

Влияние магнитоимпульсной обработки на магнитные свойства аморфной электротехнической стали

М. Н. Шипко, А. И. Тихонов, М. А. Степович, В. В. Коровушкин, Е. С. Савченко, И. А. Корнев

Изучено влияние магнитоимпульсной обработки на магнитные свойства аморфной электротехнической стали. Установлено, что в результате магнитоимпульсной обработки стали изменяются её магнитные характеристики: увеличиваются удельная намагниченность насыщения, остаточная намагниченность и коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса. Такие изменения связываются с направленным упорядочением атомов в материале и уменьшением уровня его аморфизации. Координационные ассоциаты, формируемые атомами Si, B, Fe, аналогичны тем, которые свойственны кристаллическим фазам $Fe_3(BSi)$ и реализуются при нагреве быстро охлаждённой стали. Предполагается, что механизм наблюдаемых процессов связан с упорядочением магнитной спин-системы стали под влиянием импульсного магнитного поля.

Ключевые слова: магнитоимпульсная обработка, аморфная сталь, упорядочение, магнитные свойства, анизотропия.

Введение

Микрокристаллические и аморфные магнитомягкие сплавы и стали на основе системы Fe-B-Si находят широкое применение в качестве материалов для сердечников, трансформаторов, генераторов, реле магнитных усилителей и других электротехнических устройств. Поэтому повышение эксплуатационных характеристик этих устройств является актуальной задачей.

Магнитные свойства магнитомягких аморфных материалов во многом определяются их локальной магнитной анизотропией. Для ее снижения используют различного рода отжиги, в том

числе и нагрев в магнитном поле [1, 2]. Это связано с тем, что нагрев в магнитном поле способствует уменьшению магнитоупругой анизотропии и анизотропии упорядоченных пар. Вместе с тем эксперименты показывают, что под влиянием магнитного поля при повышенных температурах формируются сверхструктуры с более высокими значениями коэрцитивной силы и с более низкими значениями магнитной проницаемости.

Однако существуют магнитомягкие аморфные материалы, в которых имеется возможность упорядочения атомов, уменьшающих магнитоупругую анизотропию под влиянием магнитного поля при температурах, близких к комнатной. Так, в работах [3–8] были изучены механизмы процессов упорядочения атомов и дефектов в супердисперсных частицах магнетита, поликристаллах и монокристаллах сложного состава при воздействии импульсов слабого магнитного поля. Механизм явления связывается с инициированием процессов самоорганизации в неупорядоченных системах, обусловленных эффектами снятия спиновых запретов под влиянием слабых магнитных полей. Парадоксальные с точки зрения равновесной термодинамики магнитно-спиновые эффекты в химии, кристаллофизике, молекулярной физике получили свое теоретическое обоснование на квантовом уровне [4, 9]. Влияние импульсного магнитного поля выявлено также при изучении процессов диффузии атомов Al в ферромагнитной матрице Fe [10], а дальнейшее развитие и использование такие подходы получили при объяснении

Шипко Михаил Николаевич¹, профессор, д.т.н.
Тихонов Андрей Ильич¹, зав. кафедрой, д.т.н.
Степович Михаил Адольфович², профессор, д.ф.-м.н.
Коровушкин Владимир Васильевич³, профессор, д.г.-м.н.
Савченко Елена Сергеевна³, вед. инженер, к.т.н.
Корнев Илья Александрович¹, ассистент.

¹ Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина.

Россия, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

² Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского.

Россия, 248023, г. Калуга, ул. Степана Разина, 26.

E-mail: m.stepovich@rambler.ru

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Россия, 119049, Москва, Ленинский проспект, 4.

Статья поступила в редакцию 30 марта 2018 г.

© Шипко М. Н., Тихонов А. И., Степович М. А.,
Коровушкин В. В., Савченко Е. С., Корнев И. А., 2018

магнитоэластического эффекта, при описании эффектов изменения анизотропии эпитаксиальных магнитных пленок, композиционных материалов, ферритов [11].

Учитывая, тот факт, что наблюдаемые эффекты связаны с изменением ближнего порядка атомов, при магнитоимпульсной обработке следует ожидать существенного изменения магнитных свойств аморфных материалов. Некоторые результаты исследований структуры и свойств фольги аморфной электротехнической стали, в т. ч. особенностей локализации атомов железа в ней и ее свойств до и после МИО, изложены ранее в [12]. Настоящая работа продолжает такие исследования.

Целью данной работы является изучение влияния магнитоимпульсной обработки (МИО) на магнитные свойства аморфной электротехнической стали.

Методика эксперимента

Магнитные параметры: удельную намагниченность насыщения, коэрцитивную силу, остаточную намагниченность, форму и площадь петли магнитного гистерезиса – измеряли по стандарт-

ной методике на вибрационном магнитометре VSM 250 в магнитном поле напряженностью 20 кЭ при комнатной температуре. Мёссбауэровские исследования выполнены при комнатной температуре на гамма-резонансном спектрометре MS-1104 EM с обработкой спектров по программе Univem MS. Образцы аморфной стали, содержащие железо, бор, углерод, кремний, диспрозий, были изготовлены методом спиннингования. Скорость вращения медного диска составляла 45–50 м/с, в результате были получены образцы фольги толщиной 10 мкм, которые подвергали МИО. Обработку осуществляли в импульсном магнитном поле с напряженностью 8–10 кА/м с длительностью импульса 0,1–1 с и интервалом между импульсами 1–2 с [13, 14].

Результаты эксперимента и их обсуждение

Петли магнитного гистерезиса исследуемой фольги до и после магнитоимпульсной обработки приведены на рис. 1. Соответствующие магнитные параметры аморфной стали до и после МИО фольги различным числом импульсов магнитного поля – в табл. 1.

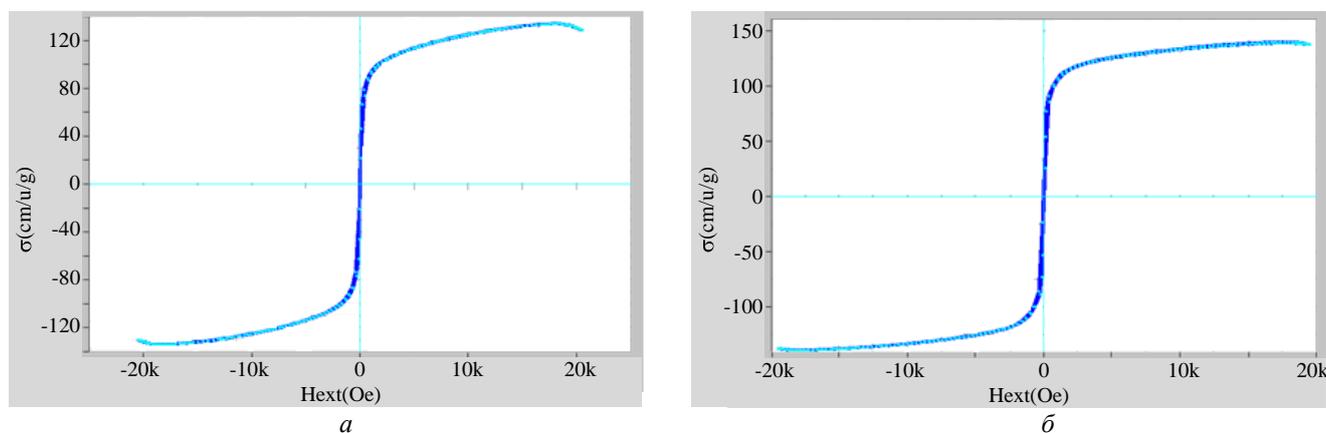


Рис. 1. Петли магнитного гистерезиса аморфной электротехнической стали до (а) и после (б) МИО 50 импульсами.

Таблица 1

Результаты исследования магнитных характеристик образцов аморфной электротехнической стали до (0 импульсов) и после её магнитоимпульсной обработки

Число импульсов	Удельная намагниченность насыщения σ_s , $A \times m^2 / kg$	Остаточная намагниченность σ_r , $A \times m^2 / kg$	Коэрцитивная сила H_c , кА/м	Площадь петли, $A \times m^2 / kg$	Отношение остаточной намагниченности к намагниченности насыщения σ_r / σ_s
0	130	10,60	2,3	1,3	0,079
10	134	10,62	2,3	1,3	0,079
20	168	16,77	2,5	1,3	0,1
30	154	11,02	2,8	1,7	0,072
50	140	12,76	2,3	2,2	0,091

Из рис. 1 видно, что параметры петли магнитного гистерезиса после магнитоимпульсной обработки изменяются. Наиболее отчётливо это прослеживается из данных табл. 1 на значениях удельной намагниченности насыщения σ_s , коэффициента прямоугольности σ_r/σ_s и площади петли магнитного гистерезиса. Максимальное увеличение удельной намагниченности σ_s (на 30 %), остаточной намагниченности σ_r (на 58 %) наблюдается после воздействия 20 импульсами.

После МИО регистрируются и фиксируются наиболее высокие значения коэффициента прямоугольности петли магнитного гистерезиса. При этом её площадь и коэрцитивная сила практически не изменяются. Учитывая, что коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса может увеличиться за счёт изменения ориентации векторов спонтанной намагниченности микрообъёмов аморфного материала, можно предположить возможность изменения анизотропии фольги при её МИО. Такое предположение отвечает росту величины коэрцитивной силы H_c , вклад в которую вносит магнитоупругая анизотропия и анизотропия упорядоченных пар. Такие изменения могут быть связаны с изменением ближнего порядка в расположении магнитоактивных атомов, что отвечает результатам мёссбауэровских исследований образцов, выполненных при температурах 300 К и 87 К.

Мёссбауэровские спектры аморфной электротехнической фольги в исходном состоянии и

после МИО, полученные при комнатной температуре, показаны на рис. 2, а параметры мёссбауэровских спектров стали до и после её МИО – в табл. 2.

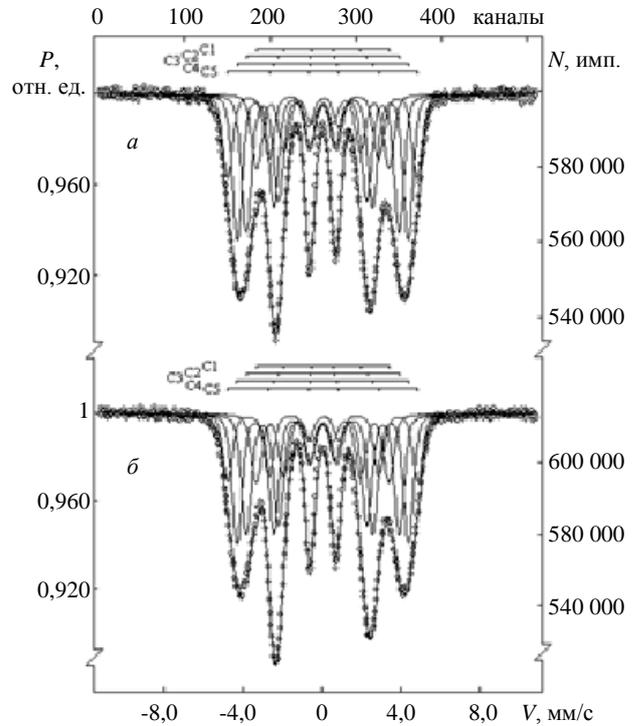


Рис. 2. Мёссбауэровские спектры аморфной стальной фольги до и после МИО: а – спектр до МИО; б – спектр после МИО с числом импульсов магнитного поля, равном 20.

Таблица 2

Параметры мёссбауэровских спектров аморфной электротехнической стали до (0 импульсов) и после её магнитоимпульсной обработки

Число импульсов	Компонента спектра	Изомерный сдвиг δ , мм/с	Квадрупольное расщепление Δ , мм/с	Магнитные поля на ядрах H_d , кЭ	Площади компонент, % отн.	Величина резонансного эффекта, %	Угол Θ , градусы
0	C1	0,05	0,03	207	17,1	10,9	57,1
	C2	0,06	0,00	239	31,0		
	C3	0,08	-0,03	268	32,4		
	C4	0,09	-0,06	298	19,5		
10	C1	0,05	0,02	208	18,1	10,7	59,2
	C2	0,07	0,00	240	31,9		
	C3	0,08	-0,03	269	33,5		
	C4	0,08	-0,06	299	16,5		
20	C1	0,04	0,02	208	18,1	11,4	62,5
	C2	0,06	0,00	240	31,2		
	C3	0,08	-0,03	269	33,5		
	C4	0,09	-0,05	298	17,2		
30	C1	0,05	0,02	205	15,0	11,3	61,3
	C2	0,06	0,00	236	29,7		
	C3	0,08	-0,02	265	34,2		
	C4	0,08	-0,06	296	21,1		
50	C1	0,04	0,01	206	16,8	11,4	62,4
	C2	0,06	0,00	239	32,4		
	C3	0,08	-0,03	269	32,7		
	C4	0,08	-0,06	298	18,1		

Спектры обработаны с использованием простейшей модели с применением четырех систем сверхтонкой структуры ($C_1 \div C_4$), соответствующих атомам железа с различным количеством ферромагнитных атомов Fe в ближайшем окружении.

При анализе причин, вызывающих изменение сверхтонкой структуры спектров стали после МИО, была использована модель, которая учитывает зависимость локального магнитного поля H_L на ядрах атомов Fe от числа атомов Fe, расположенных в первой координационной сфере. Правомерность этой модели следует из имеющихся литературных данных о концентрационной зависимости сверхтонких полей на ядрах для серии бинарных сплавов Fe–Si, Fe–Al, Fe–B [15–18]. При условии, что замещение одного атома Fe в ближайшем окружении ядер атомов Fe⁵⁷ атомами Si, B приводит к одинаковому уменьшению величины H_L , легко определить координацию атомов Fe в стали после её МИО. В свою очередь, такая координация свойственна различным модификациям боридных фаз при формировании нанокристаллических материалов [19]. В частности, секстиплет C_1 можно связать с атомами Fe, имеющими в ближайшем окружении 4 атома железа. Наличие атомов Fe, имеющих такое окружение, обусловлено присутствием в их ближайшем окружении атомов Si, B или вакантных мест. Секстиплет C_2 в соответствии со значениями H_L может быть обусловлен атомами железа, имеющими в ближайшем окружении только 5 атомов Fe. Секстиплеты C_3 и C_4 связаны с атомами железа, имеющими в их ближайшем окружении 7 и 8 атомов Fe соответственно.

В процессе МИО наблюдается изменение интегральной интенсивности секстиплетов, указывающей на изменение заселённости позиций, а следовательно и изменения позиционного порядка в расположении атомов Fe.

Наиболее сильные изменения интенсивности наблюдаются для секстиплетов C_4 (с 19,5 % до 16,5 %) и C_1 (с 15 % до 18,1 %). Указанные изменения могут быть связаны с уменьшением количества атомов Fe, имеющих в ближайшем окружении 8 атомов Fe, и увеличением количества атомов Fe, имеющих в их окружении 4 атома Fe. Такой процесс указывает на перераспределение атомов Si, B или вакантных мест вблизи атомов Fe. Мёссбауэровские спектры аморфной стали, измеренные при температуре 87К, позволили установить, что наиболее заметное повышение интегральной интенсивности в процессе МИО наблюдается для секстиплета, соответствующего ядрам атомов Fe, имеющих в их ближайшем окружении 5 и 7 атомов Fe. Это свидетельствует о преимущественной локализации вакантных мест вблизи атомов с такой координацией. Изменение пози-

ционного порядка в расположении атомов железа при МИО сопровождается увеличением угла Θ между направлением магнитных моментов локальных областей материала и направлением гамма-лучей. Это отчётливо прослеживается на изменении соотношения интенсивности линий в секстиплетах $I_{1,6} : I_{2,5} : I_{3,4}$. Из экспериментальных данных мёссбауэровских исследований следует, что для всех спектров отношение интенсивностей линий секстиплета отклоняется от 3 : 2 : 1, свойственного изотропным материалам. Такое отклонение указывает на наличие магнитной текстуры в образце стали, степень которой повышается с 5 % (исходное состояние) до 20 % после МИО.

Из табл. 2 видно, что наибольшее значение угла Θ характерно для образцов стали после воздействия на неё 20 импульсами магнитного поля, это отвечает и наиболее высоким значениям степени магнитной текстуры. Процесс повышения степени текстурирования, связанный с упорядочением атомов, коррелирует с увеличением вероятности эффекта Мёссбауэра. Тот факт, что наибольшее значение величины эффекта МИО наблюдается после воздействия 20 магнитными импульсами, является убедительным аргументом в пользу изменения позиционного порядка в расположении магнитоактивных атомов, так как обменное взаимодействие между ними отражается на колебательных спектрах атомов. Поэтому увеличение эффекта указывает на повышение степени упорядочения магнитной спин-системы [20]. Более того, всё это указывает на возможность формирования аморфно-нанокристаллической структуры под влиянием импульсного магнитного поля. Следовательно, под действием импульсов магнитного поля происходит повышение степени порядка в расположении атомов в материале и уменьшение уровня его аморфизации. Именно формирование упорядоченного расположения атомов является причиной повышения удельной намагничённости образцов стали после её МИО. С другой стороны, направленное упорядочение атомов Fe обеспечивает повышение анизотропии микрообъёмов аморфной стали, что способствует росту коэффициента прямоугольности и снижению степени её магнитного разупорядочения. Отметим при этом, что координационные ассоциаты, формируемые атомами Si, B и Fe, аналогичны тем, которые свойственны кристаллическим фазам $Fe_3(BSi)$ и $Fe_2(BSi)$ и легко реализуются при нагреве аморфной стали и её кристаллизации.

Заключение

В работе изучено влияние магнитоимпульсной обработки на магнитные свойства аморфной

электротехнической стали. Установлено, что магнитоимпульсная обработка аморфизированной электротехнической стали способствует увеличению её удельной намагниченности насыщения, остаточной намагниченности и коэффициента прямоугольности петли магнитного гистерезиса. Такие изменения связаны с повышением степени порядка в расположении атомов в материале и уменьшении уровня его аморфизации. Координационные ассоциаты, формируемые атомами Si, В, Fe, аналогичны тем, которые свойственны кристаллическим фазам Fe₃(BSi) и реализуются при нагреве быстроохлаждённой стали. Предполагается, что механизм наблюдаемых процессов связан с упорядочением магнитной спин-системы стали под влиянием импульсного магнитного поля.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Ивановской области (проект № 18-43-370012) и гранта РФФИ и правительства Калужской области (проект № 18-41-400001).

ЛИТЕРАТУРА

1. Глезер А. М. // Российский химический журнал. 2002. Т. XLVI. № 5. С. 57.
2. Суздаев И. П., Максимов Ю. В., Имишеник В. К., Новичихин С. В., Матвеев В. В., Третьяков Ю. Д., Лукашин А. В. // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1. № 1-2. С. 134.
3. Глезер А. М., Молотилов Б. В. Структура и механические свойства аморфных сплавов. – М.: Металлургия, 1992.
4. Альшиц В. И., Даринская Е. В., Колдаева М. В., Петржик Е. А. // Кристаллография. 2003. Т. 48. № 5. С. 826.
5. Вирюс А. А., Каминская Т. П., Шипко М. Н., Степович М. А. // Физика и химия обработки материалов. 2013. № 2. С. 71.
6. Комишина А. В., Помельникова А. С., Шипко М. Н., Коровушкин В. В. // Технология металлов. 2014. № 1. С. 15.
7. Каминская Т. П., Коровушкин В. В., Попов В. В., Шипко М. Н., Степович М. А. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 12. С. 26.
8. Shipko M. N., Kostishyn V. G., Korovushkin V. V., Isaev I. M., Stepovich M. A., Tikhonov A. I., Savchenko E. S. // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2016. Vol. 8. No. 3. P. 03004.
9. Зельдович Я. Б., Бучаченко А. Л., Франкевич Е. Л. // Успехи физических наук. 1988. Т. 155. № 5. С. 3.
10. Вершаковская М. А., Петров Н. В., Покоев А. В. // Вестник Черкасского национального университета. Физ.-мат. науки. 2007. Вып. 17. С. 86.
11. Коровушкин В. В., Костишин В. Г., Степович М. А., Шипко М. Н. // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80. № 12. С. 1643.
12. Вирюс А. А., Каминская Т. П., Степович М. А., Коровушкин В. В., Шипко М. Н., Тихонов А. И., Попов В. В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 10. С. 52.
13. Староверов Б. А., Степович М. А., Шипко М. Н. // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011. № 8. С. 1.
14. Шипко М. Н., Степович М. А., Староверов Б. А., Костюк В. Х. // Промышленные АСУ и контроллеры. 2012. № 1. С. 2.
15. Oki K., Yamamura A., Kudo K., Eguchi T. // Trans. Jap. Inst. of Metals. 1979. Vol. 20. No. 8. P. 451.
16. Granshaw T. // Physica. 1977. Vol. 86-88B. P. 391.
17. Химические применения мёсбауэровской спектроскопии / под ред. Гольданского В. И. и Гербера Р. – М.: Мир, 1970.
18. Иверонова В. И., Кацнельсон А. А. Ближний порядок в твердых растворах. – М.: Наука, 1977.
19. Fan C. J., Song X. P., Quan M. X., Hu Z. K. // Nanostructured Materials. 1995. Vol. 5. P. 433.
20. Поздняков В. А., Глезер А. М. // Физика твердого тела. 2002. Т. 44. № 4. С. 705.

PACS: 75.50.Kj;75.50.Bb;81.40.Rs

Influence of magnetoimpulse treatment on the magnetic properties of amorphous electrical steel

M. N. Shipko¹, A. I. Tikhonov¹, M. A. Stepovich², V. V. Korovushkin³, E. S. Savchenko³, and I. A. Kornev¹

¹ Lenin Ivanovo State Power Engineering University
34 Rabfakovskaya str., Ivanovo, 153003, Russia

² Tsiolkovsky Kaluga State University
26 Stepan Razin str., Kaluga, 248023, Russia
E-mail: m.stepovich@rambler.ru

³ National University of Science and Technology “MISiS”
4 Leninsky prospect, Moscow, 119049, Russia

Received March 30, 2018

Consideration is given to influence of magnetoimpulse treatment on the magnetic properties of amorphous electrical steel. It is established that as a result of magnetoimpulse treatment of steel its magnetic characteristics change: the specific saturation magnetization, residual magnetization and the rectangularity coefficient of the magnetic hysteresis loop increase. Such changes are associated with a directed ordering of atoms in the material and a decrease in the level of its amorphization. The coordination associates formed by the Si, B, and Fe atoms are similar to those characteristic of the crystalline Fe₃ (BSi) phases and are realized upon heating of rapidly cooled steel. It is assumed that the mechanism of the observed processes is associated with the ordering of the magnetic spin system of steel under the influence of a pulsed magnetic field.

Keywords: magnetoimpulse treatment, amorphous steel, ordering, magnetic properties, anisotropy.

REFERENCES

1. A. M. Glezer, Rossiisky Khimichesky Zhurnal **XLVI**, 57 (2002).
2. I. P. Suzdalev, Yu. V. Maksimov, V. K. Imshenik, S. V. Novichikhin, V. V. Matveev, Yu. D. Tretyakov, and A. V. Lukashin, Rossiiskie Nanotekhnologii **1**, 134 (2006).
3. A. M. Glezer and B. V. Molotilov, *Structure and mechanical properties of amorphous alloys* (Metallurgy, Moscow, 1992) [in Russian].
4. A. V. Komshina, A. S. Pomelnikova, M. N. Shipko, and V. V. Korovushkin, Technology of Metals, No. 1, 15 (2014).
5. T. P. Kaminskaya, V. V. Korovushkin, V. V. Popov, M. N. Shipko, and M. A. Stepovich, J. Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques **8**, 1235 (2014).
6. V. I. Alshits, E. V. Darinskaya, M. V. Koldaeva, and E. A. Petrzhik, Crystallography Reports **48**, 768 (2003).
7. A. A. Viryus, T. P. Kaminskaya, M. N. Shipko, and M. A. Stepovich, Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov, No. 2, 71 (2013).
8. M. N. Shipko, V. G. Kostishyn, V. V. Korovushkin, I. M. Isaev, M. A. Stepovich, A. I. Tikhonov, and E. S. Savchenko, Journal of Nano- and Electronic Physics. **8**, P. 03004 (2016).
9. Ya. B. Zel'dovich, A. L. Buchachenko, and E. L. Frankevich, Sov. Phys. Usp. **31**, 385 (1988).
10. M. A. Vershakovskaya, N. V. Petrov, and A. V. Pokoev, Bulletin of the Cherkasy National University. Phys. and Math. Sciences, No. 17, 86 (2007).
11. V. V. Korovushkin, V. G. Kostishin, M. A. Stepovich, and M. N. Shipko, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics **80**, 1450 (2016).
12. A. A. Virus, T. P. Kaminskaya, M. A. Stepovich, V. V. Korovushkin, M. N. Shipko, A. I. Tikhonov, and V. V. Popov, Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques **11**, 1046 (2017).
13. B. A. Staroverov, M. A. Stepovich, and M. N. Shipko, Promishlennye ASU i Kontrollery, No. 8 (2011).
14. M. N. Shipko, M. A. Stepovich, B. A. Staroverov, V. Kh. Kostyuk, Promishlennye ASU i Kontrollery, No. 1. 2 (2012).
15. K. Oki, A. Yamamura, K. Kudo, and T. Eguchi, Trans. Jap. Inst. of Metals **20**, 451 (1979).
16. T. Granshaw, Physica. **86-88B**, 391 (1977).
17. *Chemical applications of Mössbauer spectroscopy* / Ed. V. I. Gol'dansky and R. Gerber (Mir, Moscow, 1970) [in Russian].
18. V. I. Iveronova, and A. A. Katznelson, *Short-range order in solid solutions* (Nauka, Moscow, 1977) [in Russian].
19. C. J. Fan, X. P. Song, M. X. Quan, and Z. K. Hu, Nanostructured Materials. **5**, 433 (1995).
20. V. A. Pozdnyakov, A. M. Glezer, Physics of the Solid State. **44**, 732 (2002).