

**Сорокин А.М.**

**Главный технолог АО НПО “Магнетон”**

**Россия, г. Владимир,**

**Кутенов А.В.**

**Главный специалист АО НПО “Магнетон”**

**Россия, г. Владимир**

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ИЗ МАТЕРИАЛА КС37А**

**Аннотация:** В настоящей статье приведены результаты исследований механических характеристик (предела прочности на сжатие ( $R_{cm}$ ), модуля Юнга ( $E$ ) и предела прочности на изгиб ( $R_{bm}$ )) постоянных магнитов (ПМ) из материала КС37А. Установлено, что все исследованные механические характеристики зависят от направления приложения нагрузки (вдоль или поперек текстуры ПМ). Кроме того обнаружено, что после намагничивания образцов ПМ их механические характеристики значительно (до 20%) изменяются.

**Ключевые слова:** постоянные магниты, сплав  $SmCo_5$ , текстура, механические характеристики.

**Annotation:** This article presents the results of studies of mechanical characteristics (compressive strength ( $R_{cm}$ ), Young's modulus ( $E$ ) and bending strength ( $R_{bm}$ )) permanent magnets (PM) made of KS37A material. It is established that all the studied mechanical characteristics depend on the direction of application of the load (along or across the PM texture). In addition, it was found that after magnetization of PM samples, their mechanical characteristics change significantly (up to 20%).

**Keywords:** *permanent magnets, SmCo<sub>5</sub> alloy, texture, mechanical characteristics.*

Редкоземельные постоянные магниты (ПМ) на основе сплава SmCo<sub>5</sub> широко используются в различных устройствах, эксплуатирующихся при высоких температурах (до 350°C) [1]. Магнитные свойства и химический состав данных материалов регламентируются ГОСТ 21559–76 [2], согласно которого они подразделяются на различные марки в зависимости от своей остаточной магнитной индукции Br. При этом в [2] никаких сведений по их механическим свойствам не приводится. Это объясняется тем, что магнитные материалы на основе сплавов SmCo<sub>5</sub> не являются конструкционными и разработчики устройств должны предусмотреть такое их применение (защитные бандажки и т.п.), которое исключает непосредственное воздействие механических нагрузок на ПМ.

Однако в последнее время в связи с тенденциями по миниатюризации и удешевления продукции активно разрабатываются устройства, в которых ПМ SmCo<sub>5</sub> используются в качестве рабочих конструктивных элементов, испытывающих значительным механическим воздействиям [3]. При этом полных данных по их прочностным характеристикам, как и научных работ в данной области практически нет. Так в [4] приведены результаты исследований воздействия только ударных нагрузок и вибрации на ПМ SmCo<sub>5</sub> марки КС37, а в [5] изучены наномеханические свойства, отдельных фаз, содержащихся в ПМ SmCo<sub>5</sub> марки КС37. Кроме того, во всех рассмотренных источниках не учитывался тот факт, что все редкоземельные ПМ имеют ярко выраженную кристаллографическую анизотропию, что приводит к анизотропии физических (магнитных, механических и т.д.) их свойств. При этом наибольшие различия наблюдаются в направлении вдоль магнитной текстуры (межполюсного расстояния) и перпендикулярно ей.

В данной статье приведены результаты исследований механических характеристик ПМ из материала КС37А, который согласно [2] обладает наивысшими магнитными свойствами из всего многообразия сплавов  $\text{SmCo}_5$ , и, соответственно, имеет наивысшие внутренние механические напряжения в намагниченном состоянии.

Так как все ПМ работают в условиях воздействия встречных полей, которые реализованы в принципах действия всех электрических машин, то они испытывают только два механических воздействия: сжатие и изгиб [3]. Соответственно, для проведения прочностных расчетов ПМ необходимы значения следующих механических характеристик:

- предел прочности на сжатие по межполюсному расстоянию ПМ и в одном из поперечных направлений;
- модуль Юнга по межполюсному расстоянию ПМ и в одном из поперечных направлений;
- предел прочности на изгиб по межполюсному расстоянию ПМ и в одном из поперечных направлений.

В данной работе все вышеуказанные механические характеристики были определены на намагниченных и ненамагниченных образцах ПМ из материала КС37А.

Образцы ПМ для исследований были изготовлены по технологии порошковой металлургии [1]. Выплавку сплава  $\text{SmCo}_5$  проводили в дуговой печи в атмосфере аргона. После зачистки слитки измельчали в два этапа. На первом этапе производилось механическое измельчение в конусно-инерционной дробилке в среде аргона до частиц с размером не более 0,5 мм. Окончательное измельчение проводилось в вибрационной мельнице в среде изопропилового спирта в течении 150 – 170 минут до получения среднего размера частиц 2,4 - 2,6 мкм.

Далее, высушенные в сушильном шкафу порошки прессовали в ручной пресс-форме, которую помещали между полюсами электромагнита с напряженностью магнитного поля более 2500 кА/м.

Спекание образцов после прессования осуществляли в вакуумных печах в течении 30 минут при температуре 1220 – 1235°С при остаточном давлении не более 0,001 Па. Спеченные образцы обрабатывали на плоскошлифовальном станке для придания им призматической формы и размеров 5×5×20 мм (с межполюсным расстоянием 5 мм).

Измерения магнитных свойств образцов проводили на установке “Permagraph С-300”. Все образцы ПМ по магнитным параметрам соответствовали требованиям [2]. Определение всех механических характеристик проводили на универсальной разрывной машине 25 ST с программным обеспечением HORIZON.

Измерение предела прочности на сжатие ( $R_{cm}$ ) и модуля Юнга ( $E$ ) проводили согласно методике [6] ГОСТ 25.503–97. Для этого исследуемый образец ПМ, уложенный на одну из граней с размерами 5 x 20 мм нагружали до разрушения. Определение предела прочности на изгиб ( $R_{bm}$ ) проводили по методике ГОСТ 20019–74 [7]. При этом образец, уложенный на две опоры с межосевым расстоянием 18 мм, разрушали нагрузкой, приложенной перпендикулярно к образцу в середину расстояния между опорами.

Усредненные по результатам 5 измерений, механические свойства образцов ПМ, а также их среднеквадратичные отклонения приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Механические характеристики ПМ из материала КС37А

Состояние ПМ	Направление замера	Механические характеристики		
		Предел прочности на сжатие, $R_{cm}$ , МПа	Предел прочности на изгиб, $R_{bm}$ , МПа	Модуль Юнга, $E$ , ГПа
Намагниченный	Вдоль текстуры	812±4	118±2	137±3
	Поперек текстуры	1009±6	114±2	142±4
Немагнитный	Вдоль текстуры	926±3	109±3	143±5
	Поперек текстуры	861±3	121±2	156±6

Как видно из результатов, представленных в таблице 1, все исследованные механические характеристики зависят от направления приложения нагрузки (вдоль или поперек текстуры ПМ). Так, например, предел прочности на сжатие, измеренный вдоль текстуры немагнитного образца, почти на 10% больше значения измеренного поперек направления текстуры.

С другой стороны, предел прочности на изгиб и модуль Юнга, измеренные вдоль текстуры на 8-10% меньше значений, полученных поперек текстуры. Такое различие в величинах механических характеристик ПМ можно объяснить только анизотропией механических свойств основной магнитной фазы  $SmCo_5$  вдоль различных направлений в кристаллической решетке.

Обращает внимание значительные изменения в значениях механических свойств механических характеристик ПМ после их намагничивания. Например, предел прочности на сжатие, измеренный вдоль текстуры образцов после их намагничивания падает почти на 10%, а, измеренный поперек текстуры, возрастает почти на 20%.

Такое поведение намагниченных образцов ПМ, вероятнее всего, объясняется тем, что все редкоземельные магнитные материалы являются одновременно и магнотриксционными [1]. Причем, в намагниченном состоянии их размеры вдоль текстуры в результате внутренних напряжений увеличиваются, а в направлении поперек текстуры - уменьшается. Соответственно, если внутренние магнотриксционные напряжения будут суммироваться с приложенной внешней механической нагрузкой, то разрушение образцов начнется при меньших значениях последней, что и наблюдается, например, для предела прочности на сжатие, измеренного вдоль направления текстуры.

Таким образом, в результате проведенных исследований показана анизотропия основных механических характеристик ПМ из материала КС37А и установлены их величины.

Работа выполнена в рамках договора между НИТУ «МИСИС» (г.Москва) и АО НПО «Магнетон» (г. Владимир) от «27» сентября 2017 года о софинансировании и дальнейшем использовании результатов проекта по теме: «Разработка технологии получения магнитотвердых магнитных материалов и магнитных систем на их основе для нового поколения низкопольных МРТ».

### Список литературы:

1. Gorbachev, E.A. Design of modern magnetic materials with giant coercivity / E.A.Gorbachev, E.S.Kozlyakova, L.A.Trusov, A.E.Sleptsova, M.A.Zykin, P.E.Kazin // Russian Chemical Reviews.– 2021.– V.90(10).– p. 1287 – 1329.
2. ГОСТ 21559 –76. Материалы магнитотвёрдые спечённые. Марки. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 36 с.
3. Исмагилов, Ф.Р. Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами/ Ф.Р Исмагилов, А.А. Герасин, И.Х. Хайруллин, В.Е.Вавилов.– М.: Машиностроение, 2014.– 267 с.
4. Станолевич, Г.П. Устойчивость редкоземельных металлов к ударной нагрузке / Г.П. Станолевич, Н.В. Федосеев, С.А. Тимаков, С.Л. Борисов // Вопросы электромеханики. – 2014. – Т. 139. – С. 35 – 43.
5. Слинкин, И.В. Измерение наномеханических свойств редкоземельных магнитов SmCo / И.В. Слинкин // Материалы XVIII Международного Уральского научно-технического семинара. Екатеринбург, 21-23 ноября 2017. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – С. 450 – 454.
6. ГОСТ 25.503–97. Расчеты и испытания на прочность. Метод механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. – Минск: Издательство стандартов, 1997. – 25 с.
7. ГОСТ 20019 –74. Сплавы твердые спеченные. Метод определения предела прочности при изгибе. – М.: Издательство стандартов, 1986. –11 с.