

**Векишин Б.С., Камынин А.В., Прокофьев П.А.,
Ситнов В.В., Хотулев Е.С., Эверстов А.А.**
АО «Спецмагнит»

Новые технологии в производстве постоянных магнитов системы Sm-Co-Fe-Cu-Zr

Представлена современная технология производства постоянных магнитов системы Sm-Co-Fe-Cu-Zr с характеристиками мирового уровня. Особенность данной технологии заключается в комбинации гидростатического (всестороннего) сжатия с одновременной одноосной деформацией пресс-заготовок магнитов. Технология прессования (компактирования) на основе выполнения линейной деформации в условиях всестороннего гидростатического сжатия является прорывной и не имеет аналогов в мировой литературе.

Ключевые слова: Постоянные магниты, РЗМ-магниты, самарий-кобальт, KC25ДЦ, пресс-заготовка, гидростатическое прессование, всестороннее сжатие.

Известно, что порядка 22% от добываемого объема РЗМ сегодня в мире идет на производство высокоэнергетических постоянных магнитов, производство которых, в годовом исчислении, составляет более 60 тыс. тонн. Лидером в добыче и переработке является КНР, на долю которого приходится до 95% из этого объема. Значительные запасы РЗМ, высокое содержание и низкая себестоимость позволили КНР установить контроль над рынком редких земель. Зависимость остальных стран, включая и Россию, от импорта РЗМ в связи с высокой волатильностью цен и проводимой политикой КНР в области квотирования экспорта создает определенные трудности в планировании и развитии собственного производства [1].

В настоящее время для производства магнитов в России сложились так называемые «ценовые ножницы»: удельная стоимость шихтовых материалов китайского происхождения на килограмм готового магнита китайского же производства составляет около 35% для магнитов $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ и около 90% для магнитов NdFeB. Все это привело к тому, что отечественные производители в совокупности выпускают в год не более 150 тонн магнитов, в основном для военного и специального применения. Остальные потребности гражданского рынка покрываются за счет импорта [2].

Основной целью подпрограммы «Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов» государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» является создание в РФ конкурентоспособной редкоземельной промышленности полного технологического цикла для удовлетворения потребностей отечественного ОПК, гражданских отраслей промышленности и выхода на зарубежные рынки. АО «Спецмагнит», исполнитель данной программы в части использования РЗМ, в 2016 году разработал две технологии для производства самарий-кобальтовых магнитов с характеристиками мирового уровня. В настоящее время они прошли опытную отработку, переданы в производство и готовы к коммерциализации. Целью всей работы являлось создание постоянных магнитов с повышенными потребительскими свойствами с использованием более совершенных

технологий, позволяющих существенно увеличить выход годной продукции и уменьшить себестоимость.

Как правило, при производстве постоянных магнитов используются металлические пресс-формы. Наличие сил трения между стенками и порошком приводит к неравномерной плотности заготовок. Спекание заготовки с неравномерной плотностью приводит к не полному выравниванию плотности спеченной заготовки по объему, что влечет неоднородность магнитных свойств конечных изделий. Нами разработана современная технология компактирования пресс-заготовок магнитов из сплава КС25ДЦ [3]. Новый метод основан на комбинации гидростатического (всестороннего) сжатия с одновременной одноосной деформацией. Общий вид установки гидростатического допрессовывания представлен на рисунке 1.



Рис.1 Гидростатический пресс

Полученные прессовки спекались в интервале температур 1463 – 1493 К, с последующим гомогенизирующим отжигом при $T=1445-1150$ К и низкотемпературной обработкой при 1073–673 К. В таблице 1 приведены данные плотности и магнитных свойств постоянных магнитов при спекании при различных температурах (технологические режимы: средний размер частиц после размолва составляет 4 – 6 мкм, давление прессования – 100 МПа, текстурующее магнитное поле – 1,45 Тл, термическая обработка – 1073 К, 16 часов с последующим охлаждением до 673 К в течение 6 часов). Как видно из таблицы, наиболее высокие свойства получены при температуре спекания 1483 К. Дальнейшее увеличение температуры спекания приводит к ухудшению магнитных свойств магнитов, по-видимому, за счет ухудшения текстуры магнитов, повышенному испарению и окислению самария.

Таблица 1. Зависимость плотности и магнитных свойств магнитов типа Sm-Co-Fe-Cu-Zr от температуры спекания

Температура спекания, °С	1190	1200	1210	1220
Температура спекания, К	1463	1473	1483	1493
Плотность, кг/м ³ · 10 ⁻³	7,67	8,10	8,28	8,32
Остаточная магнитная индукция, Тл	0,87	1,06	1,10	0,93
Коэрцитивная сила по намагниченности, кА/м	2000	1900	2080	1420
Энергетическое произведение, кДж/м ³	135	205	235	158

На рисунке 2 представлена, соответствующая максимальному уровню магнитных свойств, микроструктура поверхности перпендикулярной плоскости текстуры постоянных магнитов, после спекания при температуре 1483 К.

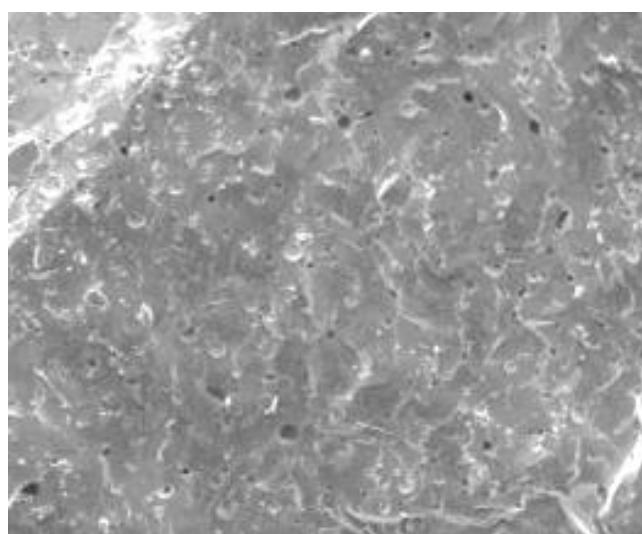


Рис.2. Макроструктура ПМ после спекания при температуре 1483 К

Для более детального исследования микроструктуры спеченных магнитов типа Sm-Co-Fe-Cu-Zr использовалась растровая микроскопия. На рисунке 3 представлена микроструктура образца магнитов после оптимальной двустадийной термической обработки, характерной для сплавов семейства КС25ДЦ. Как видно из рисунка, образцы обладают однородной структурой. Этому состоянию соответствуют максимальные магнитные свойства.

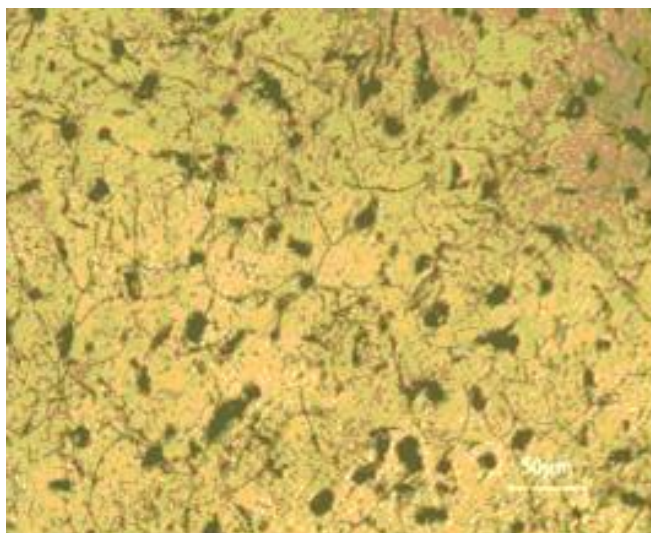


Рис.3. Микроструктура ПМ после травления при температуре спекания 1483К

До создания АО «Спецмагнит» описанных технологий: изготовления и резки заготовок с повышенными до мирового уровня магнитными характеристиками, российский потребитель мог приобрести постоянные магниты данного класса только за рубежом. Программой предусмотрено к 2020 году появление условий, при которых будут введены в эксплуатацию месторождения РЗМ, разработаны и адаптированы ключевые технологии их производства, в том числе по разделению и производству чистых индивидуальных оксидов. На наш взгляд, для развития отечественной промышленности производства постоянных магнитов необходимо решать две задачи: обеспечение своей сырьевой базы и реализация программы по техпервооружению и импортозамещению.

Библиографический список

1. MetalResearch LLC Мировой рынок редких и редкоземельных металлов 2015, аналитический обзор. Россия, Екатеринбург, 2015
2. Рынок электродвигателей. Текущая ситуация и прогноз 2016-2020 гг. - Пермь: Alto Consulting Group, 2015.-601 с.
3. ГОСТ 21559-76 Материалы магнитотвердые спеченные. Марки