УДК 669.1; 537.6; 548.4 *Оригинальная статья*

Ферромагнитные нанокластеры в аустените: природа, роль, характеристики и возможность управления

В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачев
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»
344003, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
yuridol@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.122

Аннотация: В статье рассмотрена природа магнитных неоднородностей в аустените сталей и их фундаментальная роль в фазовых превращениях. Показано, что аустенит, будучи парамагнитной фазой, содержит спонтанно возникающие области ближнего ферромагнитного порядка (ферромагнитные нанокластеры), существование которых подтверждено экспериментально методами магнитной дифракции нейтронов. Зависимость магнитной восприимчивости аустенита описывается функцией Ланжевена для суперпарамагнетиков, что отражает флуктуационный характер этих магнитных неоднородностей, локализованных в областях нанометрового размера. Магнитное состояние исходной фазы критически определяет характер протекания γ→α превращения. С помощью компьютерного моделирования на основе модели Изинга исследовано влияние внешнего магнитного поля на характеристики нанокластеров в широком интервале температур. Установлено, что поле напряжённостью до 2,4 МА/м способно увеличивать средний размер кластеров (наиболее эффективно при низких температурах, где прибавка достигает 1,4 нм), на два порядка повышает их общее количество и увеличивает долю крупных кластеров, а также до 25% продлевает время их стабильного существования. Эксперименты по закалке в постоянном магнитном поле для ряда сталей показали существенное снижение объёмной доли остаточного аустенита, сопоставимое с обработкой холодом, и ускорение кинетики бейнитного превращения в 1,5-1,8 раза. Магнитное поле усиливает магнитную гетерогенность аустенита, активирует новые центры зарождения и стимулирует мультипликативный механизм образования α-фазы, что даёт практический инструмент для целенаправленного управления фазовым переходом при термической обработке сталей в магнитном поле.

Ключевые слова: аустенит, магнитное состояние, нанокластер, сталь, закалка, внешнее магнитное поле.

Пустовойт Виктор Николаевич – д.т.н., профессор кафедры материаловедение и технологии металлов, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»
Долгачев Юрий Вячиславович – д.т.н., профессор кафедры материаловедение и технологии металлов, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Original paper

Ferromagnetic nanoclusters in austenite: nature, role, characteristics, and controllability

V.N. Pustovoit, Yu.V. Dolgachev
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.122

Abstract: This article examines the nature of magnetic inhomogeneities in austenite steels and their fundamental role in phase transformations. It is shown that austenite, being a paramagnetic phase, contains spontaneously emerging regions of short-range ferromagnetic order (ferromagnetic nanoclusters), the existence of which has been confirmed experimentally using neutron magnetic diffraction methods. The dependence of the magnetic susceptibility of austenite is described by the Langevin function for superparamagnets, which reflects the fluctuation nature of these magnetic inhomogeneities localized in nanometer-sized regions. The magnetic state of the initial phase crucially determines the nature of the γ→α transformation. Using computer simulation based on the Ising model, the effect of an external magnetic field on the characteristics of nanoclusters over a wide temperature range was studied. It has been established that a magnetic field of up to 2,4 MA/m can increase the average cluster size, their total number by two orders of magnitude (most effectively at

© В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачев, 2026

low temperatures, where the increase reaches 1,4 nm), and increase the proportion of large clusters, as well as extend their stable existence by up to 25%. Experiments with quenching in a constant magnetic field for a range of steels demonstrated a significant reduction in the volume fraction of retained austenite, comparable to cold treatment, and an acceleration of the bainitic transformation kinetics by 1,5-1,8 times. The magnetic field enhances the magnetic heterogeneity of austenite, activates new nucleation centers, and stimulates the multiplicative mechanism of α-phase formation, providing a practical tool for targeted phase transition control during heat treatment of steels in a magnetic field.
Keywords: austenite, magnetic state, nanocluster, steel, hardening, external magnetic field.

Victor N. Pustovoit – Dr. Sc., Professor, Department of Materials Science and Metal Technologies, Don State Technical University, ORCID: 0000-0001-6999-3520
Yuri. V. Dolgachev – Dr. Sc., Professor, Department of Materials Science and Metal Technologies, Don State Technical University, ORCID: 0000-0002-8558-1136

Поступила в редакцию/received: 16.06.2026; после рецензирования/revised: 04.07.2026; принята/accepted: 09.07.2026.

1. Природа магнитных неоднородностей в аустените

Известно, что $\alpha - Fe$ становится ферромагнитным ниже точки Кюри $\theta_c = 1043$ К. Выше этой точки α-фаза парамагнитна и её магнитное поведение описывается законом Кюри-Вейса. Экспериментальные данные [1] показывают, что $\gamma - Fe$ парамагнитно и также подчиняется зависимости, однако с другим атомным магнитным моментом и температурой Кюри $\theta_p = 1101$ К. Различие между парамагнитной и ферромагнитной точками Кюри связано с частичным сохранением ближнего ферромагнитного порядка в направлениях атомных магнитных моментов при температурах выше θ_c [2-5]. Характер температурной зависимости магнитной восприимчивости свидетельствует о том, что ГЦК и ОЦК модификации железа имеют существенно различные магнитные свойства.

Исследования магнитного поведения ряда сталей [6-8] (в том числе и авторов статьи, см. рис. 1) показали, что зависимость магнитной восприимчивости для аустенита удовлетворительно описывается функцией Ланжевена для суперпарамагнетиков, что объясняется спонтанно возникающими флуктуациями ферромагнитного порядка, которые неоднородны относительно превалирующего магнитного состояния и локализованны в областях нанометрового размера. Они известны как спиновые «рои» [9] или ферромагнитные нанокластеры [6, 8].

В исследованиях [9, 10] с помощью явления магнитной дифракции нейтронов экспериментально доказано существование областей с упорядоченным расположением спинов выше температуры Кюри. Коллективное взаимодействие «роев» является ответственным за высокие значения магнитной восприимчивости. Рои занимают в кристалле достаточно большие области (см. рис. 2): при 750°С их размеры более 3 нм, а при наибольшей температуре измерений – 854°С ближний порядок существует на расстоянии 1 нм.

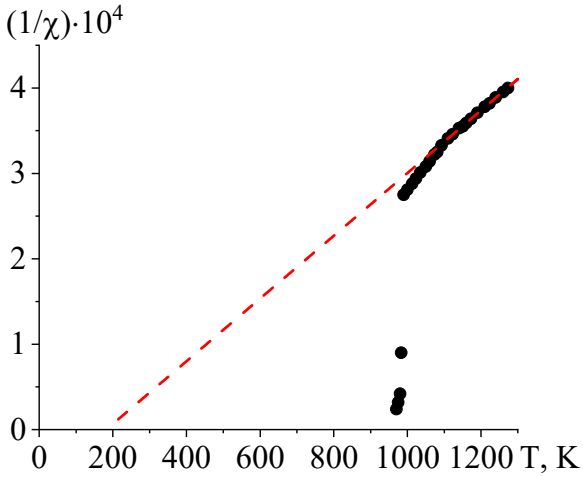

Рис. 1. Поведение обратной магнитной восприимчивости $1/\chi$ аустенита стали У8.

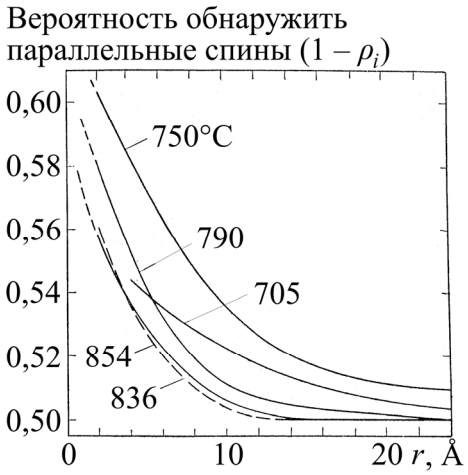

Рис. 2. Вероятность существования роёв спинов разного размера [10].

В работе [10] предлагается следующая последовательность: при высоких температурах рои спинов не коррелируют друг с другом (парамагнитное состояния); с понижением температуры приложение слабого внешнего магнитного поля может привести к антипараллельному упорядочению между роями спинов; при более сильных полях или более низких температурах рои вырастают в ферромагнитные домены.

По данным [11] в $\gamma - Fe$ при низких температурах атомы имеют магнитный момент 0,5 μ_B, но с ростом температуры он увеличивается до 2,8 μ_B. При высоких температурах локализованный атомный момент представляет собой среднюю величину, возникающую в результате термического возбуждения части атомов железа, что может быть причиной нарушения закона Кюри-Вейса [12].

Для чистого железа с ГЦК решеткой при низких температурах характерно проявление антиферромагнитной природы неоднородностей в парамагнитной матрице [13]. Однако при высоких температурах, где свой вклад вносит температурное возбуждение атомов и происходит увеличение периода решетки между атомами железа (чему также способствует наличие атомов внедрения), наблюдается усиление локального магнитного момента и начинают преобладать неоднородности ферромагнитной природы.

2. Связь магнитного состояния аустенита с фазовыми переходами

Кларенс Зинер первым указал [14-16], что требуется учёт магнетизма для адекватного анализа превращений в сталях. Его подход позволил оценить влияние легирующих элементов на магнитных порядок в сплаве и температуры фазового равновесия и мартенситного перехода. Магнитная

природа фазовых превращений в сталях обусловлена изменением относительной роли прямого и косвенного обменных взаимодействий: в ГЦК решетке прямое отрицательное обменное взаимодействие между соседними атомами железа увеличивает свободную энергию сплава, при переходе в ОЦК фазу уменьшается число ближайших атомных соседств (с 12 до 8), что обусловливает уменьшение магнитной части свободной энергии и является причиной мартенситного превращения.

По данным [17], если бы α-железо не являлось ферромагнетиком, то γ-фаза оставалась бы стабильной при любой температуре. Именно возникновение ферромагнитного порядка делает α-фазу стабильной в интервале от 0 до 1183 К. Верхняя граница этого температурного интервала несколько превосходит значение температуры Кюри (1043 К), что связано с частичным сохранением ближнего ферромагнитного порядка. Термодинамическое рассмотрение природы полиморфизма железа [11, 12] показало, что устойчивость какой-либо фазы зависит от её магнитных свойств, а колебания атомов кристаллической решетки не играют существенной роли.

В работах И.К. Разумова [18-20] показано, что температурно-зависимый магнитный порядок в аустените является превалирующим обстоятельством, определяющим пути фазовых превращений: возрастание ближнего магнитного порядка в аустените при понижении температуры, приводит к смене перлитного сценария превращения на мартенситный. Магнитная и решеточная степени свободы в $\gamma - Fe$ связаны настолько сильно, что увеличение степени магнитного порядка сопровождается спонтанными деформациями кристаллической решетки: ГЦК фаза, устойчивая в парамагнитном состоянии, становясь ферромагнитной начинает терять устойчивость по отношению к бейновским деформациям. Мартенситный сценарий (близкий к переходу 2-го рода) реализуется при переохлаждении ниже некоторой температуры, когда в аустените возникнет достаточно сильный ближний ферромагнитный порядок. Выше этой температуры реконструкция решетки требует преодоления энергетического барьера и реализуется фазовое превращения 1-го рода. Магнитных вклад в свободную энергию железа определяет безбарьерный характер ГЦК-ОЦК перехода.

Таким образом, существует связь между магнитным состоянием исходной фазы и процессами зарождения продуктов превращения. Она обусловлена вкладом ближнего магнитного порядка в изменение свободной энергии при $\gamma \to \alpha$ превращении, сильной зависимостью между магнитными и решеточными степенями свободы в γ-железе, близостью температуры $\gamma \to \alpha$ перехода к температуре Кюри α-железа и стабильностью при низких температурах ферромагнитного ОЦК железа.

3. Влияние внешнего магнитного поля на магнитное состояние аустенита

В связи с известными экспериментальными трудностями при высокотемпературных исследованиях магнитного состояния стали, необходимые данные о распределении ферромагнитных кластеров по размерам, количеству и времени жизни в зависимости от значений температуры и напряженности внешнего магнитного поля были получены с помощью компьютерного моделирования. Разработанная модель основана на принципах Изинга [21], которые применимы для описания коллективного магнитного поведения наночастиц [22], её отличительные особенности и исходные параметры описаны в работе [23], имеется свидетельство о регистрации программы ЭВМ [24].

Наличие внешнего магнитного поля противодействует температурному разупорядочиванию спинов. Размеры ферромагнитных кластеров присутствующих в аустените стали У8 (θ_c = 180 К, см. рис. 1 и [23]) при действии внешнего магнитного поля H = 2,4 МА/м и без поля для различных температур приведены на рис. 3. Размеры кластеров больше при наличии внешнего магнитного поля, причём. сильнее всего эффект проявляется при низких температурах. При комнатной температуре в поле средний диаметр прибавляет 1,4 нм. С повышением температуры эффективность поля заметно снижается: при M_H (500 К) прибавка 0,3 нм, выше 600 К ~ 0,14 нм. Анализ изменения максимального размера кластера дает похожую со средним размером картину, но с большей разницей в изменении размеров: «добавка» от наложения магнитного поля увеличивается примерно вдвое. Рост напряженности внешнего магнитного поля способствует увеличению среднего диаметра ферромагнитно-упорядоченных кластеров в γ-фазе (см. рис. 4).

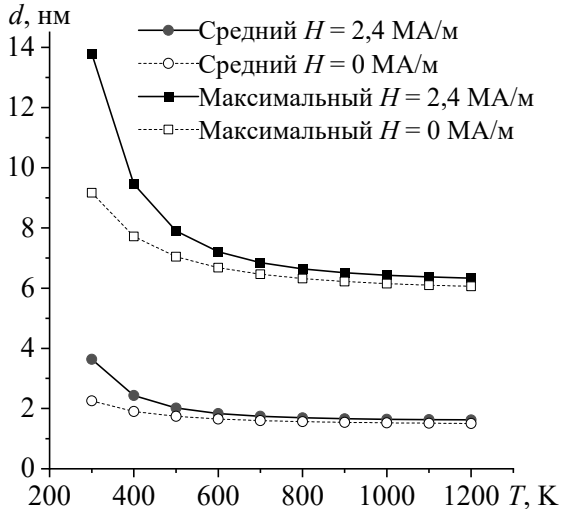

Рис. 3. Диаметры d при 2,4 МА/м – сплошная и без поля – штриховая линии.

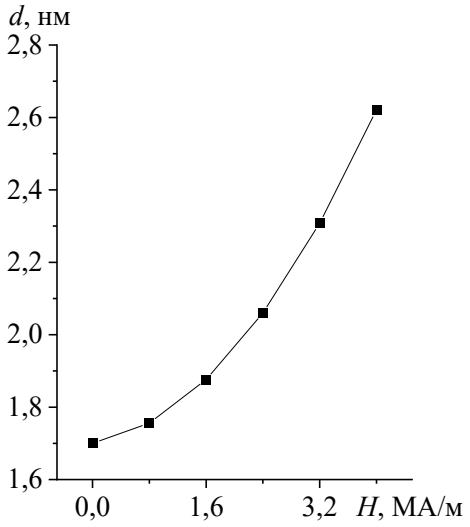

Рис. 4. Влияние напряженности поля H на средний диаметр d при M_H (500 К).

Наложение поля на два порядка увеличивает общее количество кластеров и заметно повышает долю крупных кластеров (>5 нм) (см. рис. 5). Эффект наиболее выражен при низких температурах: при комнатной температуре доля крупных кластеров возрастает на 7,2%, вблизи M_H — на 1,4%. На рис. 5 не показана зависимость общего количества кластеров без поля, т.к. она не видна в этих масштабах.

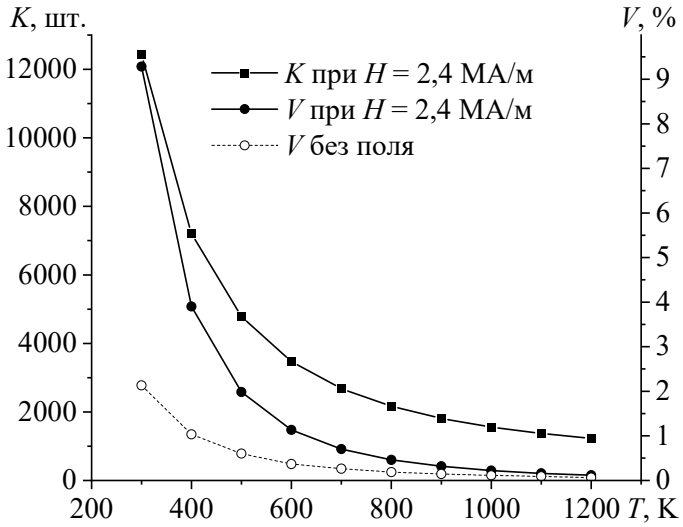

Рис. 5. Количество K и доля крупных V нанокластеров в условиях $H = 2{,}4$ МА/м.

При наличии поля кластеры становятся более устойчивы. Общей закономерностью является увеличение времени жизни с ростом размера кластера (см. рис. 6). Под временем жизни подразумевается количество итераций (шагов) модели, в течении которых ни один из атомов, составляющих кластер, не поменял направления своего спина. Увеличение напряженности магнитного поля приводит к повышению устойчивости кластеров всех размеров (см. рис. 7).

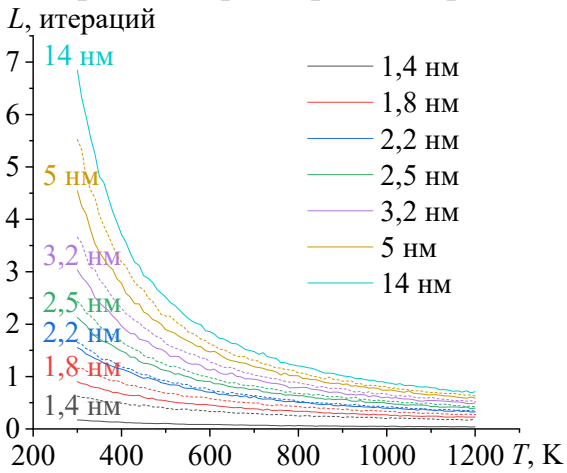

Рис. 6. Время жизни L кластеров разного диаметра: в магнитном поле 2,4 МА/м (сплошные) и без поля (штриховые линии)

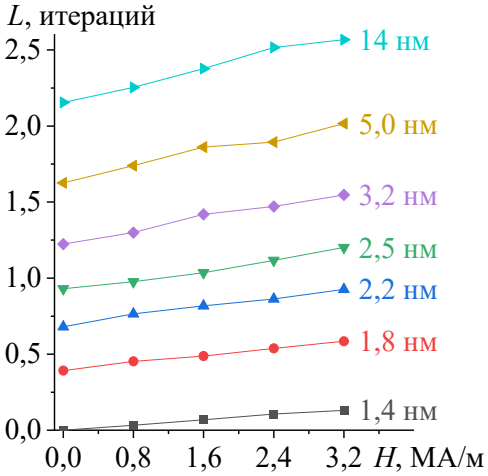

Рис. 7. Время жизни L кластеров в зависимости от напряженности магнитного поля H при M_H (500 К)

Результаты вычислительных экспериментов показывают, что ансамбли ферромагнитноупорядоченных кластеров возникают и аннигилируют в аустенитной парамагнитной матрице по статистическим законам. При этом в каждый момент времени существует некоторое равновесное количество таких кластеров определенного размера и известного времени жизни, что определяется температурой и напряженностью внешнего магнитного поля. При увеличении напряженности поля размеры, количество и время жизни ферромагнитных нанокластеров увеличиваются. Следовательно, при термообработке в магнитном поле увеличивается вероятность и число мест зарождения ферромагнитной фазы. Так, в поле 2,4 МА/м при охлаждении до точки M_H эвтектоидной стали наблюдается увеличение среднего диаметра ферромагнитной области на 3 Å, максимального на 8,6 Å, доля крупных кластеров возрастает на 1,4%, а их время жизни на 25%.

4. Экспериментальные результаты воздействия внешнего магнитного поля на ферромагнитные кластеры в аустените

Экспериментальные результаты показывают, что действие внешнего магнитного поля напряженностью до 2 МА/м в период фазового превращения позволяет достичь значительных изменений в микроструктуре [23]. Хотя оценка показывает недостаточность энергии такого поля (на 1-2 порядка) по сравнению с движущими силами большинства фазовых превращений, но при этом не учитывается, что действие магнитного поля заключается в усилении магнитной гетерогенности аустенита и через это в изменении условий протекании $\gamma \to \alpha$ перехода. Кроме того, исследования начальных стадий различных фазовых превращений [25-27] показали, что образование зародышей обусловлено магнитострикционными эффектами в ферромагнитных кластерах и взаимодействием границ ферромагнитных областей с дислокациями [28].

По данным Таблицы 1 видно, что закалка в постоянном магнитном поле 1,6 МА/м сопоставима с обработкой холодом. Уменьшение объёмной доли остаточного аустенита связано не столько с повышением точек M_H и M_K, сколько с влиянием поля на магнитную неоднородность аустенита и на процесс протекания мартенситного превращения. При приближении к точке M_H, в условиях действия магнитного поля, на ферромагнитных нанокластерах в аустените создаются условия для лавинообразного роста числа центров зарождения кристаллов α-фазы благодаря автокаталитическому эффекту при эстафетном запуске одних очагов зарождения за счет других (мультипликативное зарождение). Поле активирует области с магнитным порядком как центры возникновения

зародышей и в тоже время не исключает из «работы» другие микрообъемы матрицы, которые оказываются энергетически подготовленными для образования зародышей.

Таблица 1. Объёмная доля остаточного аустенита при различных режимах

Материал	Объёмная доля A_{res} (%), измеренная магнитным методом (доверит. интервал приведен для вероятности 0,95 при 15 измерениях)		
	После обычной полной закалки	После обработки холодом (сухой лед)	После магнитной закалки (1,6 МА/м)
У10	13±2	5±2	7±2
У12	16±2	8±2	9±2
ХВГ	29±3	10±2	13±2
Р6М5	29±3	11±2	17±2

Результаты, демонстрирующие усиление кинетики превращения под действием магнитного поля, представлены на рис. 8. Исследовалась степень развития бейнитного превращения в сталях 65Г и 45Х при различных временах изотермической выдержки в отсутствии поля и во внешнем магнитном поле 1,6 МА/м. Отношение объемной скорости превращения при обработке в поле к обработке без поля υ_H/υ_0 в самом начале бейнитной реакции для стали 65Г составляет 1,808, для стали 45Х – 1,687, что близко к теоретическим оценкам сделанным на основе полученных данных о размерах ферромагнитных кластеров [29].

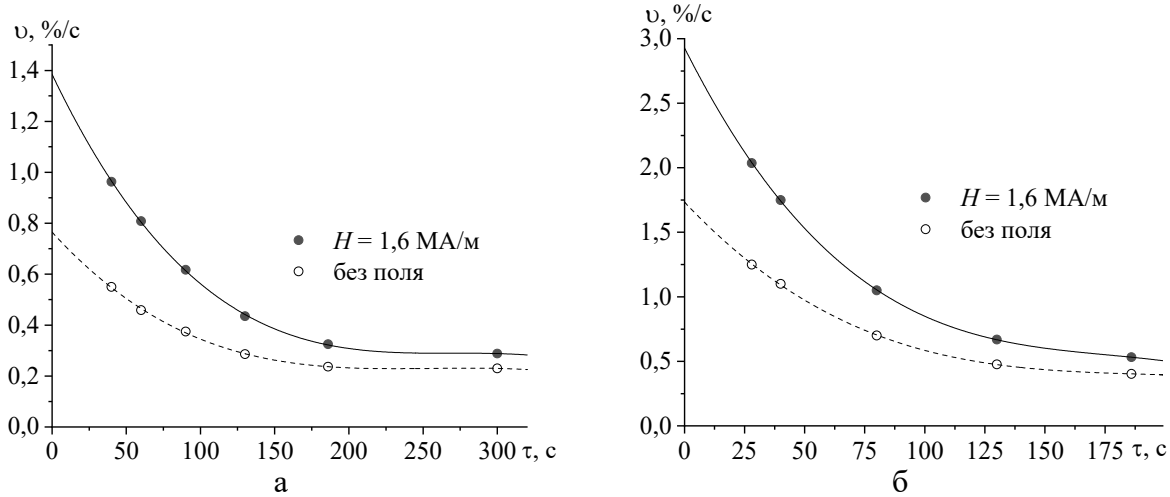

Рис. 8. Зависимость объемной скорости превращения υ от времени τ изотермической выдержки: а – сталь 65Г при температуре 375°С; б – сталь 45Х при температуре 320°С

Наблюдаемые в экспериментах изменения в кинетике при действии магнитного поля обусловлены повышением скорости возникновения зародышей. Влияние поля связано с усилением магнитной гетерогенности аустенита, флуктуации дальнего ферромагнитного порядка приводят к локальной анизотропной деформации атомной решетки, что снижает в этих микрообъемах энергию образования зародыша критического размера и обуславливает мультипликативный характер зарождения.

5. Заключение

Ферромагнитные нанокластеры в аустените оказывают влияние на протекание фазовых превращений в сталях. Внешнее магнитное поле увеличивает их размеры, количество и время жизни, усиливая магнитную гетерогенность аустенита и способствуя появлению дополнительных центров зарождения ферромагнитной фазы. Это приводит к ускорению кинетики превращений и интенсификации образования α-фазы. Полученные результаты открывают возможность целенаправленного управления структурообразованием при термической обработке сталей в магнитном поле.

Библиографический список:

1. **Sucksmith, W.** The paramagnetism of the ferromagnetic elements / W. Sucksmith, R.R. Pearce // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. – 1938. – V. 167. – I. 929. – P. 189-204. DOI: 10.1098/rspa.1938.0126.
2. **Вонсовский, С.В.** Ферромагнетизм как проблема упорядочения / С.В. Вонсовский // Известия АН СССР. Серия физическая. – 1947. – Т. 11. – Вып. 5. – С. 485-486.
3. **Brown, P.J.** Observations of ferromagnetic correlations at high temperatures in paramagnetic iron / P.J. Brown, H. Capellmann, J. Déportes et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1982. – V. 30. – I. 2. – P. 243-248. DOI: 10.1016/0304-8853(82)90204-9.
4. **Korenman, V.** Consequences of short range magnetic order above T_C in iron and nickel / V. Korenman // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1983. – V. 31-34. – Part 1. – P. 301-304. DOI: 10.1016/0304-8853(83)90258-5.
5. **Ignatenko, A.N.** Strong short-range magnetic order in a frustrated FCC lattice and its possible role in the iron structural transformation / A. N. Ignatenko, A. A. Katanin, V. Yu. Irkhin // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. – 2008. – V. 87. – I. 10. – P. 555-559. DOI: 10.1134/S0021364008100093.
6. **Voronchikhin, L.D.** Anomalous superparamagnetism of the gamma phase of Fe-Cr-Ni alloy / L.D. Voronchikhin, L.N. Romashev, I.G. Fakidov // Soviet Physics-Solid State. – 1975. – V. 16. – I. 9. – P. 1708-1711.
7. **Shull, C.G.** Magnetic electron configuration in iron / C.G. Shull, Y. Yamada // Journal of the Physical Society of Japan. – 1962. – V. 17. – Suppl. B-III. – P. 1-6.
8. **Снежной, Г.В.** Кластерный характер зарождения мартенсита с изотермической и атермической микрокинетиками / Г.В. Снежной, В.Л. Снежной, В.И. Меняйло // Литье и металлургия. – 2008. – № 4(49). – С. 63-66. DOI: 10.21122/1683-6065-2008-4-63-66.
9. **Spooner, S.** Spin correlations in iron / S. Spooner, B.L. Averbach // Physical Review. – 1966. – V. 142. – I. 2. – P. 291-299. DOI: 10.1103/PhysRev.142.291.
10. **Bozorth, R.M.** Magnetic properties of metals and alloys / R.M. Bozorth. – Cleveland: American Society for Metals, 1959. – vi, 349 p.
11. **Kaufman, L.** The lattice stability of metals – III. Iron / L. Kaufman, E.V. Clougherty, R.J. Weiss // Acta Metallurgica. – 1963. – V. 11. – I. 5. – P. 323-335. DOI: 10.1016/0001-6160(63)90157-3.
12. **Hasegawa, H.** Microscopic theory of the temperature-pressure phase diagram of iron / H. Hasegawa, D.G. Pettifor // Physical Review Letters. – 1983. – V. 50. – I. 2. – P. 130-133. DOI: 10.1103/PhysRevLett.50.130.
13. **Седов, В.Л.** Антиферромагнетизм гамма-железа: проблема инвара / В.Л. Седов. – М.: Наука, 1987. – 287 с.
14. **Zener, C.** Impact of magnetism upon metallurgy / C. Zener // Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. – 1955. – V. 7. – I. 5. – P. 619-630. DOI: 10.1007/BF03377550.
15. **Zener, C.** Interaction between the d shells in the transition metals / C. Zener // Physical Review. – 1951. – V. 81. – I. 3. – P. 440-444. DOI: 10.1103/PhysRev.81.440.
16. **Zener, C.** Exchange interactions / C. Zener, R.R. Heikes // Reviews of Modern Physics. – 1953. – V. 25. – I. 1. – P. 191-198. DOI: 10.1103/RevModPhys.25.191.2.
17. **Weiss, R.J.** Components of the thermodynamic functions of iron / R.J. Weiss, K.J. Tauer // Physical Review. – 1956. – V. 102. – I. 6. – P. 1490-1495. DOI: 10.1103/PhysRev.102.1490.

18. **Razumov, I.K.** Effect of magnetism on kinetics of γ-α transformation and pattern formation in iron / I.K. Razumov, Y.N. Gornostyrev, M.I. Katsnelson // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2013. – V. 25. – №. 13. – Art. № 135401. – 9 p. DOI: 10.1088/0953-8984/25/13/135401.
19. **Razumov, I.K.** Role of magnetic degrees of freedom in a scenario of phase transformations in steel / I.K. Razumov, D.V. Boukhvalov, M.V. Petrik et al. // Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics. – 2014. – V. 90. – I. 9. – P. 094101-1-094101-8. DOI: 10.1103/PhysRevB.90.094101.
20. **Razumov, I.K.** Towards the ab initio based theory of phase transformations in iron and steel / I.K. Razumov, Y.N. Gornostyrev, M.I. Katsnelson // Physics of Metals and Metallography – 2017. – V. 118. – I. 4. – P. 362-388. DOI: 10.1134/S0031918X16130032.
21. **Landau, L.D.** Statistical physics / L.D. Landau, E.M. Lifshitz. – Oxford: Elsevier, 2013. – 544 p.
22. **García-Hernández, L.A.** Magnetic properties of $CoFe_2O_4$ nanoparticles: experimental characterization and numerical analysis using the Ising model / L.A. García-Hernández, C.B. Guzmán-Hernández, G. Oza // Journal of Nanoparticle Research. – 2025. – V. 27. – I. 1. – Art. № 281. – 9 p. DOI: 10.1007/s11051-025-06476-y.
23. **Пустовойт, В.Н.** Магнитная гетерогенность аустенита и превращения в сталях / В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачев. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2021. – 198 с.
24. **Свидетельство № 2021665589 Российская Федерация.** Компьютерное моделирование магнитного состояния аустенита / Ю.В. Долгачев, В.Н. Пустовойт; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет». – № 2021664709; заявл. 21.09. 2021; опубл. 29.09.2021. – 1 с.
25. **Пустовойт, В.Н.** К вопросу о местах зарождения мартенсита / В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – № 23(150). – С. 110-114.
26. **Пустовойт, В.Н.** О природе мест зарождения мартенсита при закалке стали / В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. – Т. 62. – № 2. – С. 109-114. DOI 10.17073/0368-0797-2019-2-109-114.
27. **Dolgachev, Yu.V**. Stress martensite nucleation in a state of premartensitic lattice instability / Yu.V. Dolgachev, V.N. Pustovoit, Yu.M. Vernigorov // Advanced Engineering Research. – 2024. – V.24. – I. 1. – P. 58-65. DOI: 10.23947/2687-1653-2024-24-1-58-65.
28. **Pustovoit, V.N.** Interaction of ferromagnetically ordered clusters with dislocations in austenite and twinning / V.N. Pustovoit, Y.V. Dolgachev // Materials Science Forum. – 2022. – V. 1052. – P. 134-139. DOI: 10.4028/p-a8jty9.
29. **Dolgachev, Yu.V.** Stimulation of the bainite transformation scenario by an external magnetic field / Yu.V. Dolgachev, V.N. Pustovoit, D.V. Nefedov // Safety of Technogenic and Natural Systems. – 2024. – V. 8. – № 1. – P. 88-96. DOI: 10.23947/2541-9129-2024-8-1-88-96.

References:

1. Sucksmith W., Pearce R.R. The paramagnetism of the ferromagnetic elements, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1938, vol. 167, isuue 929, pp. 189-204. DOI: 10.1098/rspa.1938.0126.
2. Vonsovsky S.V. Ferromagnetizm kak problema uporyadocheniya [Ferromagnetism as a problem of ordering], *Izvestiya AN SSSR, Seriya Fizicheskaya [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Physical Series]*, 1947, vol. 11, issue 5, pp. 485-486. (In Russian).
3. Brown P.J., Capellmann H., Déportes J. et al. Observations of ferromagnetic correlations at high temperatures in paramagnetic iron, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1982, vol. 30, issue 2. pp. 243-248. DOI: 10.1016/0304-8853(82)90204-9.
4. Korenman V. Consequences of short range magnetic order above T_C in iron and nickel, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1983, vol. 31-34, part 1, pp. 301-304. DOI: 10.1016/0304-8853(83)90258-5.
5. Ignatenko A.N., Katanin A.A., Irkhin V.Yu. Strong short-range magnetic order in a frustrated FCC lattice and its possible role in the iron structural transformation, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 2008, vol. 87, issue 10, pp. 555-559. DOI: 10.1134/S0021364008100093.
6. Voronchikhin L.D., Romashev L.N., Fakidov I.G. Anomalous superparamagnetism of the gamma phase of Fe-Cr-Ni alloy, *Soviet Physics-Solid State*, 1975, vol. 16, issue 9. pp. 1708-1711.
7. Shull C.G., Yamada Y. Magnetic electron configuration in iron, *Journal of the Physical Society of Japan*, 1962, vol. 17, supplement B-III, pp. 1-6.
8. Snezhnoj G.V., Snezhnoj V.L., Menyajlo V.I. Klasternyi kharakter zarozhdeniya martensita s izotermicheskoi i atermicheskoi mikrovkinetikami [Clustered character of martensite nucleation with isothermic and athermic microkinetics], *Lit'e i metallurgiya [Foundry production and metallurgy]*, 2008, no. 4(49), pp. 63-66. DOI:

10.21122/1683-6065-2008-4-63-66. (In Russian).
9. Spooner S., Averbach B.L. Spin correlations in iron, *Physical Review*, 1966, vol. 142, issue 2. pp. 291-299. DOI: 10.1103/PhysRev.142.291.
10. Bozorth R.M. *Magnetic properties of metals and alloys*. Cleveland, American Society for Metals, 1959, vi, 349 p.
11. Kaufman L., Clougherty E.V., Weiss R.J. The lattice stability of metals – III. Iron, *Acta Metallurgica*, 1963, vol. 11, issue 5, pp. 323-335. DOI: 10.1016/0001-6160(63)90157-3.
12. Hasegawa H., Pettifor D.G. Microscopic theory of the temperature-pressure phase diagram of iron, *Physical Review Letters*, 1983, vol. 50, issue 2. pp. 130-133. DOI: 10.1103/PhysRevLett.50.130.
13. Sedov V.L. *Antiferromagnetizm gamma-zheleza: problema invara* [Antiferromagnetism of gamma-phase iron: invar problem]. Moskva, Nauka Publ., 1987, 287 p. (In Russian).
14. Zener C. Impact of magnetism upon metallurgy, *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 1955, vol. 7, issue 5. pp. 619-630. DOI: 10.1007/BF03377550.
15. Zener C. Interaction between the d shells in the transition metals, *Physical Review*, 1951, vol. 81, issue 3, pp. 440-444. DOI: 10.1103/PhysRev.81.440.
16. Zener C., Heikes R.R. Exchange interactions, Reviews of Modern Physics, 1953, vol. 25, issue 1, pp. 191-198. DOI: 10.1103/RevModPhys.25.191.2.
17. Weiss R.J., Tauer K.J. Components of the thermodynamic functions of iron, *Physical Review*, 1956, vol. 102, issue 6. pp. 1490-1495. DOI: 10.1103/PhysRev.102.1490.
18. Razumov I.K., Gornostyrev Y.N., Katsnelson M.I. Effect of magnetism on kinetics of γ-α transformation and pattern formation in iron, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2013, vol. 25, no. 13, art. no 135401, 9 p. DOI: 10.1088/0953-8984/25/13/135401.
19. Razumov I.K., Boukhvalov D.V., Petrik M.V. et al. Role of magnetic degrees of freedom in a scenario of phase transformations in steel, *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*, 2014, vol. 90, issue9, pp. 094101-1-094101-8. DOI: 10.1103/PhysRevB.90.094101.
20. Razumov I.K., Gornostyrev Y.N., Katsnelson M.I Towards the ab initio based theory of phase transformations in iron and steel, *Physics of Metals and Metallography*, 2017, vol. 118, issue 4, pp. 362-388. DOI: 10.1134/S0031918X16130032.
21. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Statistical Physics*. Oxford: Elsevier, 2013, 544 p.
22. García-Hernández L.A., Guzmán-Hernández C.B., Oza G. Magnetic properties of $CoFe_2O_4$ nanoparticles: experimental characterization and numerical analysis using the Ising model, *Journal of Nanoparticle Research*, 2025, vol. 27, issue 1, art. no 281, 9 p. DOI: 10.1007/s11051-025-06476-y.
23. Pustovoit V.N., Dolgachev Yu.V. *Magnitnaya geterogennost' austenita i prevrashcheniya v stalyakh* [Magnetic heterogeneity of austenite and transformations in steels]. Rostov-on-Don, Don State Technical University Publ., 2021, 198 p. (In Russian).
24. Dolgachev Yu.V., Pustovoit V.N. Komp'yuternoe modelirovanie magnitnogo sostoyaniya austenita [Computer simulation of the magnetic state of austenite]. Certificate RF, no. 2021664709, 2021. (In Russian).
25. Pustovoit V.N., Dolgachev Yu.V. K voprosu o mestakh zarozhdeniya martensita [On the issue of the places of origin of martensite], *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Volgograd State Technical University],* 2014, no. 23 (150), pp. 110-114. (In Russian).
26. Pustovoit V.N., Dolgachev Yu.V. O prirode mest zarozhdeniya martensita pri zakalke stali [Revisiting the nature of sites of martensite nucleation during steel hardening], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous Metallurgy],* 2019, vol. 62, no. 2, pp. 109-114. DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-109-114. (In Russian).
27. Dolgachev Yu.V., Pustovoit V.N., Vernigorov Yu.M. Stress martensite nucleation in a state of premartensitic lattice instability, *Advanced Engineering Research*, 2024, vol. 24, issue 1, pp. 58-65. DOI: 10.23947/2687-1653-2024-24-1-58-65.
28. Pustovoit V.N., Dolgachev Yu.V. Interaction of ferromagnetically ordered clusters with dislocations in austenite and twinning, *Materials Science Forum*, 2022, vol. 1052, pp. 134-139. DOI: 10.4028/p-a8jty9.
29. Dolgachev Yu.V., Pustovoit V.N., Nefedov D.V. Stimulation of the bainite transformation scenario by an external magnetic field, *Safety of Technogenic and Natural Systems*, 2024, vol. 1, no. 11, pp. 88-96. DOI: 10.23947/2541-9129-2024-8-1-88-96.