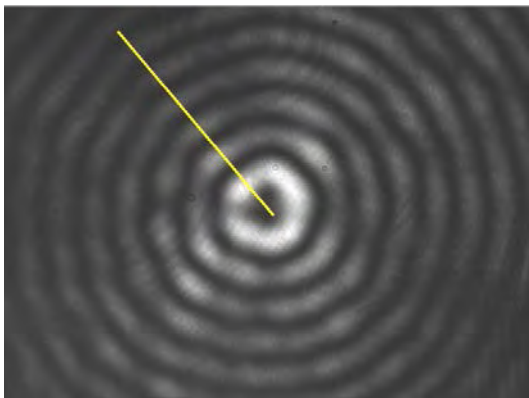
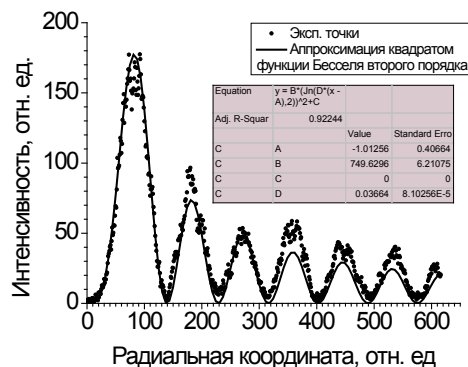


generation in uniaxial crystals / V.N. Belyi, N.A. Khilo, N.S. Kazak, A.A. Ryzhevich, A. Forbes // Opt. Eng. – 2011. – Vol. 50, № 5. – P. 1-9.

2. Хило, Н.А. Преобразование порядка бesselевых световых пучков в одноосных кристаллах / Н.А.Хило, А.А.Рыжевич, Е.С.Петрова // Квантовая Электроника – 2001. – Т. 31, № 1. – С. 85–89.



а



б

Рис. 3. Поперечное (а) и радиальное (б) распределение интенсивности в полученном экспериментально БСП₂

Equation	$I = BJ_2^2(D \cdot (x - A)) + C$	
Adj. R ²	0,92244	
Name	Value	Standard error
A	-1,01256	0,40664
B	749,62965	6,21075
C	0	0
D	0,03664	8,10E-05

УДК 621.762

НОВЫЕ ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ – НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

Савич В.В.

Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси
Минск, Республика Беларусь

В электродвигателях ротор и статор традиционно получают вырубкой профильных пластин из тонколистовой (0,2-1,2 мм) т.н. «электротехнической» стали (как правило – это сплав системы Fe-Co-V – викаллой 49КФ10, 52КФ11), сборкой пластин в пакет (как правило, с использованием лака или клея), и намоткой медным проводом заданных контуров. Однако собранные из пластин пакеты имеют низкую конструктивную жесткость и стабильность магнитных свойств, в силу чего потери, обусловленные упругой деформацией и смещением элементов пакетов, вследствие вибрационных, ударных и температурных нагрузок, достигают 20-30%. Устранить такие потери можно только за счет замены слоеных пакетов на жесткие монолитные конструкции магнитопроводов.

Технологии порошковой металлургии позволяют получать детали из магнитно-мягких материалов типа стали Э, пермаллоя и другие нужной конфигурации почти без потерь материала (до 5 %), исключить большинство трудоем-

ких и ручных операций, что дает возможность изготавливать роторы и статоры электродвигателей с большей экономической эффективностью. Использование метода порошковой металлургии для изготовления магнитно-мягких деталей позволяет управлять химическим составом магнитных материалов в очень узких пределах (что особенно важно для железоникелевых сплавов), а также вводить в материал наполнители, изолирующие прослойки, что открывает большие возможности в усовершенствовании и улучшении свойств магнитно-мягких материалов.

Однако в последние годы, исключительно благодаря технологиям порошковой металлургии, стало возможным коренным образом изменить традиционную конструкцию электродвигателя, уменьшить его габариты, повысить другие технические характеристики.

Цель данной работы – представить результаты использования зарубежными авторами новых порошковых магнитномягких материалов и

технологий формования из них деталей современных электродвигателей.

Интерес к снижению габаритов и массы электродвигателей, росту мощности и других эксплуатационных характеристик связан с развитием мехатроники, а также ростом производства гибридных и электромобилей.

В работе [1] авторами показаны достоинства технологии порошковой металлургии: замена вырубки фасонных тонколистовых элементов статора или ротора из полосовых или листовых заготовок, их сборки, пропитки лаками на однократное формование (прессование или инъекционное формование объёмной 3D-заготовки) из металлокомпозиита требуемого состава (чаще всего - на основе чистого железного порошка). Однако наиболее значимой стала возможность применить новый рациональный дизайн электродвигателя: вентильно-индукторный привод с двумя порошковыми магнитопроводами уменьшенной массы (на 15-20% каждый). На статоре, располагается обмотка сосредоточенного типа (как в трансформаторе или обмотке возбуждения машины постоянного тока) (рис.1, б), а ротор является безобмоточным, порошковым.

В таблице 1 приведены свойства магнитомягких материалов [2].

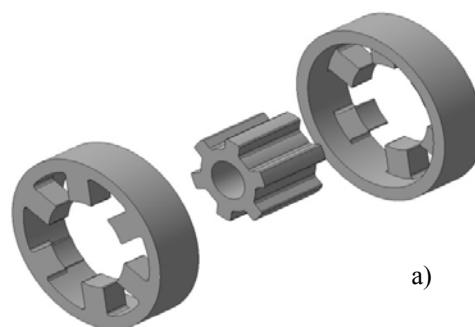


Рис. 1. 3D-дизайн [1] конструкции элементов (ротор-статор) электродвигателя (а) и внешний вид статора из порошковой композиции (б)

Таблица 1. Свойства магнитомягких материалов различной природы

Материал	Состав, вес. %							μ_0 , Гс/Э	μ_m , Гс/Э	H_c , Э	$\rho \cdot 10^6$, Ом/см	B_r , Гс
	Fe	Si	Al	Ni	Mo	Cr	Co					
Листовое железо	100	-	-	-	-	-	-	200	5000	1,0	10	21500
Альсифер	85	9	5	-	-	-	-	30000	120000	0,05	80	10000
Mo пермаллой	16	-	-	78,5	3,8	-	-	12000	120000	0,04	60	8700
Cr пермаллой	17,7	-	-	78,5	-	3,8	-	12000	60000	-	-	8000
Перминдюр	50	-	-	-	-	-	50	800	5000	2,0	7	24500
Somalloy S500 Insulated Fe	100	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0	8	19500
Somalloy S700 Insulated Fe	100	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0	90	20200

Как видно из таблицы 1, современные порошковые материалы Somalloy превосходят по своим свойствам ламинированные листовые и не содержат дорогостоящих легирующих элементов – кобальта, хрома, молибдена. Это обусловлено особенностями их микроструктуры [3] – рис.2.

Как видно из рис.2, частицы магнитомягкого материала Somalloy, представляют собой высокочистый порошок железа размером около 100 мкм, покрытые неорганической изоляцией – кремнием. В таблице 2 [3] приведено сравнение потерей мощности (Вт/кг) для материала Somalloy и традиционного ламинированного железа, из которой видно преимущество порошкового материала (Soft Magnetic Composite – SMC), особенно с ростом частоты.

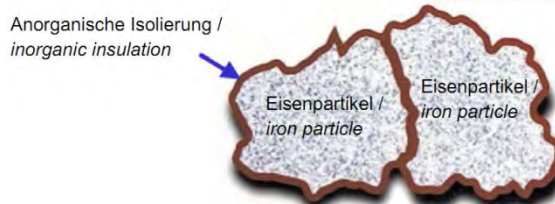


Рис. 2. Модель микроструктуры частиц магнитомягкого материала Somalloy

Выдающиеся свойства порошкового материала SMC обусловлены сохранением изолирующего отдельные частицы железа слоя и в сформованном изделии – статоре электродвигателя (рис.3) достаточно сложной формы.

Таблица 2. Сравнение потерь мощности в порошковых и ламинированных магнитомягких материалах [3]

Frequenz, Eisenverlust [W/kg] / Frequency, iron loss [W/kg]	SMC Pulver (Material) / SMC powder (material)					Silikonlaminiertes Stahl / Silicon steel lamination	
	A	B	C	D	E	0,5 mm (50A400)	0,35 mm (35JN360)
200 Hz	17,9	16,9	14,35	13,97	17	10,1	7,6
400 Hz	41,7	35,3	30,35	30,1	36,4	28,4	19,7
600 Hz	62,9	54,5	48	47,2	57	53,3	36,4
800 Hz	86,9	74,7	67,1	36,14	77	85	62,1
1 kHz	104,4	90,7	88,25	83,57	100,7	119,4	80,6
2 kHz	235,8	201,3	208	202,5	210,2	344,5	233
4 kHz	604,1	499,5	524	513,1	491,9	1201	717,7
6 kHz	1097	882,9	944,5	931,4	875,4	2126	1406
Permeabilität / permeability	300	500	700	780	472	1800	2000
Koerzitivfeldstärke / coecivity [kA/m]	31,8	23,8	15,9	15,9	23,9	7,95	7,95
Sättigungsflussdichte / saturation flux [T]	1,3	1,51	1,66	1,71	1,4	1,8	2,0



Рис. 3. Статор электродвигателя из порошкового материала SMC

На рисунке 4 представлен пример разработки фирмы Aisin Seiki Co: сравнение длины и массы двигателя ABS автомобиля.

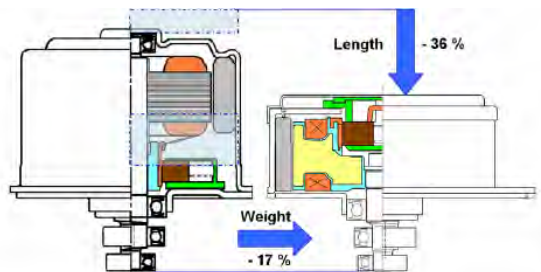


Рис. 4. Двигатель ABS с ламинированным (слева) и порошковым SMC (справа) роторами

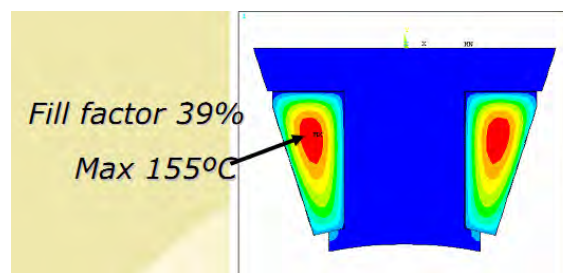
Как видно из рис. 4, совместная работа конструкторов и технологов фирмы Aisin Seiki Co при участии специалистов фирмы Höganäs AB (Швеция) позволила на 36% укоротить двигатель, уменьшив тем самым его массу на 17%. И все это благодаря новому материалу и технологии порошковой металлургии, позволившей получить цельный 3D-ротор сложной оптимизированной формы (рис. 5) [4-5].

Важным достоинством цельного порошкового сердечника является его заведомо более высокая теплопроводность, чем ламинированного. Такое исполнение

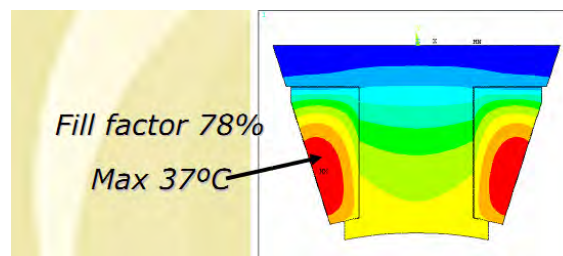
обеспечивает лучшие условия для охлаждения электрических машин, повышает их эксплуатационные параметры. В работе [5] проведено численное моделирование распределения температуры в сердечнике статора электродвигателя, выполненного по традиционной технологии (ламинированным) и из монолитным из порошкового магнитомягкого SMC материала Somalloy, результаты которого представлены на рис. 6 [5].



Рис.5. Порошковая заготовка ротора двигателя ABS (слева) и готовый ротор после незначительной мехобработки и обмотки (справа)



а)



б)

Рис.6. Расчетные значения предельных температур и распределение температуры в ламинированном (а) и монолитном SMC (б) сердечниках статора [5]

Как видно из рис. 6, использование монолитного SMC-сердечника позволяет выровнять температуру в системе «обмотка - сердечник», снизить предельно достигаемую при работе двигателя температуру со 155 °С до 37 °С. Кроме того, как это хорошо видно и на рис.4 и 5, коэффициент заполнения статора магнитомягким материалом SMC в два раза выше, чем ламинированным железом.

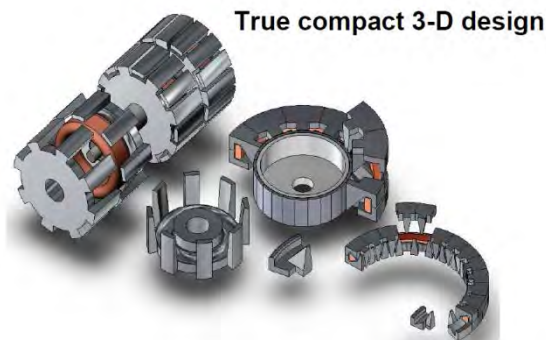


Рис.7. совершенствование конструкций двигателей за счет порошковых деталей, формирующих трехмерные магнитные потоки

Дальнейшее совершенствование конструкций ротора и статора электродвигателей, по мнению авторов работы

[5], связано с формированием трехмерных магнитных потоков за счет особой конструкции безобмоточного статора и ротора из SMC материала (рис.7).

Таким образом, применение новых SMC материалов и технологий порошковой металлургии позволяет коренным образом изменить конструкции электродвигателей, уменьшить их габариты и массу, повысить эксплуатационные параметры.

1 Конструкторско-технологические и экологические аспекты проектирования и реализации технологии производства композиционных порошковых материалов и изделий / Б.Ч.Месхи, А.В.Люлько, М.П.Дрягина, А.В.Трифонов // Вестник ДГТУ, 2008. Т.8. №1(36). – С.7-11.

2 Soft Magnetic Composite Technology. SMC-Update. Hognes AB. Sweden. – № 2, 2003. – 8 p. № 1, 2005. – 4 p.

3 Somaloy vs. Silicon steel lamination// Magnetworld AG. Jena, 2013. – 2 p.

4 <https://www.hoganas.com/en/business-areas/soft-magnetic-composites/>

2. Existing & Future Automotive Applications for Soft Magnetic Composites / Lars Hultman, Henrique Lopes //1° Workshop sobre Inovações nos Materiais Magnéticos para a Indústria Automobilística Atual e as Perspectivas dos Carros Híbrido. 30 junho – 1 julho 2008. - Sao Paolo, Brazil

УДК 621.822

ИЗМЕНЕНИЕ УГЛА КОНТАКТА ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЕГО КИНЕМАТИКОЙ ПОСРЕДСТВОМ ОСЕВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Савченко А.Л., Минченя Н.Т., Минченя В.Т., Берхин Е.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Движение шарика в подшипнике качения определяется геометрией контактирующих поверхностей. В общем случае в сферическом движении шарика можно выделить три составляющих:

$$\bar{\omega} = \bar{\omega}_K + \bar{\omega}_B + \bar{\omega}_{кр},$$

где $\bar{\omega}_K$ – угловая скорость качения, вектор которой направлен перпендикулярно плоскости контакта; $\bar{\omega}_B$ – угловая скорость вращения, вектор которой находится в плоскости контакта; $\bar{\omega}_{кр}$ – угловая скорость кручения, вектор которой также находится в плоскости контакта (рис. 1) [1].

Для радиально-упорного подшипника, работающего с предварительным осевым натягом, соотношение угловых скоростей шарика $\omega_K : \omega_B : \omega_{кр} = 1 : 0,18 : 0$, что приводит к его неравномерному износу [2]. Ранее было доказано, что при $\omega_{кр} \neq 0$ можно обеспечить равно-

мерный износ шарика, что было использовано при восстановлении точностных параметров изношенного подшипника методом обкатки [3]. Значение $\omega_{кр} \neq 0$ обеспечивалось приложением к одному из колец подшипника осевых ультразвуковых колебаний. Управляя параметрами колебаний можно получить различные значения $\omega_{кр}$.

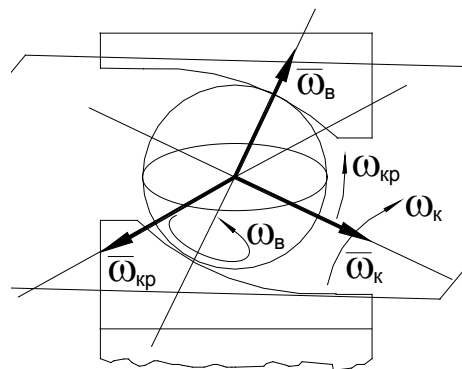


Рис. 1. Составляющие угловой скорости шарика