

УДК 669.715

И. В. Слинкин*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

**i.v.slinkin@yandex.ru*,

Научный руководитель – проф. кафедры физики ИнФО, д-р физ.-мат. наук *О. А. Чикова*

ИЗМЕРЕНИЕ НАНОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МАГНИТОВ SmCo

Изучены наномеханические свойства спеченных редкоземельных магнитов SmCo марки КС-37. Методом наноиндентирования измерены твёрдость по Викерсу HV(МПа) и модуль Юнга E(ГПа) фазовых составляющих Sm_2Co_{17} и $SmCo_5$. Полученные результаты обсуждаются с позиций современных представлений о материалах аддитивного производства.

Ключевые слова: наноиндентирование, редкоземельные магниты, аддитивные технологии, наномеханические свойства.

I. V. Slinkin

NANOMECHANICAL PROPERTIES OF RARE-EARTH MAGNETS SmCo

Nanomechanical properties of the sintered rare-earth magnets SmCo of grade KS-37 are studied. Hardness and Young's modulus of phase Sm_2Co_{17} and $SmCo_5$ were measured by nanoindentation method. Results are discussed within the modern concept about additive technologies.

Keywords: nanoindentation, rare earth magnets, additive technologies, nanomechanical properties.

Редкоземельные магниты в настоящее время широко используются благодаря тому, что позволяют существенно уменьшить габариты приборов и создавать высокие магнитные потоки. Большинство научно-исследовательских работ в области магнитных материалов направлено на изучение их магнитных свойств, в то время как данных по изучению механических свойств практически нет [1]. Известно, что «механические свойства магнитов в значительной степени зависят от конкретных условий производства, от размеров и формы магнита, а также фирмы, производящей магниты, если даже материал остаётся тем же самым. Магниты, как и все хрупкие материалы, характеризуются широким разбросом значений напряжений при разрушении. Анизотропия и

магнестрикционные напряжения также способствуют разрушению магнитов» [1]. Авторами [8] изучена ударная прочность редкоземельных магнитов SmCo марок KC37 и KC25 согласно ГОСТ 21559–76 [9]. Установлено, что магниты с пониженной прочностью к ударной нагрузке имеют повышенную плотность и магнитные свойства, обнаруживают микротрещины, характерные для «переспеченных» магнитов, и более крупные зерна [8]. Авторами [8] рекомендован технологический процесс изготовления магнитов SmCo, заключающийся в снижении температуры спекания и скорости шлифования, увеличении содержания в составе сплава фазы Sm₂Co₁₇ до 3–5 мас. % и применения в особых случаях жидкофазного спекания. Использование в технологическом процессе данных мероприятий позволяет увеличить выход годной продукции на 7–10 %.

С появлением и развитием методов сканирующей зондовой микроскопии, в т.ч. и непрерывного измерительного наноиндентирования [4–5], стала возможной оценка некоторых важных характеристик материалов в пределах отдельных субмикроструктурных объемов, в частности, твёрдости, модуля Юнга, пластичности, напряжения течения и ряда других. В работах [5–6] подробно описан эксперимент по определению методом наноиндентирования твердости и модуля Юнга в алюминиевых сплавах. В частности, обнаружено, что величина модуля Юнга сильно деформированного материала зависит от его структурного состояния. Модуль Юнга понижается с ростом степени дефектности структуры и повышается при ее релаксации. Причины обнаруженного изменения модуля упругости объясняются с позиций современных представлений о механизмах интенсивной пластической деформации сплавов. Для оценки причин повышения прочности спеченных редкоземельных магнитов Sm₂Co₁₇ марки KC-37, авторы продолжили эксперименты и, исходя из возможностей метода наноиндентирования, определили для этих сплавов, такие характеристики как твердость и модуль Юнга основных фазовых составляющих Sm₂Co₁₇ и SmCo₅. Результаты этих экспериментов изложены в данной работе.

В работе исследовали объемные образцы спеченных редкоземельных магнитов Sm₂Co₁₇. Измерение модуля Юнга E(ГПа) и твёрдости HV(МПа) отдельных кристаллитов Sm₂Co₁₇ и SmCo₅ проводили методом наноиндентирования с помощью НаноСкан-4D (ФБГНУ ТИСНУМ, Россия) в соответствии с требованиями ГОСТ Р8.748–2011(ISO 14577). При проведении эксперимента применяли зондовый датчик, в качестве рабочей части которого используется алмазная призма Берковича. Для управления работой НаноСкан-4D использовали ПО NanoScan Device, для получения, хранения и статистической обработки результатов измерений – ПО NanoScan Viewer. Измерение осуществляли в условиях непрерывного нагружения линейно нарастающей во времени

нагрузкой до 50 мН при комнатной температуре. Нагружение и разгрузка индентора, а также запись диаграммы $P-h$ (прикладываемая нагрузка – глубина внедрения индентора) осуществлялись автоматически. Значения твёрдости и модуля Юнга микроструктурных элементов определяли в результате 50 измерений для каждой из фаз. Размер отпечатка индентора измеряли при максимальной глубине погружения индентора. Максимальная глубина отпечатка при нагрузке 50 мН составляла 0,4 мкм (рис. 1).

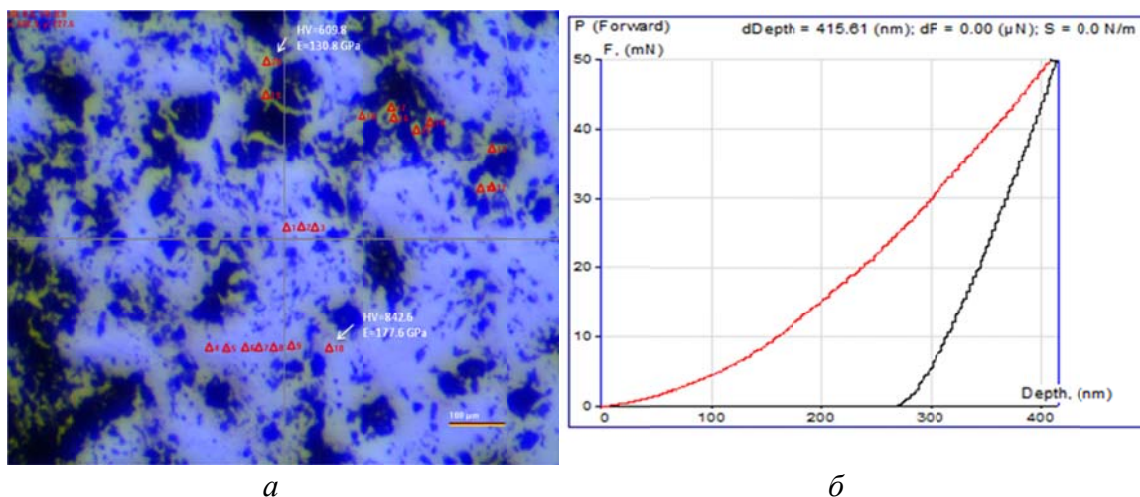


Рис. 1. Микроструктура спеченного магнита KC-37 (а) и типичный протокол измерений для фазы SmCo_5 (б)

Для обработки результатов испытаний использовали метод Оливера и Фара [3]. Образцы для исследования в виде дисков подвергали механической полировке, в результате чего высота неровностей поверхности не превышала 10 нм.

Микроструктура спеченного магнита SmCo марки KC-37(рис. 1) в основном состоит из первичных дендритов $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ и SmCo_5 , их наномеханические свойства – твердость по Викерсу HV (МПа) и модуль Юнга E(ГПа) – измерены в данной работе. Ранее проведены измерения микротвердости HV интерметаллидных фаз $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ – 600 ± 50 Н/мм²; SmCo_5 – 840 ± 50 Н/мм² [2]. Учитывая, что максимальный размер отпечатка при нагрузке до 50 мН сопоставим с масштабом кристаллитов, можно считать, что результат измерений для каждого отпечатка относится к объему, заключенному внутри одного кристаллита, и не учитывает вклад от границ. На рис. 2 и в табл. 1 приводятся экспериментальные данные, полученные при наноиндентировании образца спеченного магнита SmCo марки KC-37.

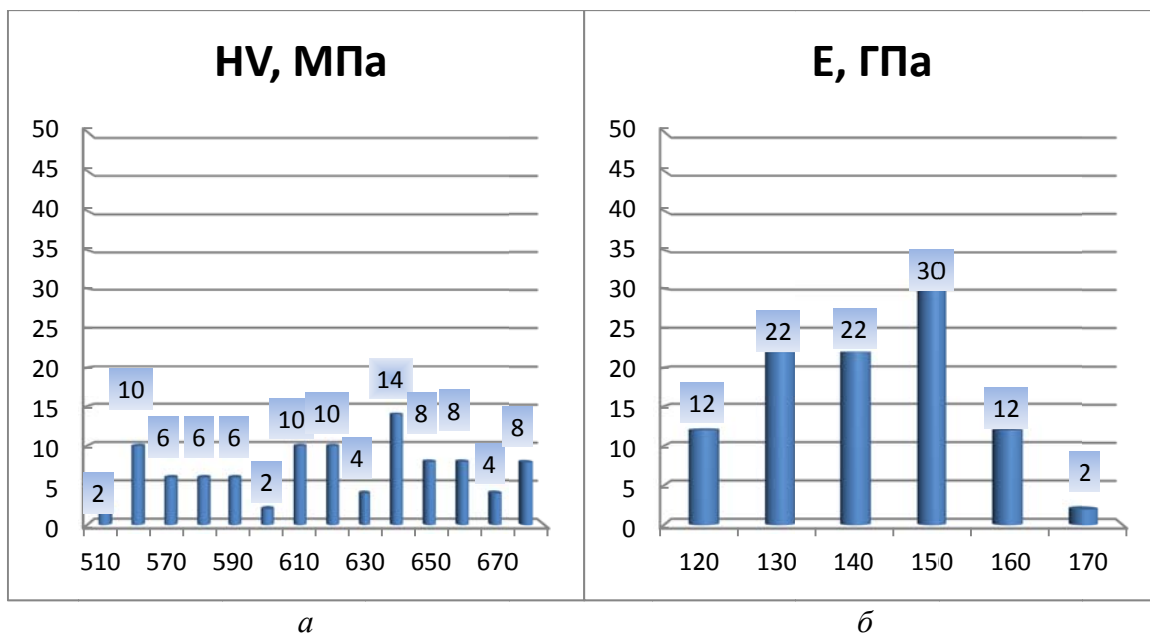


Рис. 2. Гистограммы распределения модуля твёрдости HV(МПа) (а) и Юнга E(ГПа) (б) для фаз $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

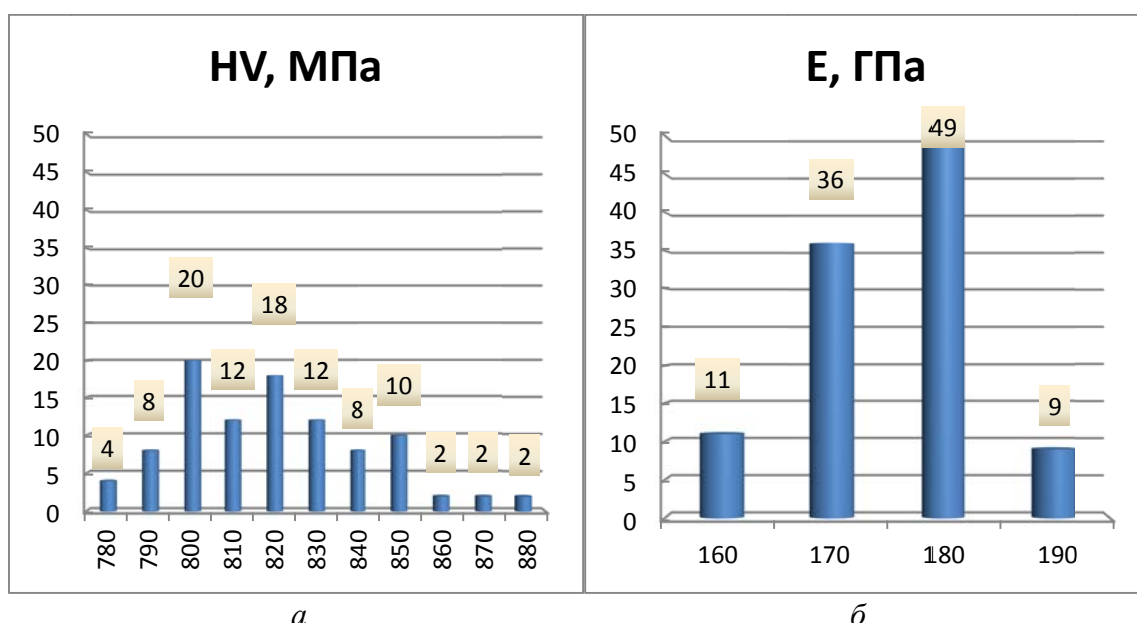


Рис. 3. Гистограммы распределения модуля твёрдости HV(МПа) (а) и Юнга E(ГПа) (б) для фаз SmCo_5

Из анализа данных опыта (рис. 2, 3) видно, что наблюдается по одному ярко выраженному пику, соответствующему средним значениям модуля Юнга E. Такой вид гистограмм E свидетельствует о перераспределении дефектов кристаллической решетки внутри кристаллитов $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ и SmCo_5 в результате спекания и термообработки. Обращает внимание существенное различие случайного разброса значений твёрдости HV (при доверительной вероятности 95 %) для $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ и SmCo_5 – в 2 раза, что свидетельствует

о более высокой степени однородности механических свойств для $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$.

Таблица

Твердость HV(МПа) и модуль Юнга E(ГПа) $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ и SmCo_5

Фаза	Твердость HV, МПа	Модуль Юнга E, ГПа
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	619 ± 11	141 ± 3
SmCo_5	819 ± 6	175 ± 2

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрнат К. Д. Ж. Магниты из сплавов редкоземельных металлов с кобальтом / К. Д. Ж. Стрнат. Москва : Металлургия, 1978. С. 11–33.
2. Головин Ю. И. Наноиндентирование и механические свойства материалов в наношкале (обзор) // ФТТ. 2008. Т. 50, № 12. С. 2113–2142.
3. Oliver W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Research. 1992. V. 7, № 6. P. 1564–1583.
4. Смирнов С. В. Методика исследования сопротивления деформации на атомно-силовых микроскопах и нанотвердомерах / С. В. Смирнов, Е. О. Экземплярова (Смирнова) // Изв. Вузов. Черная металлургия. 2010. № 1. С. 68–69.
5. Гоголинский К. В. Применение сканирующих зондовых микроскопов и нанотвердомеров для изучения механических свойств твердых материалов на наноуровне / К. В. Гоголинский, Н. А. Львова, А. С. Усеинов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов № 6. 2007. Т. 73. С. 28–36.
6. Мильман Ю. В. Энергетическая концепция твердости при инструментальном индентировании / Ю. В. Мильман, К. Э. Гринкевич, Л. В. Мордель // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 1. С. 2–9.
7. Чикова О. А. Определение методом наноиндентирования модуля Юнга субмикрористаллических сплавах В95 и АМц, полученных динамическим прессованием / О. А. Чикова, Е. В. Шишкина, А. Н. Петрова, И. Г. Бродова // Деформация и разрушение. 2013. № 8. С. 43–48.
8. Устойчивость редкоземельных металлов к ударной нагрузке / Г. П. Станолевич [и др.] // Вопросы электромеханики Т. 139. 2014. С. 35–43.
9. ГОСТ 21559–76 Материалы магнитотвёрдые спечённые. Марки. Введ. 1977–07–01. Москва : Издательство стандартов, 1976. 36 с.