



Магнитные свойства быстрозакаленных нанокристаллических сплавов Fe-Pd, легированных фосфором, бором и кремнием

Головня О.А., Власова Н.И., Попов А.Г., Гавико В.С.

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Мотивация: Сплавы FePd, упорядочивающиеся в слоистую тетрагональную структуру типа $L1_0$ (рис. 1), подобно сплавам FePt, демонстрируют высокие значения константы магнитокристаллической анизотропии ($K \approx 2 \times 10^6$ Дж/м³), поля анизотропии ($\mu_0 H_a \approx 3.5$ Тл) и намагниченности насыщения ($\mu_0 M_s = 1.37$ Тл). При этом уровень коэрцитивной силы H_c после упорядочивающего отжига не превышает 5% от ее теоретического предела. Одним из способов повышения магнитных гистерезисных свойств сплавов является получение нанокристаллического состояния путем быстрой закалки. Однако при быстрой закалке бинарного FePd такое состояние не реализуется [1].

Цель работы: исследовать возможность получения нанокристаллической структуры путем легирования бинарного сплава FePd фосфором, бором и кремнием и влияние этих добавок на процесс фазового превращения и формирование магнитных гистерезисных свойств в быстрозакаленных сплавах FePd.

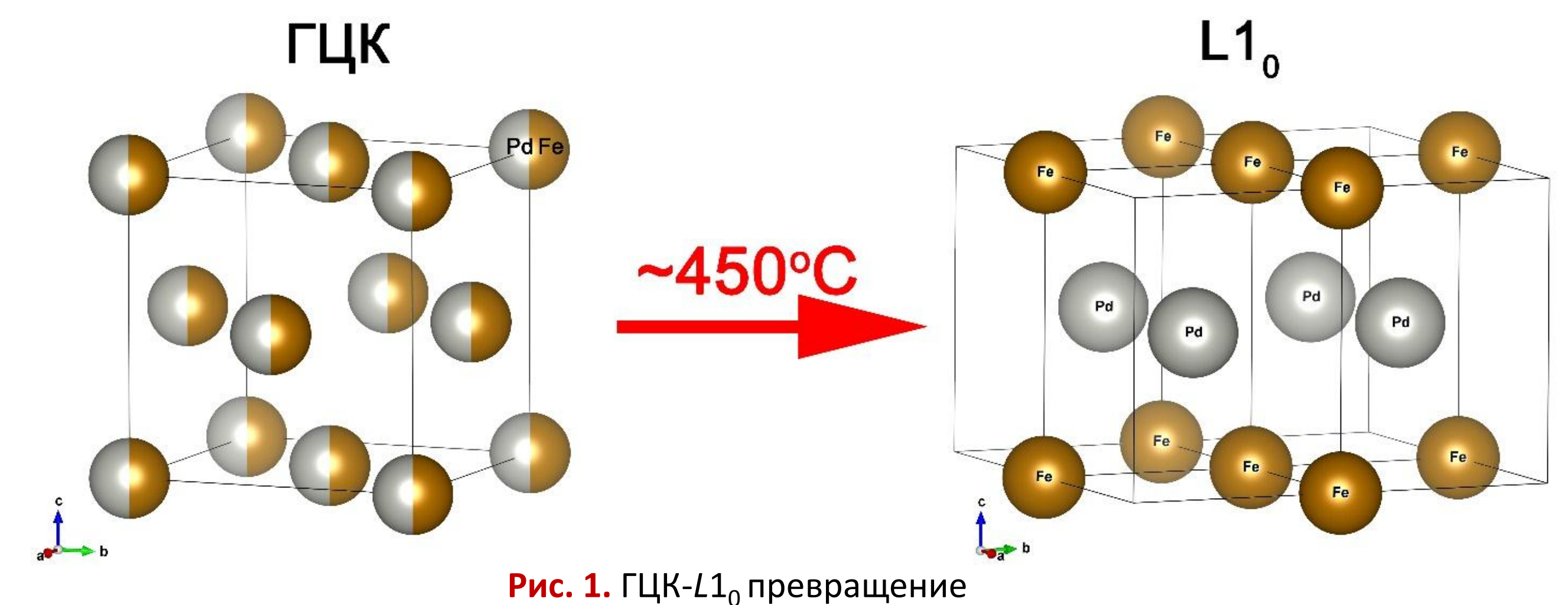


Рис. 1. ГЦК- $L1_0$ превращение

Методика Серия БЗС $\text{Fe}_{41}\text{Pd}_{41}\text{P}_{18-x-y}\text{B}_x\text{Si}_y$ ($x = 0 - 14$; $y = 0, 6$) отжигалась при температурах 400 – 650°C в течении от 5 минут до нескольких часов. Исходные литые сплавы и быстрозакаленные ленты были исследованы методами терромагнитного и рентгенографического анализов и сканирующей и электронной микроскопии [2, 3].

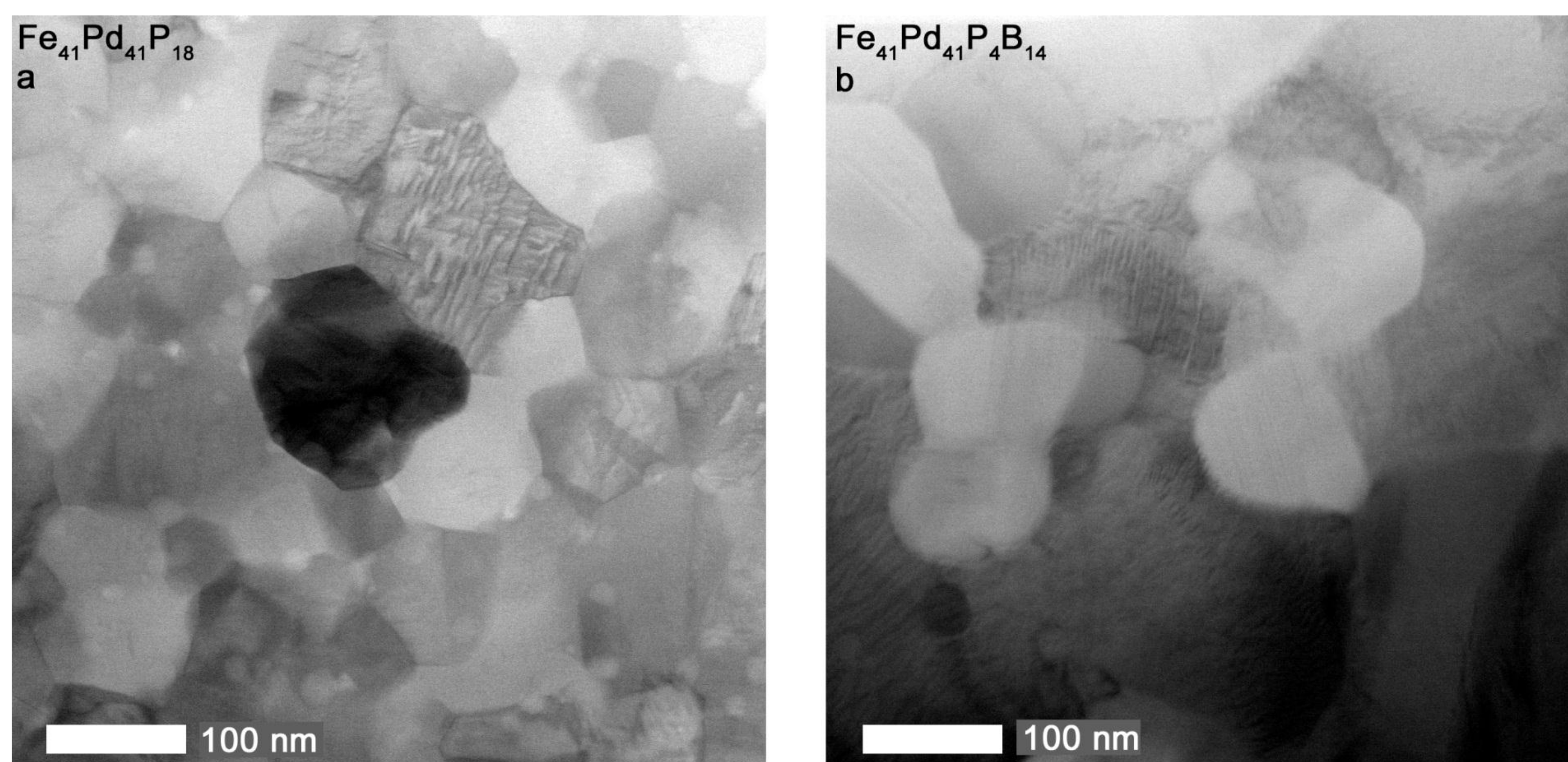


Рис. 2. ТЕМ-изображения микроstructures лент $\text{Fe}_{41}\text{Pd}_{41}\text{P}_{18}$ и $\text{Fe}_{41}\text{Pd}_{41}\text{P}_4\text{B}_{14}$ после упорядочивающего отжига (характерный размер зерен 50-200 нм)

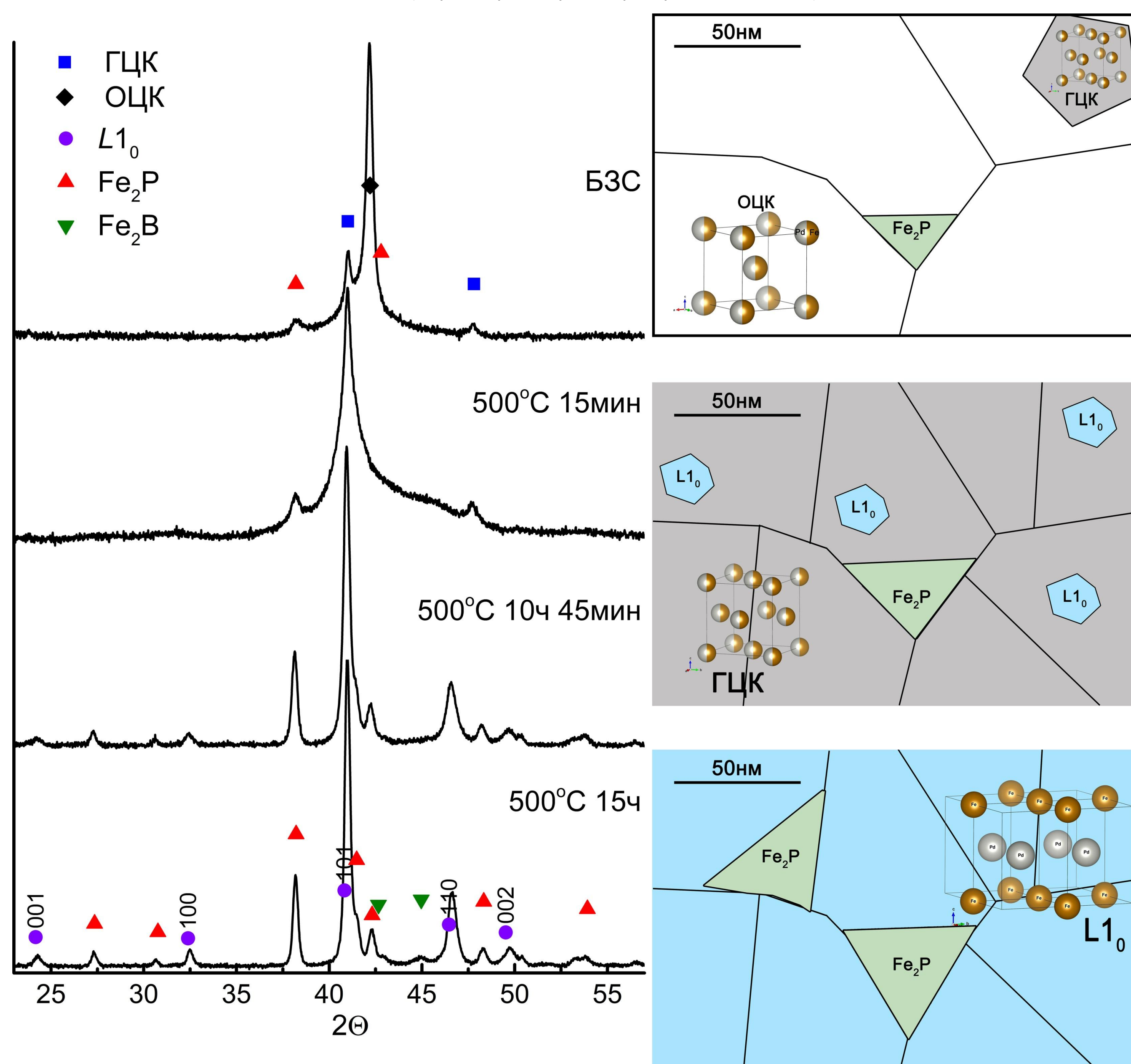


Рис. 5. Дифрактограммы и схемы микроstructures на разных стадиях отжига БЗС $\text{Fe}_{41}\text{Pd}_{41}\text{P}_4\text{B}_8\text{Si}_6$

Список литературы

1. N. I. Vlasova, A. G. Popov, N. M. Kleinerman, V. V. Serikov, V. S. Gaviko, and L. A. Stashkova, Philos. Mag. 99, 2198 (2019).
2. O. A. Golovnia, A. G. Popov, N. I. Vlasova, A. V. Protasov, V. S. Gaviko, V. V. Popov, and A. Kashyap, J. Magn. Magn. Mater. 481, 212 (2019).
3. O. A. Golovnia, N. I. Vlasova, A. G. Popov, V. S. Gaviko, V. V. Popov, A. V. Protasov, and A. Kashyap, Rare Met. 39, 76 (2020).

Результаты получены в рамках научной темы «Магнит» и 17-52-45097 ИНД_а.

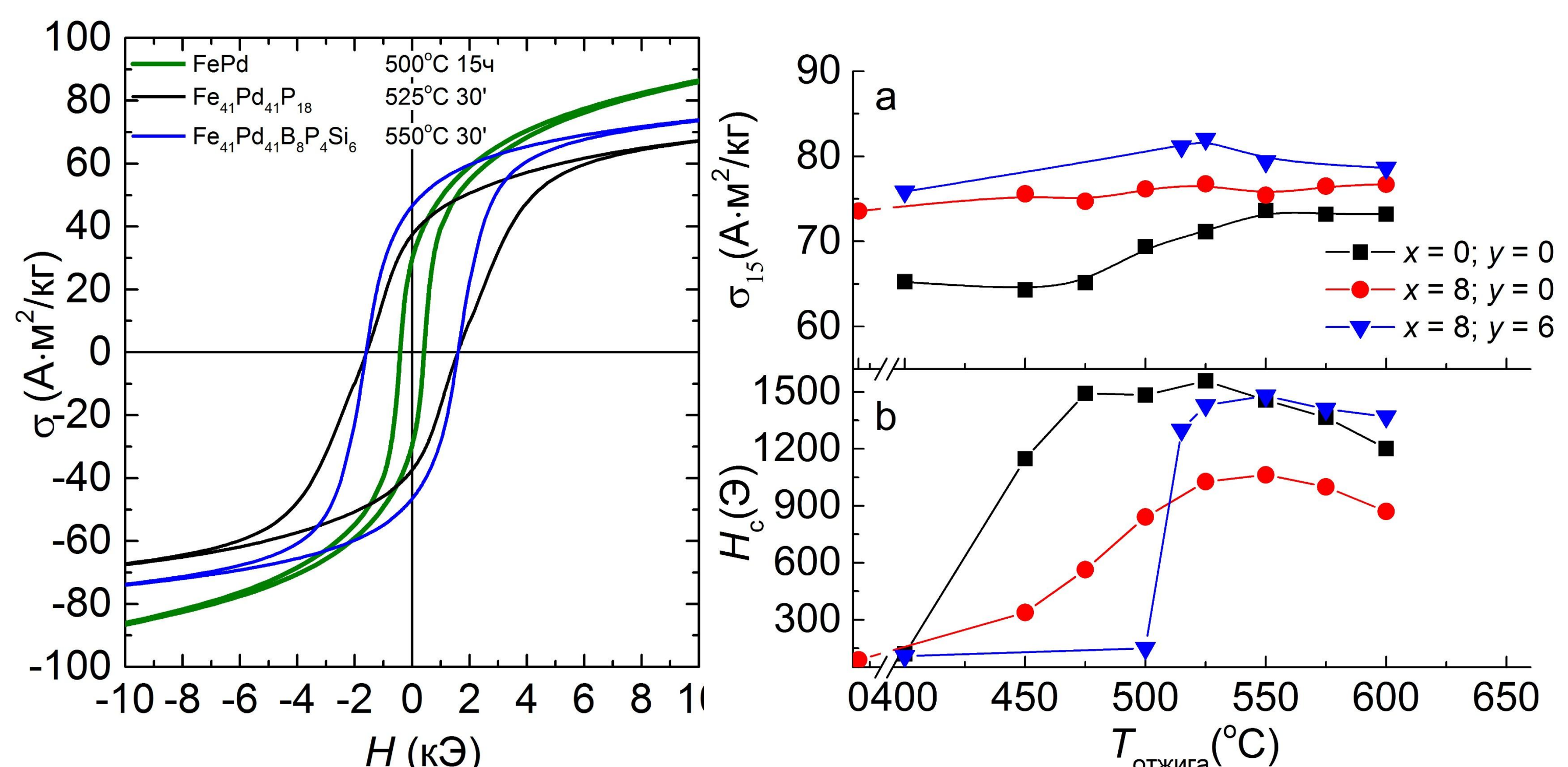


Рис. 3. Петли гистерезиса БЗС после упорядочивающего отжига при оптимальных температурах

Рис. 4. Зависимости удельной намагниченности и коэрцитивной силы БЗС $\text{Fe}_{41}\text{Pd}_{41}\text{P}_{18-x-y}\text{B}_x\text{Si}_y$ от температуры отжига в течение 15 минут

Результаты

1. Легирование сплава FePd бором, фосфором и кремнием приводит к ускорению фазового превращения ($\text{ГЦК} \rightarrow L1_0$).
2. Добавка P осуществляет практически полную аморфизацию БЗС $\text{Fe}_{41}\text{Pd}_{41}\text{P}_{18}$ и способствует сильному измельчению зерна фазы $L1_0$, формирующейся в процессе отжига (Рис. 2). Это приводит к повышению коэрцитивной силы по сравнению с бинарным сплавом, однако, значительно снижает намагниченность насыщения легированных фосфором сплавов (Рис. 3, 4).
3. Замещение части P на B повышает намагниченность насыщения легированных сплавов, однако снижает их коэрцитивную силу. В свою очередь замещение части B на Si без изменения содержания P уменьшает размер зерна и позволяет повысить коэрцитивную силу без снижения намагниченности (Рис. 3, 4).
4. Легирование сплава FePd фосфором, бором и кремнием позволило получить на лентах БЗС $\text{Fe}_{41}\text{Pd}_{41}\text{P}_4\text{B}_8\text{Si}_6$ коэрцитивную силу 1560 Э (Рис. 3). Это значение достигается за 30 минут отжига при $T = 550^\circ\text{C}$, что в 2.6 раза превышает коэрцитивную силу быстрозакаленного эквивалентного сплава FePd и сравнимо по величине с максимальной $H_c = 1800$ Э, достигаемой при длительном низкотемпературном отжиге эквивалентного сплава FePd после интенсивной пластической деформации [1].
5. Установлено, что формирование нанокристаллической структуры в БЗС с оптимальным содержанием легирующих элементов ($\text{Fe}_{41}\text{Pd}_{41}\text{P}_4\text{B}_8\text{Si}_6$) сопровождается каскадом фазовых превращений (Рис. 5): (исходная ОЦК структура) $\rightarrow$ (наноразмерные зерна ГЦК структуры и гексагональной фазы Fe_2P) $\rightarrow$ (медленное образование зародышей фазы $L1_0$) $\rightarrow$ (интенсивный рост зерен $L1_0$) [3].