



УДК 669.018.242.14.151

ВЛИЯНИЕ МЕГАПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И НИКЕЛЯ

А.М. Глезер, М.Р. Плотникова

ЦНИИчермет им. И.П. Бардина,
2-я Бауманская ул., 9/23, Москва, 105005, Россия, e-mail: gretxen@rambler.ru

Аннотация. Изучено влияние мегапластической деформации в камере Бриджмена на структуру и магнитные свойства аморфных сплавов на основе железа и никеля, полученные закалкой из расплава. Установлено существенное изменение намагниченности насыщения, зависящее от числа ферромагнитных компонентов в аморфном сплаве. Показано, что на ранних стадиях мегапластической деформации при сохранении аморфной структуры сплавов происходят существенные изменения параметров рентгеновских спектров и заметное снижение микротвёрдости и рост коэрцитивной силы.

Ключевые слова: мегапластическая деформация, аморфные сплавы, намагниченность насыщения.

Введение

Аморфные и нанокристаллические сплавы на основе железа и кобальта относятся к классу магнитно-мягких материалов, заметно превосходящих по своим магнитным характеристикам кристаллические аналоги [1]. Наиболее яркий пример аморфно-нанокристаллический сплав “Finemet”, обладающий в несколько раз более высокой магнитной проницаемостью при обычных и высоких частотах перемагничивания по сравнению с пермаллоем, сендастом, ферритами и другими промышленными кристаллическими магнитно-мягкими материалами [2]. Вместе с тем хорошо известно, что “слабым звеном” магнитно-мягких аморфных и нанокристаллических сплавов является их низкая намагниченность насыщения, обусловленная необходимостью присутствия в составе высокой концентрации (до 20 ат.%) немагнитных атомов металлоидов (бор, фосфор, кремний и т.п.). Пластическая деформация, особенно мегапластическая деформация (МПД), представляет собой сложный процесс, который не только приводит к формоизменению деформируемого твердого тела, но и вызывает существенные изменения в структуре и свойствах самого материала [3]. В частности, деформация стимулирует массоперенос и изменение химического состава, как на макромасштабном, так и на микромасштабном уровнях [4]. В свою очередь, перераспределение компонентов твердого раствора в процессе пластической деформации может изменить ряд физических свойств материалов и, в частности, их магнитные свойства [5].

Цель данной статьи – рассмотреть влияние МПД в камере Бриджмена и происходящих при этом структурных изменений на магнитные свойства ряда аморфных сплавов на основе железа и никеля, имеющих практическое значение.

§1. Материал и методика экспериментов

Аморфные сплавы $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{29}\text{Co}_{15}\text{Si}_2\text{B}_{10}$, $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{33}\text{B}_{17}$, $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$, были получены методом ЗЖС (спиннингования расплава) в виде ленты толщиной 30 мкм и шириной 5–10 мм. Далее аморфные сплавы подвергались деформации в камере Бриджмена с использованием различного числа полных оборотов подвижной наковальни ($N = 0.5\text{--}8.0$) при гидростатическом давлении $P = 5$ ГПа и при температурах 293 К и 77 К. Структура деформированных образцов изучалась методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Кроме того, измерялись механические свойства (микротвердость) и магнитные свойства образцов после МПД. Магнитные свойства определялись с помощью вибрационного анизометра, разработанного в лаборатории магнетизма физического факультета МГУ. Значения удельной намагниченности насыщения I_s и коэрцитивной силы H_c определялись по кривым намагничивания.

§2. Экспериментальные результаты

Магнитные свойства в аморфном сплаве $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{29}\text{Co}_{15}\text{Si}_2\text{B}_{10}$ анализировались после МПД при 273 К и 77 К. Зависимость изменения намагниченности насыщения I_s от числа оборотов N в камере Бриджмена представлена на рис. 1. Наблюдается резкое возрастание значения I_s с последующим насыщением по мере роста N после МПД при 77 К и резкий максимум значения I_s при $N = 1$ с последующим снижением до исходного значения после МПД при 293 К. Характерно, что максимальное значение I_s после МПД при 293 К и предельное значение I_s при плавном возрастании после МПД при 77 К примерно совпадают.

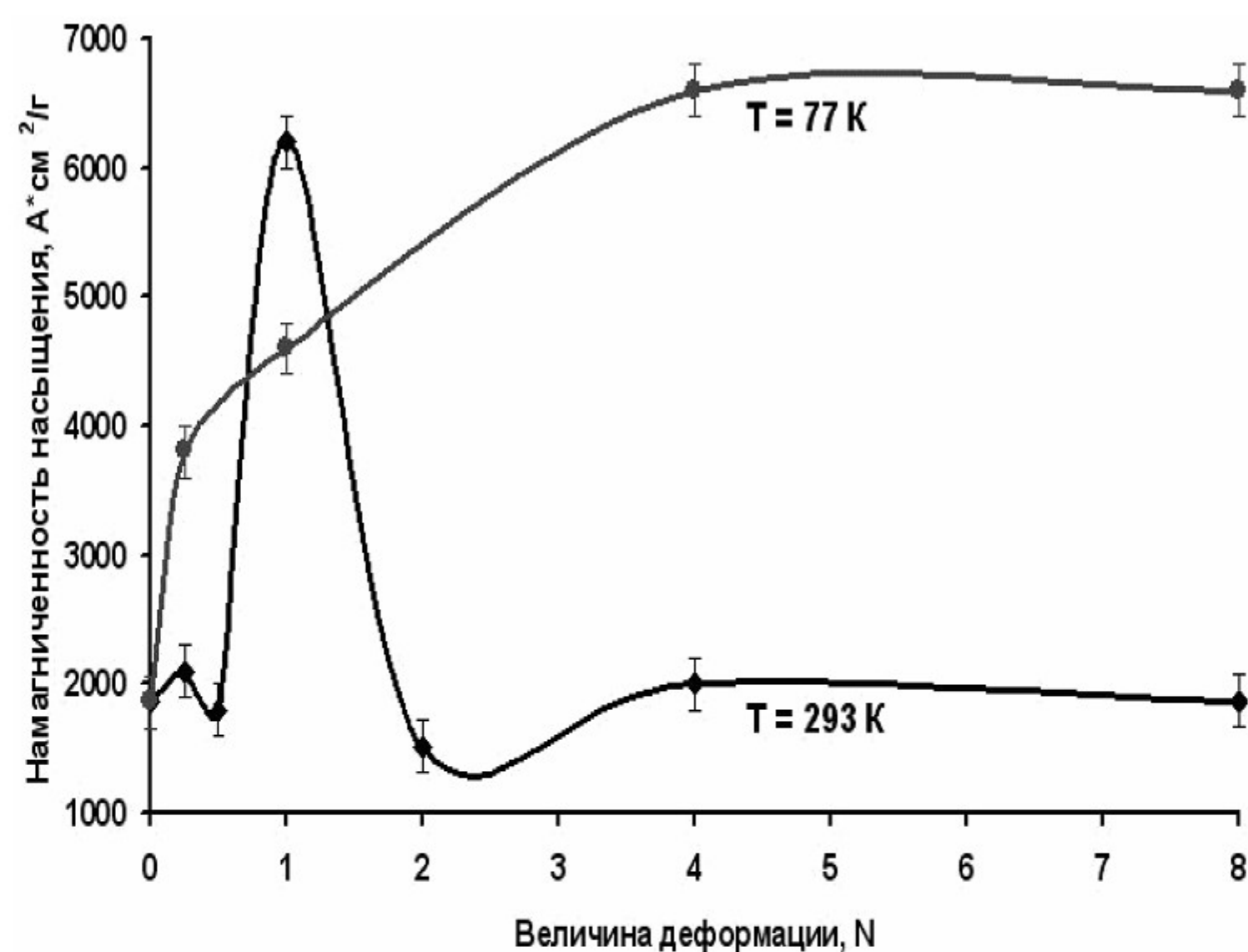


Рис. 1. Изменение намагниченности насыщения от величины деформации для сплава $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{29}\text{Co}_{15}\text{Si}_2\text{B}_{10}$. МПД при 77 К и 293 К.

На рис. 2 представлены зависимости $I_s(N)$ для сплавов $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{33}\text{B}_{17}$ и $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ после МПД при 273 К. Их характеры для различных сплавов кардинально различаются.



Если в сплаве $Fe_{50}Ni_{33}B_{17}$ наблюдается существенный скачкообразный рост при $N = 1$, то в сплаве $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$, наоборот, при $N = 1$, имеет место резкое падение значения I_s .

Характер изменения H_c и H_V по мере роста N во всех изученных сплавах одинаков и соответствует зависимостям, показанным на рис. 3 и 4. Для зависимости $H_c(N)$ наблюдается сначала резкое возрастание значения H_c при $N = 0.5 - 1$, а затем постепенное снижение до значений, несколько превосходящих исходные. Для зависимости $H_V(N)$ наблюдается сначала резкое падение значения H_V при $N = 0.5 - 1$, а затем монотонный рост до значений, значительно превосходящих исходные.

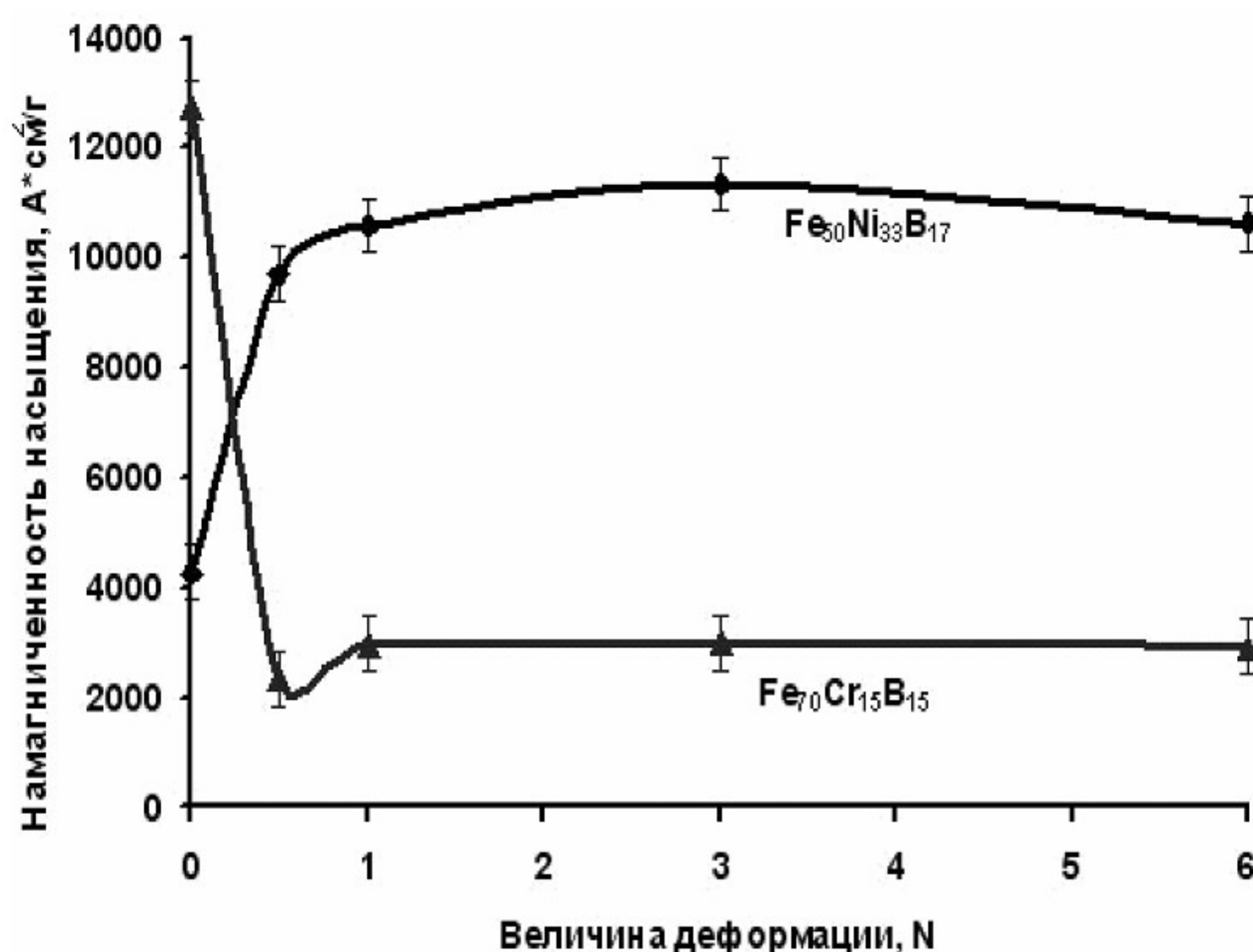


Рис. 2. Изменение намагниченности насыщения от величины деформации для сплавов $Fe_{50}Ni_{33}B_{17}$ и $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$. $T=293$ К.

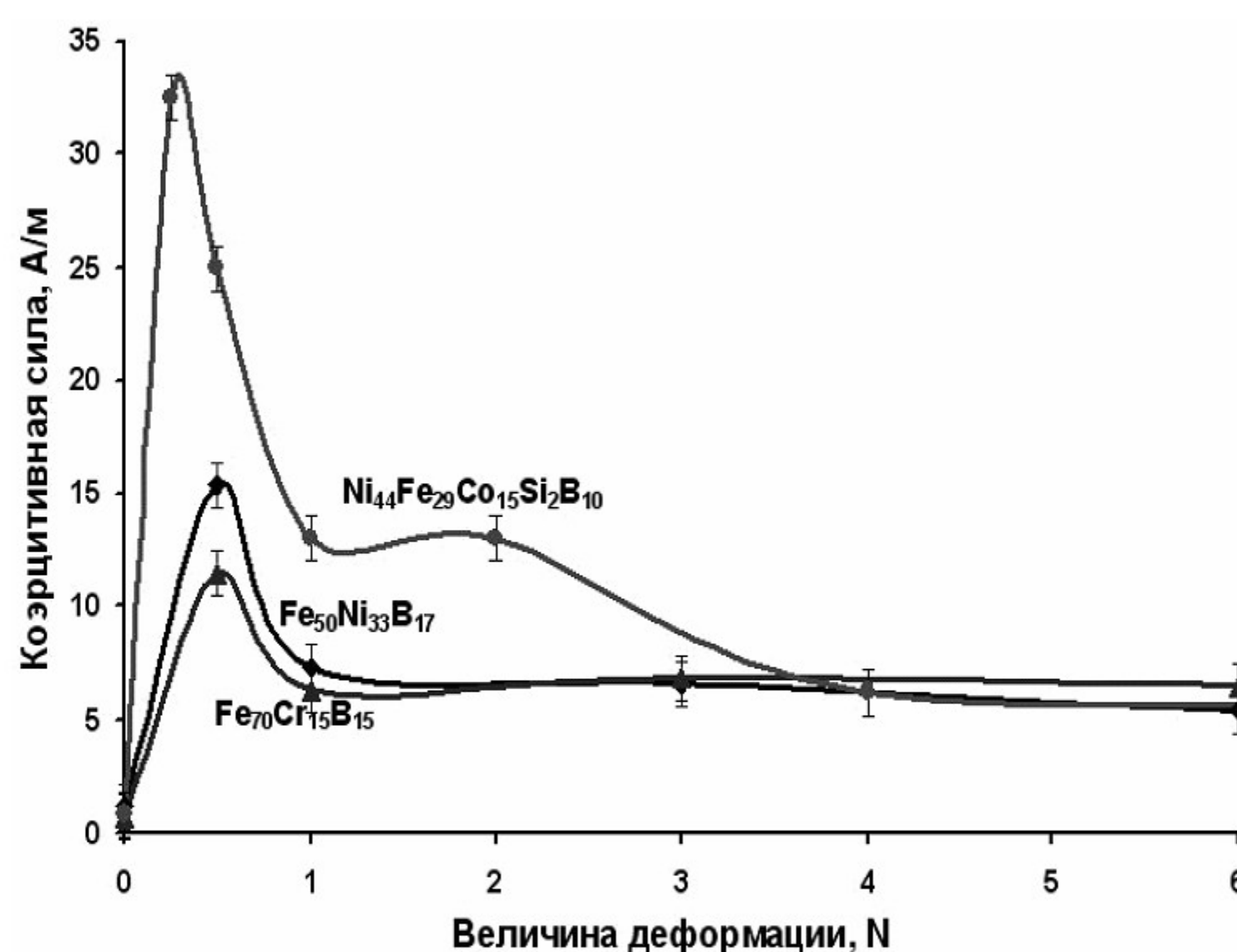


Рис. 3. Изменение коэрцитивной силы от величины деформации для сплавов $Ni_{44}Fe_{29}Co_{15}Si_2B_{10}$, $Fe_{50}Ni_{33}B_{17}$, $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$. $T=293$ К.

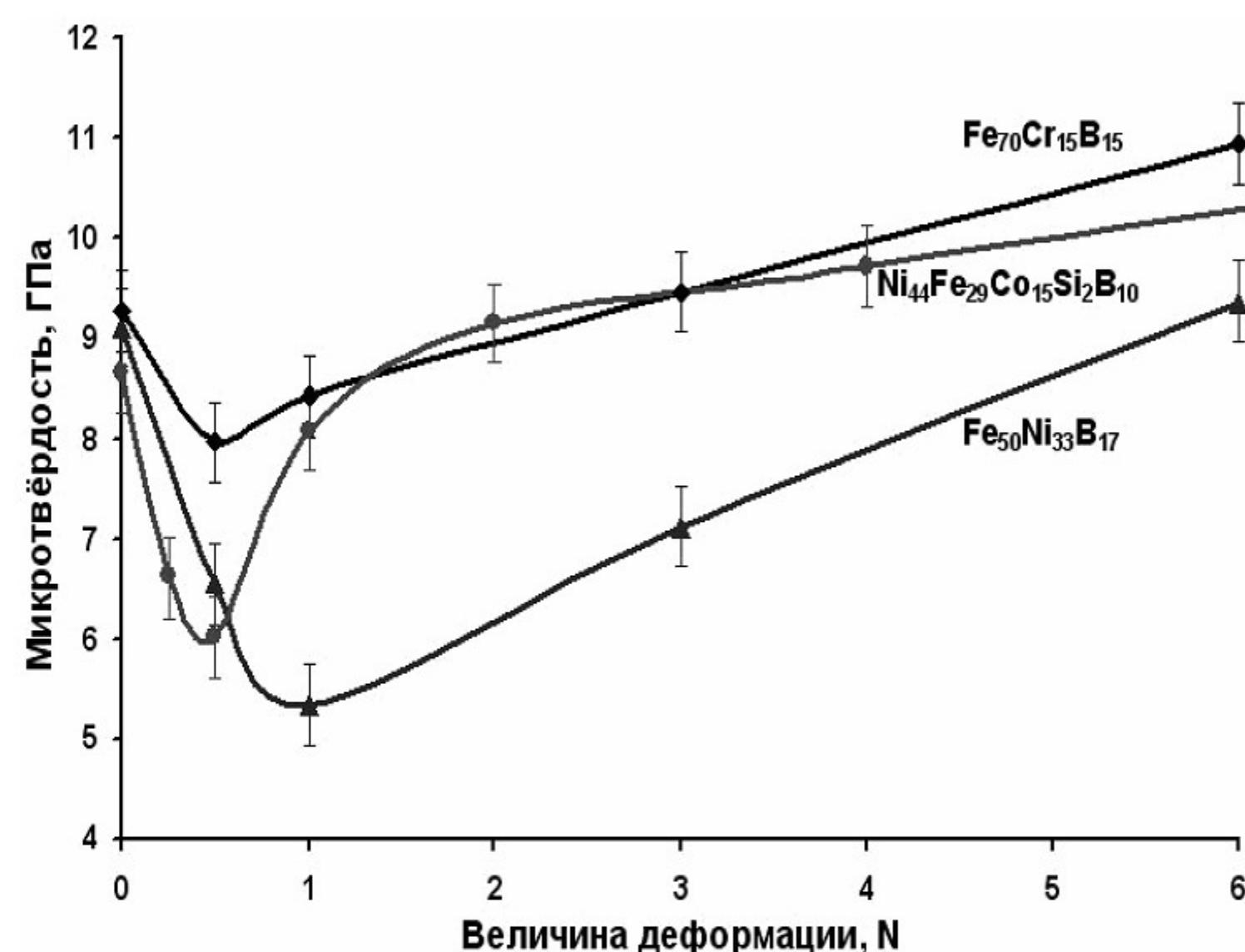


Рис. 4. Изменение микротвёрдости от величины деформации для сплавов $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{29}\text{Co}_{15}\text{Si}_2\text{B}_{10}$, $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{33}\text{B}_{17}$, $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$. $T=293$ К.

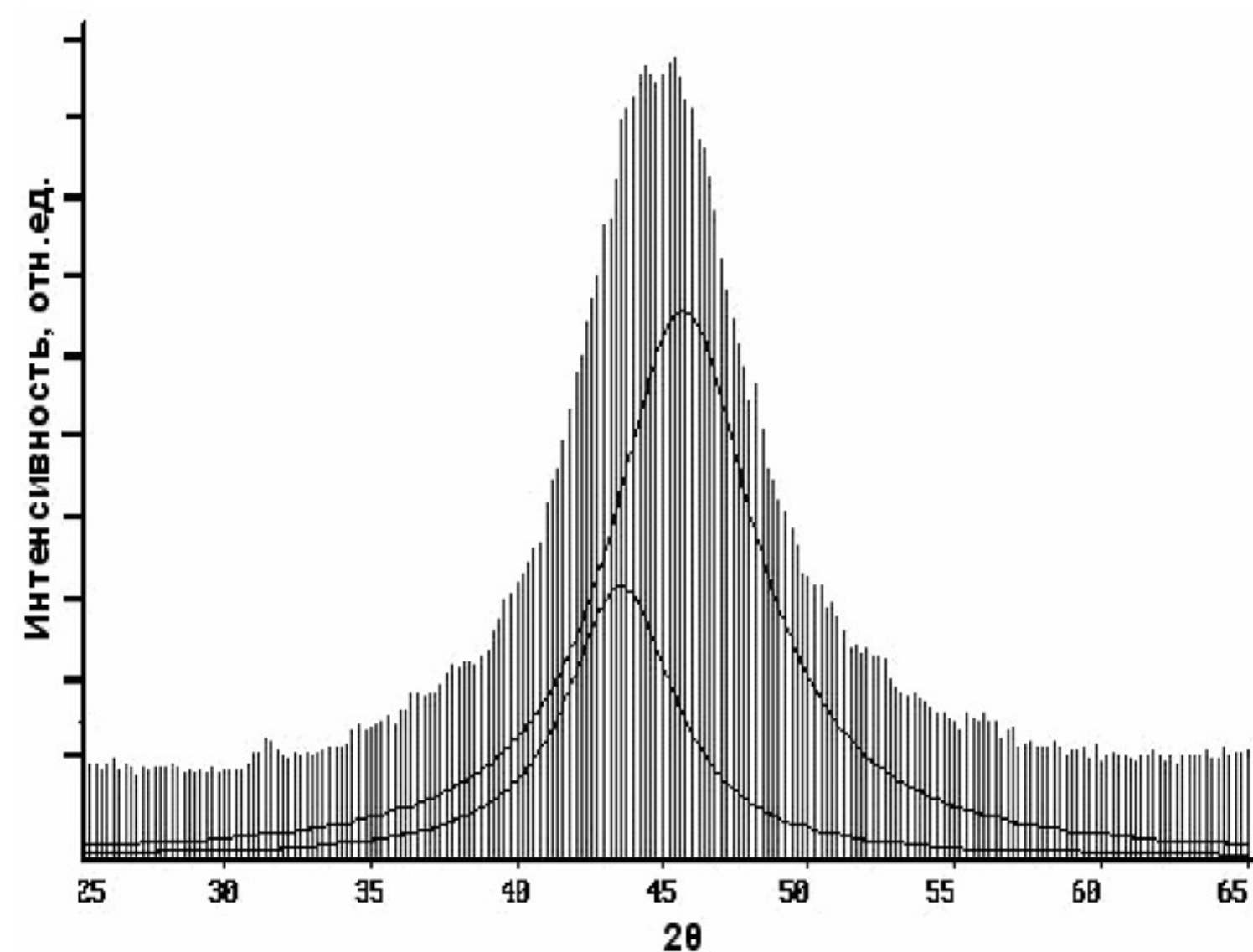


Рис. 5. Расщепление основного гало на синглеты для сплава $\text{Ni}_{44}\text{Fe}_{29}\text{Co}_{15}\text{Si}_2\text{B}_{10}$. $N=1$, $T=77$ К.

Структурное состояние сплавов, соответствующих максимальным значениям I_s после МПД, характеризуется наличием на рентгенограммах явной асимметрии профиля интенсивности основного гало, соответствующего аморфному состоянию. При этом как рентгеновские, так и электронно-микроскопические исследования не выявляют в большинстве случаев существования в этих состояниях нанокристаллических фаз. С помощью специальной компьютерной программы [5] нам удалось показать (рис. 5), что в структурных состояниях, соответствующих заметному увеличению намагниченности насыщения, асимметрия профиля рентгеновских гало обусловлена, скорее всего, наложением двух максимумов, соответствующих различным аморфным структурам. Иными словами, первоначально однородная аморфная матрица под действием МПД расслаивается на две аморфные фазы с различным химическим составом и, возможно, с различной атомной структурой.

§3. Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что МПД обработка способна существенно влиять на механические и на магнитные свойства аморфных сплавов, содержащих ферромагнитные компоненты. Обнаруженный нами эффект существенного возрастания намагниченности насыщения характеризуется рядом особенностей. Судя по рентгеновским данным (рис. 5) характер наблюдаемых нами зависимостей $I_s(N)$ и $H_c(N)$ непосредственно связан со структурными изменениями, происходящими под действием МПД именно в аморфной матрице. Под действием очень больших сдвиговых напряжений в неупорядоченной многокомпонентной структуре, по-видимому, происходит внутрифазовое расслоение на наномасштабные области (нанокластеры), обогащенные различными компонентами. Стимулом подобного расслоения могут быть как упругое, так и химическое взаимодействие между атомами металлов и неметаллов в аморфной матрице. Подобные эффекты расслоения исходно аморфного состояния на две аморфные фазы неоднократно наблюдались на стадии структурной релаксации для систем типа металл-металлоид [6]. Если обратиться к зависимостям $HV(N)$, то можно с уверенностью сказать, что уже при $N = 0.5$ в аморфной матрице происходят существенные структурные изменения, связанные с большими упругопластическими деформациями. Появление большой концентрации избыточного свободного объёма, ведущее к резкому снижению HV при $N = 0.5$, безусловно, стимулирует более активную миграцию атомов на следующем этапе МПД ($N = 1$). Таким образом, наряду с образованием деформационных полос сдвига при $N \approx 1$ в неупорядоченной структуре происходит активное образование различного типа кластеров типа металл-металл, металлоид-металлоид, а также металл-металлоид. Поскольку расслоение матрицы на две аморфные фазы ведет в нашем случае, за редким исключением, к заметному изменению (возрастанию или убыванию) намагниченности насыщения, разумно предположить, что в процессе МПД в структуре формируются области, обогащенные и соответственно обедненные ферромагнитными компонентами. Наблюдается интересная закономерность: в сплаве $Ni_{44}Fe_{29}Co_{15}Si_2B_{10}$, где имеются три ферромагнитных компонента (Fe, Ni и Co), эффект возрастания I_s при МПД – обработке максимальный; а в сплаве $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$, где имеется один ферромагнитный (Fe) и один антиферромагнитный (Cr) компонент, вместо прироста наблюдается снижение I_s .

Кратко остановимся на перспективах практического использования полученных нами результатов. В результате МПД обработки по оптимальным режимам имеется возможность существенно повысить значение намагниченности насыщения – “слабого звена” аморфных и нанокристаллических магнитно-мягких сплавов при сохранении малых значений коэрцитивной силы. Это даёт основания предполагать, что результаты данной работы могут лечь в основу получения нового класса перспективных магнитно-мягких материалов. Вместе с тем, требуются, несомненно, дополнительные тщательные исследования, которые приведут к практическому применению аморфных сплавов, обработанных методом МПД.



Выводы

1. Показано, что в результате мегапластической деформации аморфных сплавов на основе железа и никеля, содержащих ферромагнитные компоненты, происходит существенное изменение намагниченности насыщения.
2. Установлено, что положительный эффект изменения намагниченности насыщения в результате осуществления мегапластической деформации тем выше, чем большее число ферромагнитных компонентов имеется в аморфном сплаве.
3. Показано, что на ранних стадиях мегапластической деформации при сохранении аморфной структуры сплавов происходят существенные изменения параметров рентгеновских спектров и заметное снижение микротвёрдости и рост коэрцитивной силы.

Исследование выполнено в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы (Госконтракт № 14.740.12.0865 по обобщенной теме «Исследование новых конструкционных и функциональных материалов и технологий их обработки») на оборудовании Центра коллективного пользования «Диагностика структуры и свойств наноматериалов» НИУ «БелГУ».

Литература

1. McHenry M.E., Willard M.A., Laughlin D.E. // Prog. Mater. Sci. – 1999. – 44. – P.291.
2. Yoshizawa Y.S., Oguma K., Yamauchi K. // J. Appl. Phys. Vol. – 1989. – 64. – P.6044.
3. Глезер А.М., Плотникова М.Р., Шалимова А.В., Добаткин С.В. // Изв. РАН. Серия Физическая. – 2009. – 73;9. – С.1302.
4. Deryagin A.I., Zavalishin V.A., Sagaradze V.V. et al // FMM. – 2008. – 106. – P.1.
5. Шелехов Е.В., Свиридова Т.А. // МиТОМ. – 2000. – № 8. – С.16.
6. Inoue A. // Acta Mater. – 2000. – 48. – P.279.



**EFFECT OF SEVERE PLASTIC DEFORMATION
ON THE STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES
OF AMORPHOUS NICKEL- AND FERRUM-BASED ALLOYS**

A.M. Glezer, M.R. Plotnikova

Central Research Institute for Ferrous Metallurgy,
2-nd Baumanskaya st., 9/23, Moscow, 105005, Russia. e-mail: gretxen@rambler.ru

Abstract. The influence of severe plastic deformation in the Briggmann chamber on the structure and magnetic properties of amorphous nickel- and ferrum-based alloys produced by melt quenching has been studied. Essential change of the saturation magnetization depending on the quantity of ferromagnetic components in amorphous alloys has been set. At the early stages of severe deformation, it has shown that parameters of X-ray spectra are noticeably changed, microhardness is decreased and coercive force is increased while amorphous structure survived.

Keywords: severe plastic deformation, amorphous alloys, saturation magnetization.