

УДК 669-1:537.9.001

В. А. Доценко¹

И. А. Белоус²

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
Владивосток. Россия

Особенности поведения прочностных свойств сплавов железа в области температур магнитных переходов на основе феноменологической теории фазовых переходов

Образование магнитного порядка в металлах и сплавах рассматривается как проявление в основной кристаллической решётке металлов и сплавов сопряжённой с ней магнитной структуры, обладающей достаточной жёсткостью и энергией. Изучение их взаимосвязи представляет большой интерес для использования промышленных металлов и сплавов. В результате проведённого исследования можно утверждать, что магнитное упорядочение искажает кристаллическую решётку: при температуре перехода она становится менее стабильной, что приводит к значительно более высокой пластичности вновь образующейся магнитоупорядоченной фазы. В температурных областях магнитных превращений пластичность антиферромагнитной или ферромагнитной фазы больше пластичности парамагнитной фазы и ведёт себя немонотонно.

Ключевые слова и словосочетания: фазовые магнитные переходы, прочностные свойства при магнитных перестройках ферромагнетизм→парамагнетизм, антиферромагнетизм→парамагнетизм.

V.A. Dotsenko

I.A. Belous

Vladivostok State University of Economics and Service
Vladivostok. Russia

¹ Доценко Валентин Антонович – канд. техн. наук, доцент, Академический колледж; e-mail: valentin.docenko@vvsu.ru

² Белоус Игорь Александрович – канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: igor.belous@vvsu.ru

Features of the behavior of the strength properties of iron alloys in the temperature range of magnetic transitions based on the phenomenological theory of phase transitions

The establishment of magnetic order in metals and alloys can be considered as the appearance in the main atomic lattice of a conjugate magnetic lattice with sufficient rigidity and energy. The study of the relationship between atomic and magnetic structures is of great interest because magnetic ordering, in some cases, determines the crystallographic symmetry of alloys, affects the processes of motion of dislocations, the kinetics and morphology of phase transformations, and also changes a number of physical properties of materials, including mechanical ones. Based on the study carried out, it can be argued that spin ordering distorts the crystal lattice: at the transition temperature, it becomes less stable, which leads to a significantly higher plasticity of the newly formed magnetically ordered phase; in the temperature regions of magnetic transformations, the plasticity of the antiferromagnetic or ferromagnetic phase is greater than the plasticity of the paramagnetic phase and behaves non-monotonically.

Keywords: alloying alloys, austenite, magnetic restructuring ferromagnetism → paramagnetism, antiferromagnetism → paramagnetism.

Введение

Склонность металлов и сплавов к упрочнению, вязкому или хрупкому разрушению рассматривается обычно в двух основных направлениях. Первое – учитывается связь свойств со структурным и фазовым составом, второе – рассматривается механизм пластичной деформации на атомном уровне. Магнитные превращения составляют часть одной из фундаментальных проблем металловедения – проблемы фазовых переходов.

Определяющая роль магнитного изменения спиновой энтропии при магнитных превращениях в железе указывалась ещё в [1; 2]. В настоящей работе на основании термодинамического потенциала ферромагнетика в приближении Ландау-Лифшица-Девоншира рассчитывается изменение прочностных свойств вблизи температур магнитных переходов.

Магнитное упорядочение изменяет ряд физических свойств материалов, в том числе механических [3–8]. Изучение этого вопроса представляет практический интерес для установления рациональных режимов термической обработки, учитывающих наличие магнитных фазовых переходов, а получение надёжных экспериментальных данных, характеризующих поведение материалов и сплавов в области температур магнитных превращений, актуально, т.к. большинство из них подвергается таким эксплуатационным воздействиям, при которых происходят магнитные фазовые переходы.

Результаты и обсуждение

В работах [9–12; 19] рассматривалось влияние магнитных превращений ферромагнетизм → парамагнетизм, антиферромагнетизм → парамагнетизм на прочностные пластические свойства промышленных сплавов на основе железа.

Возможное объяснение наблюдаемым эффектам может быть дано, если считать, что причинами повышенной пластичности магнитоупорядоченной фазы

по сравнению с парамагнитной являются, с одной стороны, фазовая нестабильность, связь которой с аномально высокой пластичностью показана в работе [11], а с другой – эффект торможения развития трещин в магнитоупорядоченной фазе [7].

Термодинамический потенциал ферромагнетика в приближении Ландау–Лифшица–Девоншира [1; 2; 13–16; 18] равен:

$$\Phi = \frac{1}{2}(a + \Lambda\omega)M^2 + \frac{1}{4}bM^4 + \frac{1}{6}cM^6 + \frac{1}{2}E\omega^2 - \delta\omega,$$

где M – относительная намагниченность;

ω – изменение объёма.

Выражения для M и ω :

$$M^2 = \frac{\tilde{b}}{2c} + \sqrt{\left(\frac{\tilde{b}}{2c}\right)^2 - \left(\frac{a_\sigma}{c}\right)}; \quad a_\sigma = a + \frac{\Lambda\sigma}{E}, \quad \omega = \frac{\left(\sigma - \frac{1}{2}\Lambda M^2\right)}{E}, \quad \text{используя}$$

для определения сжимаемости $\chi = 1/\tilde{E}$, имеем $\tilde{E} = \frac{\partial\sigma}{\partial\omega} = E + \frac{1}{2}\Lambda \frac{\partial M^2}{\partial\omega}$ или

$$\tilde{E} = E \frac{\tilde{b} + 2cM^2}{b + 2cM^2}.$$

Таким образом, в точке магнитного фазового перехода атомная решётка становится неустойчивой (величина $\tilde{E} \rightarrow 0$, $\chi \rightarrow \infty$).

Более низкая стабильность решётки в точке магнитного перехода обусловлена магнитным упорядочением. Оно вызывает самопроизвольную деформацию кристаллической решётки. Эта деформация [17] в общем случае возникает как за счёт обменного, так и за счёт магнитного воздействия [8]. Обменная энергия в кубических кристаллах носит изотропный характер, поэтому самопроизвольная деформация решётки за её счёт проявляется в изменении объёма элементарной ячейки. Наоборот, магнитная энергия носит анизотропный характер, поэтому может вызывать изменение симметрии решётки [16]. В источнике [9] указывается, что решётка железа и никеля ниже точки Кюри становится слаботетрагональной и слаборомбоздрической соответственно. Магнитная структура антиферромагнетиков связана с их кристаллической структурой, поэтому в большинстве антиферромагнитных материалов установление спинового порядка ниже температуры Нееля неизбежно влияет на взаимодействие плоскостей кристаллической решётки, что, в свою очередь, может привести к изменению её объёма и симметрии. В большинстве антиферромагнетиков относительная деформация решетки при переходе из парамагнитного состояния в антиферромагнитный достигает очень большой величины, значительно превосходящей величину спонтанной магнитострикции в ферромагнетиках вблизи температуры Кюри [6]. В литературе по изучению симметрии решётки при антиферромагнитном переходе железомарганцевых сплавов имеются данные только для сплава с 25% Mn. Авторы показывают, что отклонение c/a в антиферромагнетиках состав-

ляет $<10^{-3}$, и делают вывод [10], что сплав сохраняет кубическую симметрию при переходе через температуру Нееля. Однако точность проведённых измерений недостаточна, поскольку антиферромагнитное упорядочение может приводить к значительно меньшим искажениям решётки. В частности, в Сг при переходе парамагнетизм-антиферромагнетизм были найдены искажения решётки порядка 10^{-6} [11].

Кроме того, как показано в работе [7], магнитное упорядочение за счёт наличия магнитных сил ниже температуры Кюри достаточно для перераспределения ослабленных и упорядоченных сечений, ведущих к переходу процесса локализации в другое место. Таким образом, достигается равномерная деформация по всей длине образца, ведущая к большим величинам относительного удлинения.

Наименьшее напряжение, необходимое для роста трещины, рассчитано по формуле:

$$\sigma = \sqrt{2\tilde{E}\gamma'/\pi l},$$

где \tilde{E} – модуль Юнга;

γ' – полный коэффициент поверхностного натяжения трещины;

l – длина трещины.

Добавка к энергии образования трещины магнитной энергии:

$$E : (4\pi/6)R^3(B^2/\mu_0)$$

эквивалентна увеличению коэффициента поверхностного натяжения на

$$\Delta\gamma' = (R/6)(B^2/\mu_0),$$

где B – магнитная индукция насыщения;

μ_0 – магнитная постоянная;

R – радиус поры или трещины.

Всестороннее давление, обусловленное магнитной энергией, равно:

$$P = \frac{1}{2} \left(\frac{B^2}{\mu_0} \right) = 140 \text{ кПа}.$$

Давление в 100 кПа ускоряет залечивание пор, тем самым повышая показатели пластичности. Кроме того, магнитное давление повышает минимальное напряжение, при котором пора начинает расти [7; 19]. Это увеличение напряжения до уровня:

$$\Delta\sigma = \frac{1}{2} R^{2/3} \left(\frac{B^2}{\mu_0} \right) = 5 \text{ кПа}.$$

Результаты практических, механических испытаний показали, что в температурных областях магнитных превращений пластичность антиферромагнитной или ферромагнитной фазы больше пластичности парамагнитной фазы [11].

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы:

1. На базе феноменологической теории фазовых переходов показано, что в сплавах на основе железа при магнитных упорядочениях происходит увеличение прочностных и пластических свойств по сравнению с парамагнитным состоянием.

2. В точках магнитного фазового перехода атомная решётка становится неустойчивой (изменение объёма и симметрии) и ведет к большим величинам относительного удлинения.

3. Всестороннее давление, обусловленное наличием магнитной энергии, достигает значения 140 кПа, что ускоряет залечивание пор, перераспределение дислокаций, тем самым повышая показатели пластичности металлов и сплавов при переходе в магнитоупорядоченное состояние.

1. Вонсовский С.В. Магнетизм: монография. – Москва: Наука, 1971. – 1032 с.
2. Рязанов Г.В. Феноменологическая теория фазовых переходов 2 рода // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1968. – Т. 52. – С. 1688.
3. Магнитное упорядочение и механические свойства аустенитных сплавов системы Fe-Ni / В.В. Сагарадзе, Е.Н. Старченко, В.Г. Пушин, Ю.Э. Трухан // Физика металлов и металловедение. – 1986. – Т. 62, №6. – С. 1144–1155.
4. Коршунов Л.Г., Сагарадзе В.В., Старченко Е.Н. Влияние магнитных превращений на параметры трения и изнашивания аустенитных сплавов // Физика металлов и металловедение. – 1984. – Т. 58, №3. – С. 585–588.
5. Косицина И. А., Сагарадзе В. В. Изменение механических свойств и антиферромагнитное упорядочение марганцевых аустенитных сталей при низких температурах // Физика металлов и металловедение. – 1989. – Т. 68, №4. – С. 818–825.
6. Магнитообъёмная аномалия в сплавах железо-марганец с ГЦК решёткой / О.А. Хоменко, И.Ф. Хилькевич, Г.Е. Звигинцева, Л.А. Ваганова // Физика металлов и металловедение. – 1978. – Т. 45, №4. – С. 808–813.
7. Садовский В. Д., Сагарадзе В. В., Старченко Е. И. Влияние магнитного упорядочения на работу развития трещины и пластичность аустенитных сплавов на Fe-Ni основе // Физика металлов и металловедение. – 1984. – Т. 57, Вып. 5. – С. 959–966.
8. Krumhansl J. A., Gooding R. J. Structural phase transitions with little phonon softening and first-order character // Phys. Rev. B. – 1989. – Vol. 39, № 5. – P. 3047–3056.
9. Богачёв И. Н., Звигинцева Г. Е. // Доклады АН СССР. – 1974. – Т. 215, № 3. – С. 570–571.
10. Белоус И. А., Доценко В. А. Влияние магнитного перехода на характер мартенситных превращений в сплавах на Fe-Mn основе // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 152–165.
11. Доценко В. А., Белоус И. А. Особенности изменения прочностных свойств сплавов на основе железа в области температур магнитных переходов // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 124–136.
12. Структура и механические свойства железомарганцевых сплавов с ниобием / И.Н. Богачёв, Г.Е. Звигинцева, Н.В. Звигинцев [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 1977. – Т. 44, № 2. – С. 281.

13. Разумов И. К., Горностырев Ю. Н., Кацнельсон М. И. К теории фазовых превращений в железе и стали на основе первопринципных подходов // *Физика металлов и металловедение*. – 2017. – Т. 118, № 4. – С. 380–408.
14. Бодяков В. Ю., Повзнер А. А. Самосогласованная термодинамическая модель кристаллической решётки твёрдого тела // *ГОУ ВПО УГТУ – УПН*. – 2002. – Ч. 1. – С. 95.
15. Бодяков В. Ю., Повзнер А. А. Самосогласованная термодинамическая модель кристаллической решётки твёрдого тела // *ГОУ ВПО УГТУ – УПН*. – 2002. – Ч. 2. – С. 146.
16. Бодяков В. Ю., Повзнер А. А., Сафонов И. В. Применение самосогласованной термодинамической модели твёрдого тела для выделения магнитных вкладов в физические свойства магнетиков (на примере никеля) // *Физика металлов и металловедение*. – 2005. – Т. 100. – № 1. – С. 8–16.
17. Исследование фазовых переходов в антиферромагнитной модели Гейзенберга на объёмно-центрированной кубической решётке методом Монте-Карло / А. К. Муртазаев, Ф. А. Кассам-Огла, М. К. Рамазаков, К. Ш. Муртазаев // *Физика металлов и металловедение*. – 2020. – Т. 121, № 4. – С. 946–351.
18. Бодяков В. Ю. Применение самосогласованной термодинамической модели твёрдого тела для выделения магнитных вкладов в физические свойства магнетиков (на примере никеля) / В. Ю. Бодяков, А. А. Повзнер, И. В. Сафонов // *Физика металлов и металловедение*. – 2005. – Т. 100, № 1. – С. 8–16.
19. Barsch G. P., Krumhansl J. A. Twin Boundaries in Ferroelastic Media without Interface Dislocations // *Phys. Rev. Lett.* – 1984. – Vol. 53, № 11. – P. 1069–1072.

Транслитерация

1. Vonsovskij S. V. *Magnetizm: monografiya*. – Moskva: Nauka, 1971. – 1032 s.
2. Ryazanov G. V. *Fenomenologicheskaya teoriya fazovyh perekhodov 2 roda* // *Zhurnal eksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki*. – 1968. – Т. 52. – S. 1688.
3. *Magnitnoe uporyadochenie i mekhanicheskie svoystva austenitnyh splavov sistemy Fe-Ni* / V. V. Sagaradze, E. N. Starchenko, V. G. Pushchin, Yu. E. Truhan // *Fizika metallov i metallovedenie*. – 1986. – Т. 62, №6. – S. 1144–1155.
4. Korshunov L. G., Sagaradze V. V., Starchenko E. N. *Vliyanie magnitnyh prevrashchenij na parametry treniya i iznashivaniya austenitnyh splavov* // *Fizika metallov i metallovedenie*. – 1984. – Т. 58, № 3. – S. 585–588.
5. Koscina I. A., Sagaradze V. V. *Izmenenie mekhanicheskikh svoystv i antiferromagnitnoe uporyadochenie margancevyh austenitnyh stalej pri nizkikh temperaturah* // *Fizika metallov i metallovedenie*. – 1989. – Т. 68, №4. – S. 818–825.
6. *Magnitnoob'yomnaya anomalija v splavah zhelezo-marganec s GCK resh'yotkoj* / O. A. Homenko, I. F. Hil'kevich, G. E. Zvinginceva, L. A. Vaganova // *Fizika metallov i metallovedenie*. – 1978. – Т. 45, №4. – S. 808–813.
7. Sadovskij V. D., Sagaradze V. V., Starchenko E. I. *Vliyanie magnitnogo uporyadocheniya na rabotu razvitiya treshchiny i plastichnost' austenitnyh splavov na Fe-Ni osnove* // *Fizika metallov i metallovedenie*. – 1984. – Т. 57, Vyp. 5. – S. 959–966.
8. Krumhansl J. A., Gooding R. J. *Structural phase transitions with little phonon softening and first-order character* // *Phys. Rev. B*. – 1989. – Vol. 39, № 5. – P. 3047–3056.
9. Belous I. A., Docenko V. A. *Vliyanie magnitnogo perekhoda na karakter martensitnyh prevrashchenij v splavah na Fe-Mn osnove* // *Territoriya novyh vozmozhnostej. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa*. – 2018. – Т. 11, № 3. – S. 152–165.

10. Docenko V. A., Belous I. A. Osobennosti izmeneniya prochnostnyh svojstv splavov na osnove zheleza v oblasti temperatur magnitnyh perekhodov // *Territoriya novyh vozmozhnostej. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa.* – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 124–136.
11. Структура и механические свойства зжезомарганцевых сплавов с ниобием / I. N. Bogachyov, G. E. Zviginceva, N. V. Zvigincev [i dr.] // *Fizika metallov i metallovedenie.* – 1977. – Т. 44, № 2. – С. 281.
12. Razumov I. K., Gornostyrev Yu. N., Kacnel'son M. I. K teorii fazovyh prevrashchenij v zheleze i stali na osnove pervoprincipnyh podhodov // *Fizika metallov i metallovedenie.* – 2017. – Т. 118, № 4. – С. 380–408.
13. Bodyakov V. Yu., Povzner A. A. Samosoglasovannaya termodinamicheskaya model' kristallicheskoj reshyotki tvyordogo tela // *GOU VPO UGTU – UPN.* – 2002. – Ch. 1. – С. 95.
14. Bodyakov V. Yu., Povzner A. A. Samosoglasovannaya termodinamicheskaya model' kristallicheskoj reshyotki tvyordogo tela // *GOU VPO UGTU – UPN.* – 2002. – Ch. 2. – С. 146.
15. Bodyakov V. Yu., Povzner A. A., Safonov I. V. Primenenie samosoglasovannoj termodinamicheskoy modeli tvyordogo tela dlya vydeleniya magnitnyh vkladov v fizicheskie svojstva magnetikov (na primere nikelya) // *Fizika metallov i metallovedenie.* – 2005. – Т. 100. – № 1. – С. 8–16.
16. Issledovanie fazovyh perekhodov v antiferromagnitnoj modeli Gejzenberga na ob"yomno-centrirovannoj kubicheskoj reshyotke metodom Monte-Karlo / A. K. Murtazaev, F. A. Kassam-Ogla, M. K. Ramazakov, K. Shch. Murtazaev // *Fizika metallov i metallovedenie.* – 2020. – Т. 121, № 4. – С. 946–351.
17. Bodyakov V. Yu. Primenenie samosoglasovannoj termodinamicheskoy modeli tvyordogo tela dlya vydeleniya magnitnyh vkladov v fizicheskie svojstva magnetikov (na primere nikelya) / V. Yu. Bodyakov, A. A. Povzner, I. V. Safonov // *Fizika metallov i metallovedenie.* – 2005. – Т. 100, № 1. – С. 8–16.
18. Barssh G. P., Krumhansl J. A. Twin Boundaries in Ferroelastic Media without Interface Dislocations // *Phys. Rev. Lett.* – 1984. – Vol. 53, № 11. – P. 1069–1072.

© В.А. Доценко, 2021

© И.А. Белоус, 2021

Для цитирования: Доценко В.А., Белоус И.А. Особенности поведения прочностных свойств сплавов железа в области температур магнитных переходов на основе феноменологической теории фазовых переходов // *Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса.* – 2021. – Т. 13, № 1. – С. 137–143.

For citation: Dotsenko V. A., Belous I. A. Features of the behavior of the strength properties of iron alloys in the temperature range of magnetic transitions based on the phenomenological theory of phase transitions, *The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*, 2021, Vol. 13, № 1, pp. 137–143.

DOI <https://doi.org/10.24866/VVSU/2073-3984/2021-1/137-143>

Дата поступления: 14.12.2020.