

СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

STRUCTURE FORMATION. RESISTANCE TO DESTRUCTION AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES

УДК 669.1'24:537.636

Золотаревський І. В. канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: zolotarevsky.i@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5512-3102

Ольшанецький В. Ю. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: olshan@zpu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9485-4896

ПРО ЗАРОДЖЕННЯ α -МАРТЕНСИТУ В СТАЛЯХ І СПЛАВАХ ЗАЛІЗА

Мета роботи. Дослідити можливість зародження мартенситу на магнітних (концентраційних) неоднорідностях аустеніту хромонікелевих сталей.

Методи дослідження. Узагальнення експериментальних і теоретичних досліджень впливу сильних магнітних полів на мартенситне перетворення в сталях і сплавах заліза з врахуванням магнітного стану аустеніту.

Отримані результати. Аналіз магнітного стану аустеніту і аномально великий вплив сильного магнітного поля на зміщення мартенситної точки в сталі 40X2H20 свідчить про те, що перетворення аустеніту в мартенсит в ній є «магнітним фазовим переходом першого роду», як і в деяких інших сталях і сплавах на залізнікелевій основі.

Наукова новизна. Пояснено деякі особливості мартенситного перетворення в сталях і сплавах заліза. Передбачається, що мартенсит при «магнітному $\gamma \rightarrow \alpha$ -переході» зароджується на магнітних неоднорідностях з розорієнтованою магнітною структурою типу «спінове скло». Вимушена магніострикція при парапроцесі і спонтанна магніострикція нижче точки Кюрі приводять до виникнення колінеарного феромагнетизму зі змінною координаційного числа з 12 до 8. Сильний всебічний тиск веде до виникнення колінеарного антиферомагнетизму і стабілізації γ -фази. В парамагнітному аустеніті зародження α -мартенситу відбувається на дислокаційних зародках, розміри яких мають такий же порядок величини (по об'єму), як і магнітні неоднорідності в системі Fe-Ni.

Практична цінність. Отримані в роботі результати розширюють уявлення про мартенситне перетворення в сталях і дають підстави для пояснення деяких особливостей при їх термічній обробці.

Ключові слова: інварні сплави, суперпарамагнетизм, магнітні (концентраційні) неоднорідності, $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення, магнітні переходи першого і другого роду, сильні імпульсні магнітні поля, дислокаційні і магнітні зародки мартенситу.

Вступ

В уявленнях про мартенситні перетворення (МП) в сталях і сплавах заліза утворення зародків нової фази є до цього часу найбільш невизначеним. Однією з характерних особливостей такого перетворення є наявність двох кінетик: «атермічної» і «ізотермічної» (термічно активованої). «Відповідь на питання про причини виникнення атермічного і ізотермічного мартенситів є однією з найскладніших і найвідповідальніших в проблемі коректного описання механізму мартенситоутворення. Знання цієї відповіді може стати ключовим розділом в розумінні особливостей протікання релаксаційних процесів в мартенситах різної природи ...» [1].

Історично першою теорією МП була теорія С.С. Штейнберга, яка заперечувала виникнення зародків і їх зростання. Причиною і рушійною силою перет-

ворення вважалися внутрішні термопружні напруження, які зумовлені коефіцієнтом термічного розширення аустеніту при гартуванні (фазовий перехід другого роду) [2].

Після відкриття «ізотермічного» МП було побудовано «термодинамічну» теорію (Г. В. Курдюмов, 1948 р.). Згідно цієї теорії, рушійною силою МП є різниця вільних енергій γ - і α -фаз. Як і при інших фазових переходах першого роду, зокрема, «рідина \leftrightarrow тверде тіло», мартенситне перетворення відбувається шляхом утворення зародків нової фази і наступного їх росту до критичного розміру, після досягнення якого кристал нової фази росте довільно зі швидкістю, близькою до швидкості звуку в металі [3].

Іншою характерною особливістю МП є аномально велике зміщення мартенситної точки в деяких ста-

лях і сплавах заліза в сильному імпульсному магнітному полі. Вплив магнітного поля на МП був відкритий у 1961 р. В. Д. Садовським із співробітниками [4, 5]. Узагальнення результатів експериментальних і теоретичних досліджень привело до відкриття «магнітного фазового переходу першого роду» [6–8].

З'ясовано, що магнітний мартенситний $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехід обумовлений аномально великою об'ємною магнітострикцією та неоднорідною і неколінеарною магнітною структурою аустеніту. Його існування дозволяє розглядати можливість зародження мартенситу на відповідних структурних неоднорідностях, спираючись на багаточисельні експериментальні і теоретичні дослідження.

Аналіз можливості зародження мартенситу на магнітних (концентраційних) неоднорідностях в хромонікелевих сталях

Ембріональна теорія М. Коена передбачала існування в сталях і сплавах заліза зародків мартенситу в декілька десятків нанометрів [9]. Такі великі феромагнітні складові сплавів не могли бути непомічені при дослідженні магнітного стану аустеніту. Нами раніше магнітним методом досліджувалась мікрокінетика МП в сплаві X15H5Д2Т [10, 11]. При кімнатній температурі цей сплав має двофазну мартенситно-аустенітну структуру. Нагрівання в середовищі аргону до 1200 К перетворює його в однофазну структуру аустеніту. На рис. 1а зображено залежність оберненої питомої магнітної сприйнятливості сплаву X15H5Д2Т від температури при повільному охолодженні (світлі маркери). Крім того, вимірювалася питома магнітна сприйнятливості зразка при різних значеннях напруженості магнітного поля, зокрема в точках 1–4 (рис. 1б). В такий спосіб розраховувалася кількість мартенситу в області мартенситної точки [12].

Як видно з рис. 1а, залежність $1/\chi(T)$ від високих температур до мартенситної точки M_S уявляє собою пряму лінію без відхилень від неї. Це вказує на те, що в парамагнітному аустеніті сплаву X15H5Д2Т феромагнітних зародків мартенситу розміром декілька десятків нанометрів немає навіть в околі температури M_S . Теж саме спостерігається і в аустеніті сплаву H15 (див. рис. 1а, чорні маркери). В обох сплавах мартенситне перетворення відбувається за ізотермічною кінетикою. Необоротність магнітної сприйнятливості нижче прямолінійної залежності $1/\chi(T)$ (наприклад, у точці 3) свідчить про появу деякої кількості феромагнітних кристалів мартенситу.

Відомо також, що існують сплави заліза, у яких залежність $1/\chi(T)$ при наближенні до мартенситної точки відхиляється від прямої лінії в той чи інший бік. При цьому мартенситне перетворення в подібних системах має атермічний характер. Таке відхилення від закону Кюрі-Вейса характерне для аустеніту хромонікелевих сталей.

На рис. 2 показано температурну залежність оберненої питомої магнітної сприйнятливості аустеніту сталі 40X2H20 [11]. При охолодженні нижче ≈ 490 К спостерігається зміщення залежності $1/\chi(T)$ з переходом на іншу такого роду залежність з більшою магнітною сприйнятливістю. На відміну від рис. 1а, ця залежність $1/\chi(T)$ має повністю оборотний характер і не може бути пояснена появою α -мартенситу. Подібне явище в хромонікелевих сталях вперше спостерігали автори робіт [14, 15].

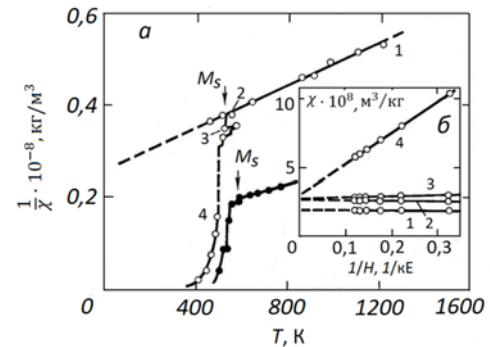


Рисунок 1. Дослідження магнітного стану аустеніту поблизу мартенситної точки M_S в сплавах X15H5Д2Т (○) і H15 (●) [11]:

а – температурна залежність оберненої питомої магнітної сприйнятливості $1/\chi$ в магнітному полі напруженістю 4,52 кЕ (0,36 МА/м). Точки на прямій нижче M_S отримані по методу, запропонованому в [13]; б – визначення малої кількості мартенситної фази в аустеніті по методу, запропонованому в [12]: 1 – 0; 2 – 0; 3 – 0,011; 4 – 0,156% (мас.).

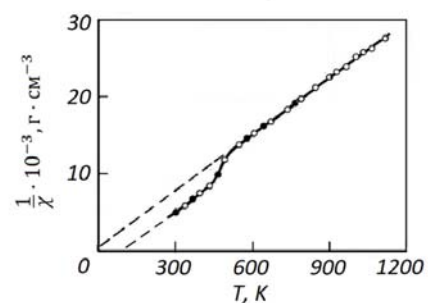


Рисунок 2. Температурна залежність оберненої питомої магнітної сприйнятливості аустеніту сталі 40X2H20 в магнітному полі напруженістю 4,52 кЕ (0,36 МА/м) [11]: ○ – охолодження; ● – нагрівання

Вимірювання питомої намагніченості сталі 40X2H20 в сильних імпульсних магнітних полях при температурі рідкого азоту, виконане в роботі [15], показало, що ділянка експериментальної кривої намагніченості до значення поля, яке викликає мартенситне перетворення, описується функцією Ланжевена для частинок з магнітним моментом $M = 70 \mu_B$ (крива 2,

рис. 3). Оцінка середнього розміру суперпарамагнітних включень, по величині магнітного моменту для частинок сферичної форми, згідно [15], дає величину $\bar{d} \approx 1$ нм.

Сильне імпульсне магнітне поле в хромонікелевих сталях з суперпарамагнітним аустенітом викликає активне мартенситне $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення. Це, зокрема, спостерігається і у сталі 40X2H20 (рис. 4) [14]. Зміщення мартенситної точки в сторону високих температур на одиницю напруженості поля становить $\Delta T/\Delta H = 6,54$ К/(МА/м), що перевищує теоретичні оцінки по узагальненим рівнянням Клапейрона-Клаузіуса в десятки разів [16, 17].

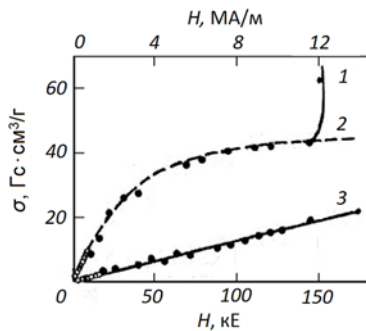


Рисунок 3. Намагніченість сталі 40X2H20 в сильному магнітному полі [15]:

- 1 – експериментальні значення при 77 К;
- 2 – теоретична крива при $M = 70 \mu_B$ (M – магнітний момент феромагнітних включень в парамагнітній матриці);
- 3 – експериментальна крива при 290 К; точки – о – вимірювання на магнітних терезах в постійному магнітному полі.

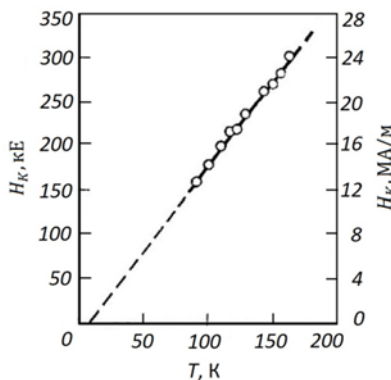


Рисунок 4. Залежність напруженості критичного магнітного поля H_K , яке викликає появу перших порцій мартенситу, від температури аустеніту сталі 40X2H20 [14]

З метою пояснення аномально великого впливу магнітного поля на мартенситне перетворення, в роботі [18] досліджувалася об'ємна магнітострикція аустеніту сталі 40X2H20 в полі напруженістю до 1,44 МА/м. Як видно з рис. 5, взятого з цієї ж роботи, при

температурі рідкого азоту (ближче до мартенситної точки) відносна зміна об'єму аустеніту $\Delta V_\gamma/V_\gamma$ на порядок більша, ніж при 300 К. Вважаючи, що в магнітних полях більшої величини (ніж 1,44 МА/м) зміна об'єму аустеніту пропорційна напруженості магнітного поля H , отримаємо при $H = 12$ МА/м (≈ 150 кЕ) $\Delta V_\gamma/V_\gamma = 0,08 \cdot 10^{-2}$. Приймаючи величину коефіцієнта об'ємного стискування сталі як для заліза $0,595 \cdot 10^{-6}$ бар $^{-1}$ [19, 20], розрахуємо зовнішній всебічний тиск для компенсації даної деформації, створеної магнітним полем: $0,08 \cdot 10^{-2}/(0,595 \cdot 10^{-6}) = 1,34 \cdot 10^3$ бар.

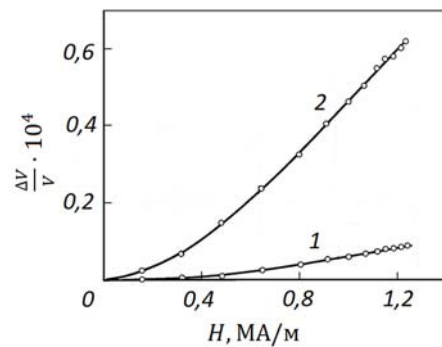


Рисунок 5. Зміна об'єму аустеніту сталі 40X2H20 в магнітному полі напруженістю до 1,44 МА/м (18 кЕ) [18]: 1 – 300; 2 – 77 (К)

Треба зазначити, що параболічна залежність $\Delta V_\gamma/V_\gamma(H)$ аустеніту сталі 40X2H20 при температурі 77 К свідчить, що він знаходиться вище точки Кюрі (див. рис. 5). Це означає, що при подальшому охолодженні і наближенні до мартенситної точки, яка очікується при ~ 10 К, вимушена магнітострикція зросте і може сягнути значень величини порядку $\sim 10^{-2}$, як це спостерігається в інварних сплавах Fe-Ni. Крім того, нижче точки Кюрі існує спонтанна магнітострикція, яка залежить від температури і теж може мати величину $\Delta V_\gamma/V_\gamma \sim 10^{-2}$.

Отже, аустеніт сталі 40X2H20 вище мартенситної точки має неоднорідну магнітну структуру, успадковану від його основи – Fe-Ni-компонентів, які в ГЦК-фазі конкурують між собою, прагнучи встановити відповідний стійкий магнітний порядок: «феромагнітний» або «антиферомагнітний (парамагнітний)».

Тобто, суперпарамагнетизм в аустеніті сталі 40X2H20 обумовлений сегрегацією нікелю і сегрегацією заліза, що приводить до сумісного існування малих «феромагнітних» і таких же за розміром або більших «антиферомагнітних (парамагнітних)» ділянок (до 1–2 нм). При цьому, не можна виключити і додатковий механізм утворення феромагнітних неоднорідностей: локальна більшість атомів вуглецю флуктуаційного походження збільшує міжатомну відстань. Цим самим в цій локальній частині аустеніту повинна збільшитися феромагнітна складова взаємодії. Експериментально

доведено, що додавання в систему Fe-Ni 0,5 % (мас.) вуглецю, підвищує точку Кюрі на 100 K [21].

Атоми хрому, заміщуючи атоми заліза, взаємодіють з іншими атомами заліза антиферромагнітно. Але цей зв'язок слабкіший, ніж при взаємодії атомів одного сорту (заліза) між собою [20]. При певних комбінаціях атомів Fe, Ni, Cr і C в області низьких температур виникають неоднорідності з розорієнтованою магнітною структурою типу «спінове скло» [22]. В сильному магнітному полі магнітні моменти атомів такої неоднорідності орієнтуються по полю, наближаючись до колінарного ферромагнетизму, який існує в α -структурі. При цьому збільшується і об'єм цієї неоднорідності, який теж наближається до об'єму α -фази в межах цієї неоднорідності. Тобто, магнітна неоднорідність перетворюється в зародок нової фази, якщо вона менше критичного об'єму або в «центр», якщо вона дорівнює критичному об'єму, вище якого спостерігається довільний ріст кристала мартенситу.

Висновки

1. В сталях і сплавах заліза мартенситне $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення здійснюється двома різними шляхами:

- як звичайне фазове перетворення першого роду, яке підлягає узагальненим рівнянням Клапейрона-Клаузіуса;

- як магнітне фазове перетворення першого роду, яке не підлягає узагальненим рівнянням Клапейрона-Клаузіуса.

2. Зародження α - мартенситу відбувається на двох різних типах зародків:

- дислокаційних зародках, які виникають на існуючих в аустеніті структурних дефектах, що мають підвищену енергію;

- магнітних неоднорідностях з розорієнтованою магнітною структурою.

3. Зародки обох типів мають розміри (по об'єму) одного порядку величини.

Список літератури

1. Ошкардєров С. П. К вопросу об атермическом и изотермическом мартенситах [Текст] / С. П. Ошкардєров // Успехи физики металлов. – 2011. – Т. 12. – С. 471–479.

2. Ошкардєров С. П. К вопросу о природе мартенситообразования в углеродистых сталях [Текст] / С. П. Ошкардєров // Успехи физики металлов. – 2011. – Т. 12. – С. 269–293.

3. Лысак, Л. И. Физические основы термической обработки стали [Текст] / Л. И. Лысак, Б. И. Николин. – К. : Техніка, 1975. – 304 с.

4. Закалка стали в магнитном поле [Текст] / [М. А. Кривоглаз, В. Д. Садовский, Л. В. Смирнов, Е. А. Фокина]. – М. : Наука, 1977. – 120 с.

5. К вопросу о влиянии магнитного поля на мартенситное превращение в стали [Текст] / В. Д. Садовский, Н. М. Родигин, Л. В. Смирнов и др. // ФММ – 1961. – Т. 12. – № 2. – С. 302–304.

6. Золотаревский И. В. Мартенситное превращение в системах на основе составов Fe-Ni в сильных магнитных полях [Текст] / И. В. Золотаревский // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2020. – № 2. – С. 22–29. DOI: 10.15588/1607-6885-2020-2-3.

7. Zolotarevsky I. V. Martensitic Transformation in Fe-Ni Alloys with Addition of Chromium, Manganese, and Carbon in High Magnetic Fields [Text] / I. V. Zolotarevsky, M. O. Schetininam, O. I. Zolotarevsky // Physics of Metals and Metallography. – 2021. – Vol. 122. – N 2, – P. 127–133. DOI: 10.1134/S0031918X21020113.

8. Золотаревський І. В. Інварні аномалії і мартенситне перетворення в сталях і стопах на основі Fe-Ni в сильному магнітному полі та без нього [Текст] / І. В. Золотаревський // Металофізика і новітні технології. – 2022. – Т. 44. – № 2. – 159–174. DOI: 10.15407/mfint.44.02.0159

9. Kaufman L. Thermodynamics and Kinetics of Martensitic Transformations [Text] / L. Kaufman, M. Cohen // Progress in Metal Physics. – 1958. – V. 7. – P. 165–246. doi.org/10.1016/0502–8205(58)90005–4.

10. Ольшанецкий, В. Е. О физической трактовке мартенситной точки [Текст] / В. Е. Ольшанецкий, В. Л. Снежной // ФММ. – 1973. – Т. 36. – № 4. – С. 894–896.

11. Куценко Ю. Н. Магнитострикция гетерогенных структур [Текст] / Ю. Н. Куценко, В. Г. Каниболоцкий, И. В. Золотаревский // – Днепропетровск : Лира ЛТД, 2006. – 200 с.

12. К методике определения малых содержаний альфа-фазы в аустенитных сталях [Текст] / В. Л. Снежной, Ф. Д. Мирошниченко, В. Г. Каниболоцкий, А. И. Столяренко // Заводская лаборатория. – 1970. – № 9. – С. 1083–1086.

13. Золотаревский И. В. О возможности определения магнитной восприимчивости парамагнитной матрицы, содержащей ферромагнитные включения [Текст] / И. В. Золотаревский, В. Л. Снежной // Заводская лаборатория. – 1978. – № 7. – С. 822–824.

14. О характере изменения намагниченности аустенитной стали под действием сильного импульсного магнитного поля [Текст] / И. Г. Факидов, Л. Д. Ворончихин, Э. А. Завадский, А. М. Бурханов // ФММ. – 1965. – Т. 19. – № 6. – С. 852–857.

15. Ворончихин Л. Д. Суперпарамагнетизм аустенитных сталей [Текст] / Л. Д. Ворончихин, Э. А. Завадский, И. Г. Факидов // ФММ. – 1965. – Т. 20. – № 5. – С. 793–795.

16. Золотаревский И. В. Влияние объемной магнито-стрикции на мартенситное превращение в сплавах железа. Магнитный фазовый переход первого рода [Текст] / И. В. Золотаревский // Металофізика і новітні технології. – 2015. – Т. 37. – № 5. – С. 625–636.

17. Золотаревский И. В. Влияние магнитного состояния аустенита на мартенситное превращение в сплавах Fe-Ni в сильном магнитном поле и без него [Текст] / И. В. Золотаревский, С. В. Лоскутов, М. О. Щетинина // ФММ. – 2018. – Т. 119. – № 8. – С. 794–801.

18. Золотаревский И. В. О магнитострикции парапроцесса аустенитных сплавов вблизи мартенситной точки [Текст] / И. В. Золотаревский, В. Л. Снежной, Л. М. Шейко // ФММ. – 1979. – Т. 47. – № 6. – С. 1312–1313.

19. Кэй Дж. Таблицы физических и химических постоянных [Текст] / Дж. Кэй, Т. Леби. – М. : ГИФМЛ, 1962. – 248 с.

20. Седов В. Л. Антиферромагнетизм гамма-железа. Проблема инвара [Текст] / В. Л. Седов – М. : Наука, 1987. – 288 с.

21. Георгиева И. Я. О влиянии углерода на точку Кюри аустенита железоникелевых сплавов [Текст] / И. Я. Георгиева, О. П. Максимова // ФММ. – 1967. – № 3. – С. 574–576.

22. Ольшанецкий В. Ю. Про особливості фазових переходів в термодинамічній системі Fe-Ni [Текст] / В. Ю. Ольшанецкий, І. В. Золотаревський // Нові матеріали і технології в металургії і машинобудуванні. – 2022. – №. 2. – С. 107–109. DOI 10.15588/1607-6885-2022-2-17.

Одержано 10.03.2023

ON α - MARTENSITE NUCLEATION IN STEELS AND IRON ALLOYS

Zolotarevsky I. Ph. D., Associate Professor of the Department of Physics, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: zolotarevsky.i@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5512-3102

Ol’shanetskii V. Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Physical Material Science, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: olshan@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9485-4896

Purpose. To investigate the possibility of martensite nucleation on magnetic (concentration) inhomogeneities of chrome-nickel steels austenite.

Research methods. Generalization of experimental and theoretical studies of the strong magnetic field effect on the martensitic transformation in steels and iron alloys, taking into account the magnetic state of austenite

Results. The analysis of the magnetic state of austenite and the abnormally large strong magnetic field effect on the martensite point displacement in 40X2H20 steel indicates that the transformation of austenite into martensite in it is a “magnetic first order phase transition”.

Scientific novelty. Some features of the martensitic transformation in steels and iron alloys are explained. It is assumed that martensite during the “magnetic $\gamma \rightarrow \alpha$ - transition” originates on magnetic inhomogeneities with a disoriented magnetic structure of the spin glass type. Forced magnetostriction during paraprocess and spontaneous magnetostriction below the Curie point lead to the emergence of collinear ferromagnetism with a change in the coordination number from 12 to 8. High all-round pressure leads to the occurrence of collinear antiferromagnetism and the γ -phase stabilization. In paramagnetic austenite the nucleation of α -martensite occurs on dislocation nuclei, the sizes of which have the same order of magnitude (by volume) as the magnetic inhomogeneities in the Fe-Ni system.

Practical value. The results obtained in the work expand the concept of martensitic transformation in steels and provide grounds for explaining some kinetic features in them.

Key words: invar alloys, superparamagnetism, magnetic (concentration) inhomogeneities, $\gamma \rightarrow \alpha$ - transformation, magnetic first order and second order transitions, strong pulsed magnetic fields, martensite nuclei.

References

1. Oshkadjorov, S. P. (2011). K voprosu ob atermicheskom i izotermicheskom martensitah [To the question of athermal and isothermal martensites]. Uspehi fiziki metallov, 12, 471–479.

2. Oshkadjorov, S. P. (2011). K voprosu o prirode martensitoobrazovanija v uglerodistyh staljah [On the nature of martensite formation in carbon steels]. Uspehi fiziki metallov, 12, 269–293.

3. Lysak, L. I., Nikolin, B. I. (1975). Fizicheskie osnovy termicheskoj obrabotki stali [Physical Foundations of Steel Heat Treatment]. Kiev: Tehnika, 304.

4. Krivoglaз, M. A., Sadovskij, V. D., Smirnov, L. V., Fokina, E. A. (1977). Zakalka stali v magnitnom pole [Hardening of steel in a magnetic field]. Moscow: Science, 120.

5. Sadovskij, V. D., Rodigin, N. M., Smirnov, L. V., Filonchik, G. M., Fakidov I. G. (1961). K voprosu o vlijanii

magnitnogo polja na martensitnoe prevrashhenie v stali [On the influence of the magnetic field on the martensitic transformation into steels]. FMM, 12, (2), 302–304.

6. Zolotarevskij, I. V. (2020). Martensitnoe prevrashhenie v sistemah na osnove sostavov Fe-Ni v sil'nyh magnitnyh poljah [Martensitic transformation in systems based on Fe-Ni compounds in strong magnetic fields]. Novye materialy i tehnologi v metallurgii i mashinostroenii, 2, 22–29. DOI 10.15588/1607-6885-2020-2-3.

7. Zolotarevsky, I. V., Schetinina, M. O., Zolotarevsky, O. I. (2021). Martensitic Transformation in Fe-Ni Alloys with Addition of Chromium, Manganese, and Carbon in High Magnetic Fields. Physics of Metals and Metallography, 122, (2), 127–133. DOI: 10.1134/S0031918X21020113.

8. Zolotarevskij, I. V. (2022). Invarni anomalii i martensytnye peretvorennja v staljah i stopah na osnovi Fe-Ni v syl'nomu magnitnomu poli ta bez n'ogo [Invar anomalies and martensitic transformation in steels and feet based on

- Fe-Ni in a strong magnetic field and without it]. *Metalofizyka i novitni tehnologii*, 44, (2), 159–174. DOI: 10.15407/mfint.44.02.0159
9. Kaufman, L., Cohen, M. (1958). Thermodynamics and Kinetics of Martensitic Transformations. *Progress in Metal Physics*, 7, 165-246. doi.org/10.1016/0502-8205(58)90005-4.
10. Ol'shanetskii, V. E., Snezhnoj, V. L. (1973). O fizicheskoj traktovke martensitnoj točki [On the physical interpretation of the martensitic point]. *FMM*, 36, (4), 894-896.
11. Kucenko, Ju. N., Kanibolockij, V. G., Zolotarevskij, I. V. (2006). Magnitostrikcija geterogennyh struktur [Magnetostriction of heterogeneous structures]. Dnepropetrovsk: Lira LTD, 200.
12. Snezhnoj, V. L., Miroschnichenko, F. D., Kanibolockij, V. G., Stoljarenko, A. I. (1970). K metodike opredelenija malyh sodержanij al'fa-fazy v austenitnyh staljah [On the method of determining the small contents of the alpha phase in austenitic steels]. *Zavodskaja laboratorija*, 9, 1083-1086.
13. Zolotarevskij, I. V., Snezhnoj, V. L. (1978). O vozmozhnosti opredelenija magnitnoj vospriimchivosti paramagnitnoj matricy, sodержashhej ferromagnitnye vkljucheniya [On the possibility of determining the magnetic susceptibility of a paramagnetic matrix containing ferromagnetic inclusions]. *Zavodskaja laboratorija*, 7, 822–824.
14. Fakidov, I. G., Voronchihin, L. D., Zavadckij, Je. A., Burhanov, A. M. (1965). O haraktere izmeneniya namagnichennosti austenitnoj stali pod dejstviem sil'nogo impul'snogo magnitnogo polja [On the nature of the change in the magnetization of austenitic steel under the influence of a strong pulsed magnetic field]. *FMM*, 19, (6), 852-857.
15. Voronchihin, L. D., Zavadskij, Je. A., Fakidov, I. G. (1965). Superparamagnetizm austenitnyh stalej [Superparamagnetism of austenitic steels]. *FMM*, 20, (5), 793–795.
16. Zolotarevskij, I. V. (2015). Vlijanie ob'emnoj magnitostrikcii na martensitnoe prevrashhenie v splavah zheleza. Magnitnyj fazovyj perehod pervogo roda [Effect of bulk magnetostriction on martensitic transformation in iron alloys. Magnetic phase transition of the first kind]. *Metallofizika i novejshe tehnologii*, 37, (5), 625–636.
17. Zolotarevskij, I. V., Loskutov, S. V., Shhetinina, M. O. (2018). Vlijanie magnitnogo sostojaniya austenita na martensitnoe prevrashhenie v splavah Fe–Ni v sil'nom magnitnom pole i bez nego [Influence of the magnetic state of austenite on martensitic transformation in Fe–Ni alloys with and without a strong magnetic field]. *FMM*, 119, (8), 794–801.
18. Zolotarevskij, I. V., Snezhnoj, V. L., Shejko, L. M. (1979) O magnitostrikcii paraprocessa austenitnyh splavov vblizi martensitnoj točki [On the magnetostriction of the paraprocess of austenitic alloys near the martensitic point]. *FMM*, 47, (6), 1312–1313.
19. Kjej, Dzh., Lebi, T. (1962). Tablicy fizicheskikh i himicheskikh postojannyh [Tables of physical and chemical constants]. Moskva: GIFML, 248.
20. Sedov, V. L. (1987) Antiferromagnetizm gamma-zheleza. Problema invara [Antiferromagnetism of gamma iron. Invar problem]. Moskva: Nauka, 288.
21. Georgieva, I. Ja., Maksimova, O. P. (1967). O vlijanii ugleroda na točku Kjuri austenita zhelezonikelevyh splavov [About the impact of coal on the point of Cura austenite of iron-nickel alloys]. *FMM*, 24, (3), 574-576.
22. Ol'shanetskii, V. Ju., Zolotarevskij, I. V. (2022). Pro osoblyvosti fazovyh perehodiv v termodinamichnij sistem Fe-Ni [About the features of phase transitions in the thermodynamic system Fe-Ni]. *Novi materialy i tehnologii v metalurgii i mashynobuduvanni*, 2, 107–109. DOI: 10.15588/1607-6885-2022-2-17.