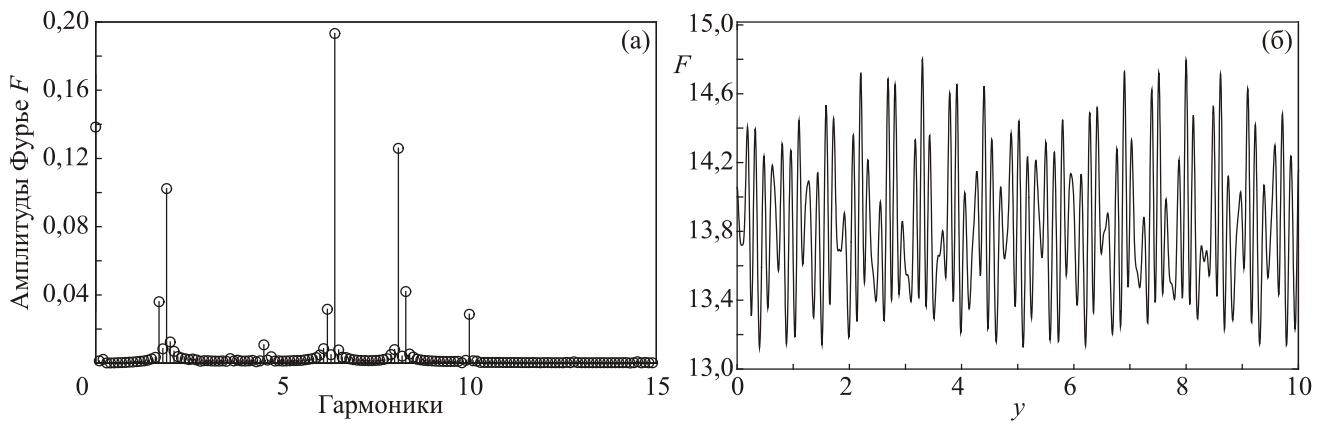


Рис. 3. Фурье-анализ (а) и пространственная зависимость $F(y)$ (б) при критическом значении k выше структурного ФП второго рода, но ниже магнитного ФП второго рода.

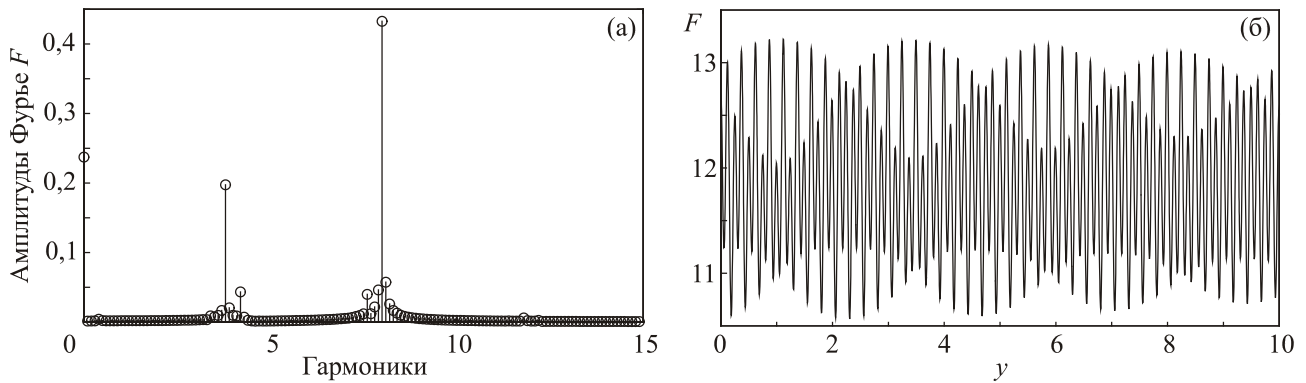


Рис. 4. Фурье-анализ (а) и пространственная зависимость $F(y)$ (б) ниже структурного и магнитного ФП второго рода.

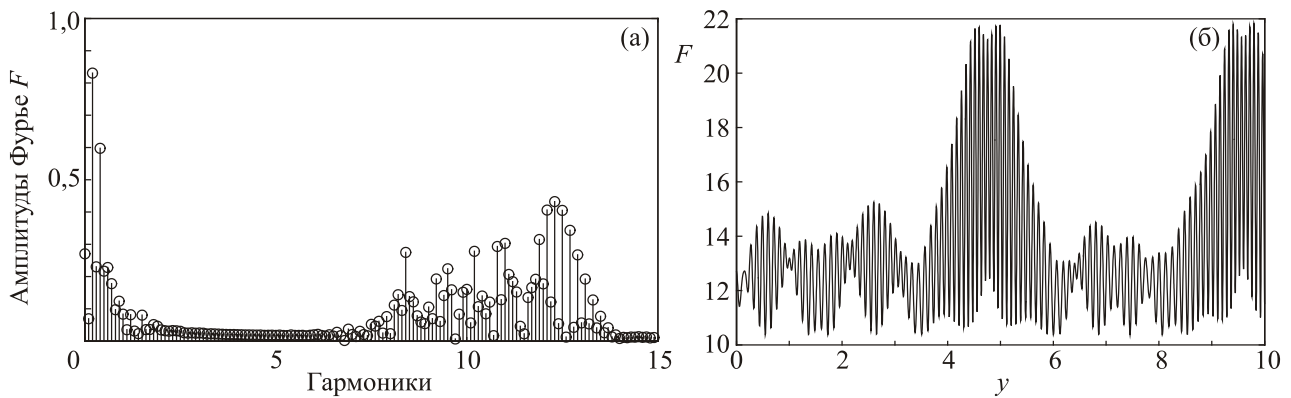


Рис. 5. Фурье-анализ (а) и пространственная зависимость $F(y)$ (б) ниже структурного и магнитного ФП второго рода. Примерное совпадение модулей векторов распространения ИПДКР и ППД.

4. Заключение

1. Показано, что совместное наложение кручения и давления в различных температурных интервалах позволяет создавать определенные типы распределений модулей магнитного и структурного ПП. Во всех случаях увеличение давления приводит к росту амплитуды пространственных модуляций ПП. Небольшое увеличение длины вектора распространения k обуславливает рост шумовой составляющей модулей и компонент обоих ПП.

2. Если температура кристалла находится ниже структурного ФП первого рода, но выше магнитного ФП второго рода, то при росте вектора распространения появляются дополнительные частоты, ответственные за образование однофазной амплитудной модуляции компонент и модулей ПП. Кроме этого, обнаружено возникновение слабой двухсторонней противофазной амплитудной модуляции, которая усиливается с ростом k и при больших значениях вектора распространения внешнего синусоидального постоянного давления становится доминирующей.

3. Для случая, когда по температуре кристалл находится выше температуры структурного ФП второго рода, но ниже магнитного ФП второго рода, установлено наличие двухсторонних одно- и противофазных амплитудных модуляций ПП. Увеличение давления приводит к росту размаха колебаний структурного и магнитного ПП. При некотором критическом значении k на фурье-диаграмме появляются дополнительные пики, обуславливающие сложную форму пространственного колебания обоих ПП.

4. Для случая, когда по температуре кристалл находится ниже структурного и магнитного ФП второго рода, при наложении давления наряду с противофазной появляется однофазная модуляция. Ее амплитуда и частота возрастают с ростом давления. При увеличении значения модуля вектора распространения вес однофазной модуляции возрастает. При совпадении модулей векторов распространения кручения и давления имеет место резонансный эффект, при котором появляются различные формы пространственной модуляции.

1. O. Beckman and L. Lundgren, in: *Handbook of Magnetic Materials*, vol. 6, ch. 3, K.H.J. Buschow (ed.), Elsevier, New York (1991).
2. T. Kanomata, H. Ishigaki, H. Yoshida, S. Abe, and T. Kaneko, *J. Magn. Magn. Mater.* **140**, 131 (1995).
3. Э.З. Валиев, *ЖЭТФ* **135**, 314 (2009).
4. Ю.Д. Заворотнев, *ФНТ* **39**, 178 (2013) [*Low Temp. Phys.* **39**, 133 (2013)].
5. Ю.М. Гуфан, *Структурные фазовые переходы*, Наука, Москва (1982).
6. В.Д. Бучельников, А.Н. Васильев, В.В. Коледов, С.В. Таскаев, В.В. Ховайло, В.Г. Шавров, *УФН* **176**, 900 (2006).

7. V.D. Buchel'nikov, S.V. Taskaev, M.A. Zagrebin, and P. Entel, *Mater. Sci. Forum* **583**, 131 (2008).
8. Yu.D. Zavorotnev, E.H. Pashinskaya, V.N. Varjuchin, and O.Yu. Popova, *J. Magn. Magn. Mater.* **349**, 244 (2014).

“Resonance” phenomena in a magnetic subsystem under simultaneous effect of twisting and pressure

Yu.D. Zavorotnev and E.H. Pashinskaya

The types of distributions of the structural and the magnetic order parameters under twisting and pressure applied perpendicular to the “easy axis” of a ferromagnetic have been studied. It is found that the effect causes dual-sided single-phase and antiphase spatial amplitude modulations of the order parameter. It is shown that an increase in the pressure increases the modulation amplitude of the order parameter. Possible cases of resonance phenomena in the structural and magnetic subsystems have been pointed out.

PACS: **75.25.-j** Spin arrangements in magnetically ordered materials (including neutron and spin-polarized electron studies, synchrotron-source x-ray scattering, etc.);
75.40.Cx Static properties (order parameter, static susceptibility, heat capacities, critical exponents, etc.);
75.40.Mg Numerical simulation studies;
81.40.Vw Pressure treatment.

Keywords: ferromagnetic, pressure, thermodynamic potential, order parameter, phase transition.