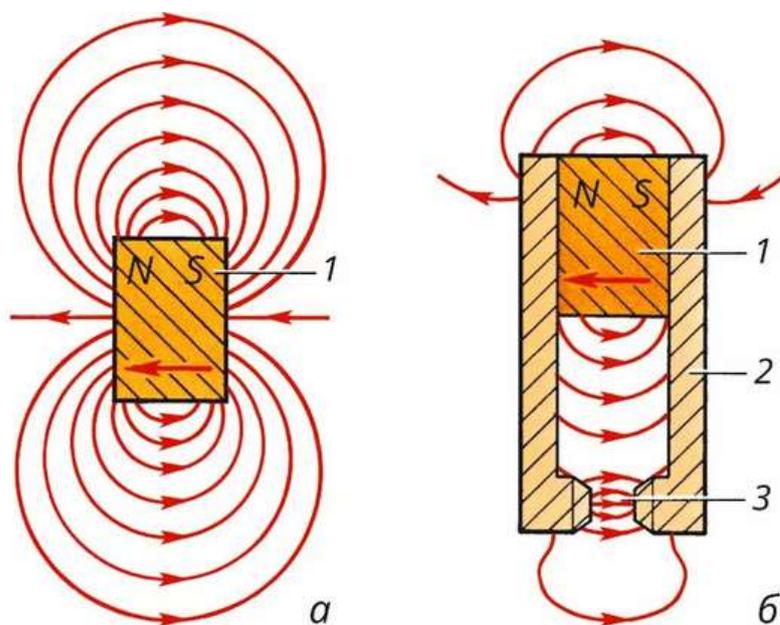


## Постоянный магнит

**Постоянный магнит**, тело, создающее постоянно действующее заданное распределение магнитного поля в окружающей среде. Постоянные магниты относятся к одному из десятков классов существующих магнитных материалов (Buschow. 2004). В настоящее время постоянные магниты изготавливают из магнитотвёрдых материалов (МТМ) с высокой магнитной анизотропией (Kuz'min. 2008), что обеспечивает способность постоянных магнитов в значительной степени сохранять свои свойства в течение длительного времени (до 50 лет и более) под действием сильных внешних размагничивающих полей, высокой температуры, вибрации и ударных нагрузок.



*a* – без магнитопровода; *б* – с магнитопроводом;  
1 – постоянный магнит; 2 – магнитопровод; 3 – рабочий объём; *N* и *S* – полюса постоянного магнита.

Рис. 1. Картина магнитного поля постоянных магнитов.

При намагничивании внешним постоянным или импульсным магнитным полем постоянный магнит приобретает намагниченность, величина которой зависит от марки МТМ. Одновременно у торцов постоянного магнита возникает пара разноимённых магнитных полюсов, на которых замыкаются линии магнитной индукции, образующие внешний магнитный поток постоянного магнита (рис. 1, *a*). Магнитное поле полюсов в теле постоянного магнита частично размагничивает его (размагничивающий фактор зависит от марки МТМ, формы и соотношения размеров магнита). Для уменьшения

размагничивания к торцам постоянного магнита присоединяют магнитопровод из магнитомягкого материала. В результате этого магнитный поток концентрируется в ограниченном воздушном зазоре (рис. 1, б). Современные постоянные магниты (например, на основе сплава неодим – железо – бор, NdFeB,) обладают высокой устойчивостью к размагничиванию и могут использоваться практически без магнитопровода. Это значительно уменьшает габаритные размеры и массу многих устройств. Широко применяются кольцевые магниты с несколькими парами разноимённых полюсов, для создания которых используют специальные приёмы намагничивания.

### **Технологии производства постоянных магнитов**

Слабые постоянные магниты часто встречаются в природе в железной руде (магнетит, оксид железа  $Fe_3O_4$ , который на поверхности может быть намагничен, например электрическими токами при ударах молнии). Образец магнитного железняка показан на рис. 2.



Рис. 2. Магнитный железняк производства фирмы Max&Kohl Chemnitz.  
Конец 19 – начало 20 вв.

Открытие плавения железа привело к созданию 1-го искусственного постоянного магнита – стальной иглы. В настоящее время размеры, форма, цена, тип покрытия, количество пар полюсов, важнейшие энергетические характеристики [максимальное энергетическое произведение  $(BH)_{max}$  ( $B$  и  $H$  – индукция и напряжённость магнитного поля соответственно; чем больше эта величина, тем более мощным является магнит)], устойчивость к размагничиванию (коэрцитивная сила) и направление намагничённости могут существенно отличаться и в значительной степени зависят от марки МТМ и решаемой технической задачи. Бурное развитие технологии производства

МТМ только за последнее столетие привело к увеличению  $(BH)_{max}$  в 100 раз – до 54 МГс·Э (рис. 3). Это позволило пропорционально уменьшить размер и массу самих постоянных магнитов и устройств на их основе.

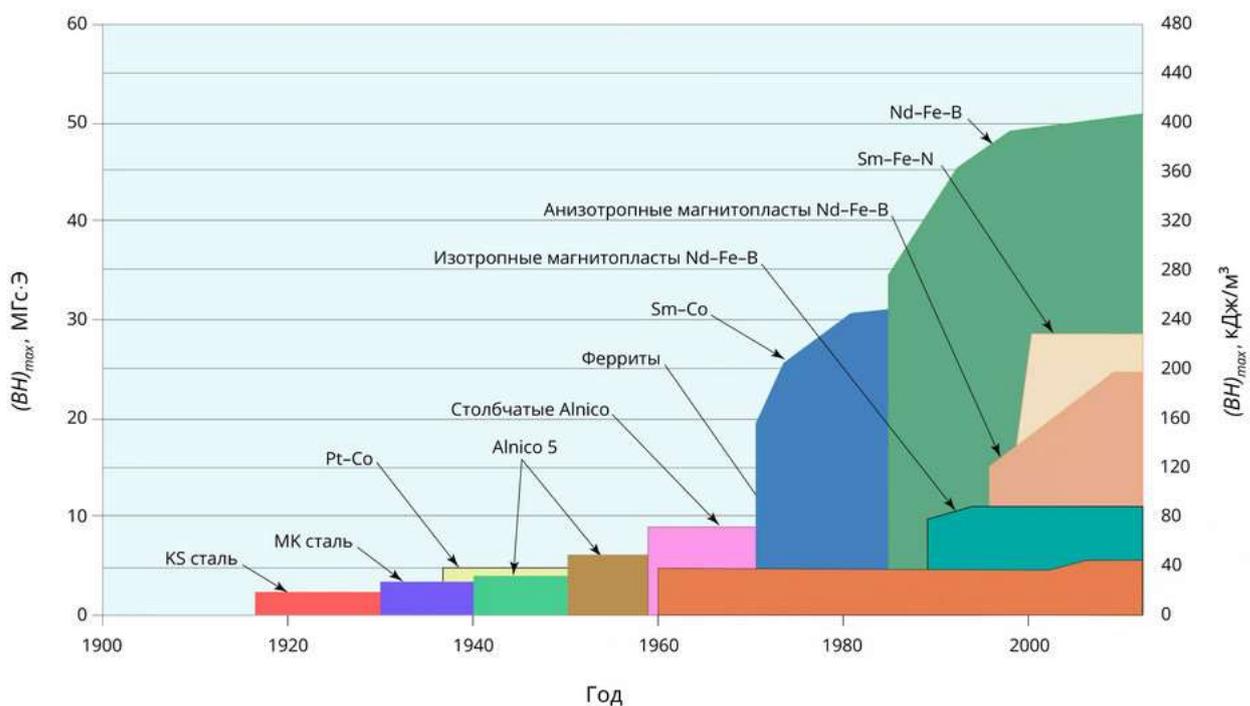


Рис. 3. Развитие технологии производства магнитотвёрдых материалов.

Современные технологии производства МТМ направлены не только на улучшение энергетических характеристик МТМ (например, за счёт уменьшения размера зерна), но и на снижение весового содержания дорогостоящих элементов (как за счёт изменения технологии производства, например применения поверхностной диффузии диспрозия в постоянных магнитах марки NdFeB, так и за счёт замещения неодима более дешёвым церием). Теоретические расчёты показывают, что в будущем нанокompозитные постоянные магниты могут как целиком состоять из МТМ, так и иметь включения из магнитомягких материалов, позволяя достичь величины  $(BH)_{max}=120$  МГс·Э (Skomski. 1993).

Традиционные технологии производства основных МТМ (самарий – кобальт, альнико, ферриты и др.) хорошо отработаны (см., например, Strnat. 1988). Однако следует различать технологии производства МТМ и самих постоянных магнитов. Так, современное производство МТМ марки NdFeB включает, помимо традиционных переделов (стадий получения), такие новые переделы, как стрип-каст и водородное охрупчивание, в то время как массовое производство постоянных магнитов невозможно без высокопроизводительных автоматизированных линий по шлифованию (до 10 магнитов в минуту), нанесению многослойного покрытия (до 5 различных слоёв) для защиты от коррозии и намагничивания.

## Применение постоянных магнитов

Постоянные магниты используются в составе источников магнитного поля и магнитных систем, которыми могут создаваться не только постоянные, но и переменные магнитные поля (например, генераторы магнитного поля, работающие на принципе вращающихся магнитных сборок Хальбаха с амплитудой до 2 Тл и частотой до 7 Гц) (Патент №–2466491). Поскольку промышленность производит не только двухполюсные, но и многополюсные (включая спечённые постоянные магниты и магнитопласты), то характер создаваемых ими распределений магнитных полей и их градиентов, например в магнитопроводах или воздушных зазорах, может иметь чрезвычайно сложный вид.

В настоящее время без постоянных магнитов невозможно производство таких устройств, как электрогенераторы и электроприводы с предельными удельными и массогабаритными характеристиками (например, ветрогенератор, выпускаемый компанией «Red Wind» на заводе в г. Волгодонск, содержит более 3 т постоянных магнитов марки NdFeB), мобильные телефоны, роботы, устройства автоматике, низкополевые магнитные томографы и др. Спектр областей применения и объёмы выпуска постоянных магнитов увеличиваются до 10 % ежегодно.

Тишин Александр Метталинович

### Библиография:

- Strnat K. J. Rare-earth-cobalt permanent magnets // Handbook of Ferromagnetic Materials / ed. by E. P. Wohlfarth, K. H. J. Buschow. – 1988. – Vol. 4. – P. 131–209.
- Skomski R. Giant energy product in nanostructured two-phase magnets / R. Skomski, J. M. D. Coey // Physical Review, Series B. – 1993. – Vol. 48, № 21. – P. 15812–15816.
- Buschow K. H. J. Physics of magnetism and magnetic materials / K. H. J. Buschow, F. R. de Boer. – New York ; Boston : Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2003.
- Kuz'min M. D. Theory of crystal-field effects in 3d-4f intermetallic compounds / Kuz'min M. D., Tishin A. M. // Handbook of magnetic materials / ed. by K. H. J. Buschow. – Amsterdam : Elsevier, 2008. – Vol. 17. – P. 149–233.
- Патент № 2466491 Российская Федерация, МПК H02N 11/00 (2006.01), H01F 7/02 (2006.01). Регулируемый генератор магнитного поля на основе структур Хальбаха : № 2008101943/07 : заявл. 14.01.2008 : опубл. 10.11.2012 / Д. Б. Копелиович, Ю. П. Мельников.