

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 620.172:537.622

МЕХАНИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ МАРТЕНСИТНОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ 04X13H8MTЮ–ВИ

© 2024 г. А. Н. Мазничевский^{а,*}, Р. В. Сприкут^а, А. С. Кибардин^{б,**}, А. А. Фирсов^б

^а ООО “Ласмет”, ул. 2-я Павелецкая, 18, ком. 207, Челябинск, 454047 Россия

^б АО “НИИЭФА”, пос. Металлострой, 3, Санкт-Петербург, 190000 Россия

* e-mail: al.mazn@ya.ru, mail@lasmet.ru

** e-mail: kibardin@sintez.niiefa.spb.su, info@sintez.niiefa.spb.su

Поступила в редакцию 22.08.2023 г.

После доработки 21.09.2023 г.

Принята к публикации 09.10.2023 г.

Актуальность задачи создания новых высокоскоростных магнитоэлектрических моторов и генераторов требует наличия высокопрочных материалов с определенными магнитными характеристиками. Рассмотрена возможность применения мартенситностареющих сталей, в частности, стали 04X13H8MTЮ–ВИ разработки ООО “Ласмет”, в качестве полюсов ротора высокооборотных электрических машин с постоянными магнитами, вследствие благоприятного сочетания механических свойств, повышенной коррозионной стойкости и ударной вязкости этой стали. Исследованы механические и магнитные свойства стали 04X13H8MTЮ–ВИ. Несмотря на то, что максимальное значение магнитной проницаемости у стали 04X13H8MTЮ–ВИ в разы ниже, чем у конструкционных сталей 3 и 30ХГСА, показано, что различие по величине электромагнитного момента двигателей с использованием разных сталей 30ХГСА и 04X13H8MTЮ–ВИ составляет менее 0.2%. С учётом более высоких прочностных свойств стали 04X13H8MTЮ–ВИ появляется потенциальная возможность повысить частоту вращения ротора на 25% по сравнению с ротором, изготовленным из 30ХГСА.

Ключевые слова: мартенситностареющие стали, механические свойства, магнитные характеристики, сталь 04X13H8MTЮ–ВИ, высокооборотный ротор с постоянными магнитами

DOI: 10.31857/S0015323024010016, **EDN:** ZRVELZ

ВВЕДЕНИЕ

Промышленность все чаще сталкивается с необходимостью применения современных высокоскоростных магнитоэлектрических моторов и генераторов, имеющих высокие скорости вращения (вплоть до 120000 об/мин), что требует применения высокопрочных материалов, обладающих, наряду с механической прочностью, определенными магнитными характеристиками — это является весьма актуальной задачей, которой активно занимаются зарубежные исследователи [1–3]. Для роторов подобных изделий представляется целесообразным использовать высокопрочные мартенситностареющие стали (МСС), которые уже нашли широкое применение в различных отраслях промышленности за счёт благоприятного сочетания высокой прочности и вязкости. Стали этого класса применяются в авиастроении [4–5], космической отрасли [6], криогенной технике [7–8] и при изготовлении высокоточных инструментов [9].

МСС можно разделить на нержавеющие и коррозионно неустойчивые стали:

- нержавеющие МСС, как правило, содержат 10–14% хрома, 5–10% никеля, 0–10% кобальта в различных вариантах;

- классические (коррозионно неустойчивые) МСС содержат 18–25% никеля, молибден и кобальт в различных соотношениях, а также до 2% титана и алюминия;

- инструментальные МСС (коррозионно неустойчивые) высокой твердости ($HRC \geq 60$) содержат 18–20% никеля, 18–20% кобальта, 4–6% молибдена, а также до 2% титана и алюминия.

По назначению МСС делятся на стали общего и специального назначения (нержавеющие, теплостойкие), а по уровню прочности различают:

- стали умеренной прочности ($\sigma_B = 1000–2000$ МПа) — это экономно легированные стали, не содержащие кобальт;

- высокопрочные стали ($\sigma_B = 2000–3500$ МПа);

- сверхвысокопрочные стали ($\sigma_B \geq 3500$ МПа), которые содержат большое количество кобальта и молибдена.

В данной работе рассматривается сталь умеренной прочности, как соответствующая поставленной задаче по величине механической прочности и имеющая умеренную стоимость.

Необходимо отметить, что в случае необходимости потенциально возможно применение более прочных и дорогих МСС, но при условии подтверждения их магнитных характеристик.

Высокие механические и эксплуатационные свойства таких сталей достигаются за счёт характерной структуры низкоуглеродистого реечного мартенсита (α' -фазы), представляющего собой пересыщенный твёрдый раствор легирующих элементов в мартенсите. При последующем старении происходит выделение упрочняющих интерметаллидных включений, например: $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$, Fe_2Mo и многих других в зависимости от состава стали.

Недавно специалистами ООО “Ласмет” была разработана новая МСС марки 04X13H8MTЮ [10], которая ещё недостаточно изучена. Целью настоящей работы является изучение механических и магнитных свойств стали 04X13H8MTЮ–ВИ и оценка возможности её использования в высокооборотных электрических машинах с постоянными магнитами. Выбор этой стали был также обусловлен потенциальной возможностью масштабирования освоенной технологии (при условии проведения дополнительных опытно-конструкторских работ) для получения поковок большого диаметра вплоть до 500 мм, что необходимо для крупных машин большой мощности, а также ее умеренной стоимостью.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Сталь выплавляли в вакуумно-индукционной печи с разливкой в слитки массой 1.28 т. Слитки подвергали горячей деформации на молотах и за несколько переделов получали кованую заготовку диаметром 80 мм.

Химический состав исследуемой стали представлен в табл. 1. Анализ проводили на оптико-эмиссионном спектрометре ARL 4460.

Микроструктуру стали после электролитического травления в 10%-ном растворе щавелевой кислоты изучали с применением оптического микроскопа Neophot 2.

Таблица 1. Химический состав исследуемой стали, мас. %

Марка	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	Cu
04X13H8MTЮ–ВИ	0.014	0.18	0.06	0.009	0.006	12.60	8.00	0.96	0.48	0.37	0.15
Пределы по химическому составу [10]	≤ 0.04	≤ 0.30	≤ 0.20	≤ 0.025	≤ 0.025	12.00–14.00	7.50–9.00	0.60–1.00	0.30–0.60	0.30–0.60	≤ 0.20

Механические свойства контролировали на образцах, термически обработанных по режиму: “закалка 900 °С, 25 мин., масло + старение 500 °С, 40 мин, воздух”. Испытания образцов проводили по ГОСТ 1497–84 с использованием испытательных машин: ИР 5047 и Instron 8802 на стандартных цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 5 мм (тип II) и стандартных плоских образцах (тип I).

Для определения магнитных характеристик использовали методику измерений, требования к образцам и измерительной аппаратуре в соответствии с ГОСТ 8.377–80 и ГОСТ 12119.2–98. Измерения проводили с использованием аппаратно-программного комплекса, разработанного в “НИИЭФА им. Д.В. Ефремова” [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Структура и механические свойства стали

Матричная структура кованой и термически обработанной стали являлась низкоуглеродистым реечным мартенситом (рис. 1).

Закалка позволяет измельчить зерно за счёт фазовой перекристаллизации, а последующее старение приводит к выделению упрочняющих интерметаллидов. В данном случае удалось уменьшить величину зерна более чем в два раза от 125–150 мкм до 40–60 мкм.

Интерметаллидные соединения у подобных сталей представляют собой преимущественно частицы η -фазы – $\text{Ni}_3(\text{Ti})$ или $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$, связанные с мартенситной матрицей ориентационными соотношениями: $\{011\}_{\alpha} \parallel \{0001\}_{\eta}$; $\langle 111 \rangle_{\alpha} \parallel \langle 11\bar{2}0 \rangle_{\eta}$, а также частицы фаз Лавеса (Fe_2Mo) [12].

Механические и пластические свойства разработанной стали подчиняются известной закономерности с тремя возможными стадиями: недостаривание, оптимальное старение и перестаривание. Температурно-временные условия получения равномерного распределения упрочняющих интерметаллидов для небольших сечений соответствуют старению при температуре $500 \pm 10^\circ\text{C}$ с выдержкой в течение 40–60 минут и охлаждением на воздухе (табл. 2).

Вид характерной диаграммы растяжения испытанных образцов (тип I) представлен на рис. 2.

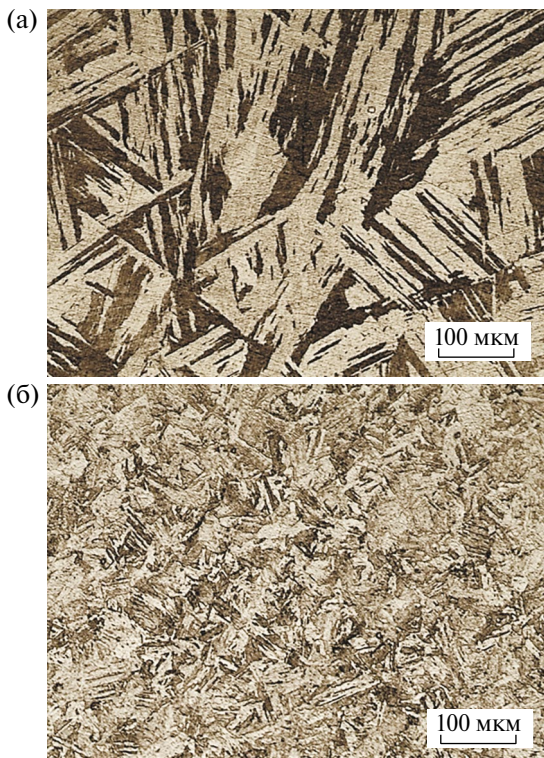


Рис. 1. Структура стали 04X13N8MTЮ–ВИ, $\times 100$: а) кованое (без термической обработки); б) закалка 900°C , 25 мин, масло + старение 500°C , 40 мин, воздух.

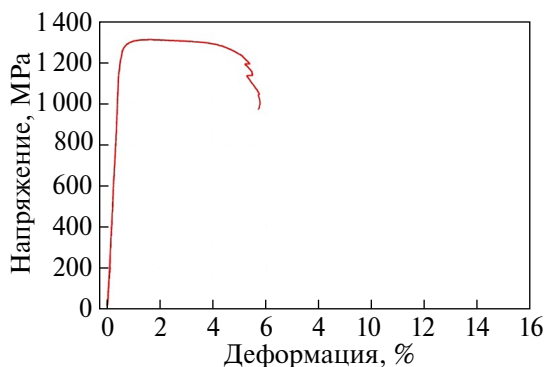


Рис. 2. Зависимость напряжения от деформации $\sigma(\epsilon)$ при растяжении образца 04X13N8MTЮ–ВИ.

Таблица 2. Результаты испытаний механических свойств

Образец	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Цилиндрический (тип II)	1380 1365	1315 1305	12.5 15.0	51.0 59.0
Плоский (тип I)	1315	1284	10.3	—

Для контроля механических свойств стали выбрали два типоразмера образцов с целью верификации сходимости результатов, т. к. в случае массового производства контроль заготовки обычно проводится на цилиндрических образцах, а выбо-

рочных — контроль изделий на плоских образцах. Из полученных данных видно, что результаты контроля свойств в плоских образцах имеют более низкие значения (до 5%).

Магнитные свойства стали 04X13N8MTЮ–ВИ

В связи с разработками высокооборотных вентильных электродвигателей с постоянными магнитами (ВЭДПМ) необходима достоверная информация не только по механическим, но и по магнитным параметрам высокопрочных магнитных сталей.

Применяемая методика измерения магнитных свойств материалов предусматривает выполнение измерений в двух перекрывающихся диапазонах величин магнитного поля, на кольцевом и цилиндрическом образцах, каждый со своей схемой измерения и диапазоном применимости. В сумме они охватывают практически весь значимый для расчетов магнитных систем диапазон полей. Перекрывание диапазонов позволяет дополнительно контролировать точность измерений по степени совпадения кривых.

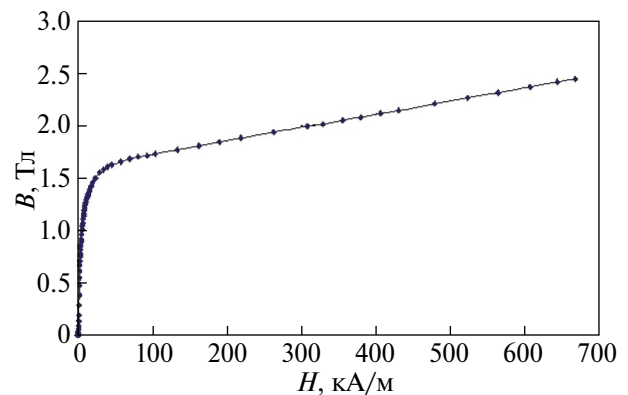


Рис. 3. Основная кривая намагничивания (ОКН) исследуемого образца стали.

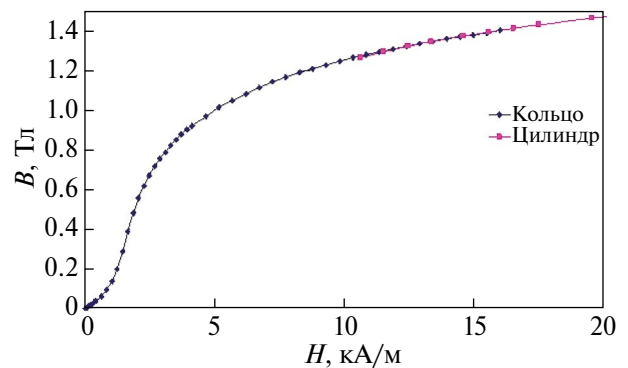


Рис. 4. ОКН исследуемого образца стали в диапазоне 0–20 кА/м (показан участок пересечения диапазонов измерения для кольцевого и цилиндрического образцов).

Результаты измерений зависимости магнитной индукции B и намагниченности M от напряжённости поля H стали 04X13H8MTЮ–ВИ представлены на рис. 3–5. На рис. 6 приведена зависимость магнитной проницаемости $\mu(B)$, на рис. 7 – петля гистерезиса исследуемого образца стали.

Коэрцитивная сила по индукции определена по максимальной ширине петли гистерезиса и составляет $H_c \approx 1537$ А/м.

*Сравнение магнитных параметров
стали 04X13H8MTЮ–ВИ с некоторыми
известными сталями*

Для сравнения использованы характеристики:

- конструкционной стали 3 (снятые ранее в АО “НИИЭФА”), широко применяемой для магнитопроводов, но имеющей сравнительно низкие механические свойства (пределы прочности и текучести до 480 и до 245 МПа соответственно);

- стали 30ХГСА (пределы прочности и текучести соответственно 980 и 820 МПа), используемой для высокооборотных электрических машин, магнитная характеристика которой приведена в [13]. Данная характеристика приведена только до значения $H = 12$ кА/м, далее характеристика экстраполирована с учетом тренда стали 3 (на графиках указана штрихпунктирной линией и обозначением “Сталь 30ХГСА*”).

Результаты сравнения в графическом виде приведены на рис. 8–10.

На рисунке 9 можно видеть, что максимальное значение μ_r стали 30ХГСА в 2.5 раза ниже, чем у стали 3, а у стали 04X13H8MTЮ–ВИ, соответственно, в 6 раз ниже относительно стали 3 и, примерно, в 2.4 раза ниже, чем 30ХГСА.

В области высоких напряженностей поля H 200–600 кА/м μ_r всех сталей практически выравниваются на уровне (соответственно H) примерно от (10–7) до (5–3) единиц.

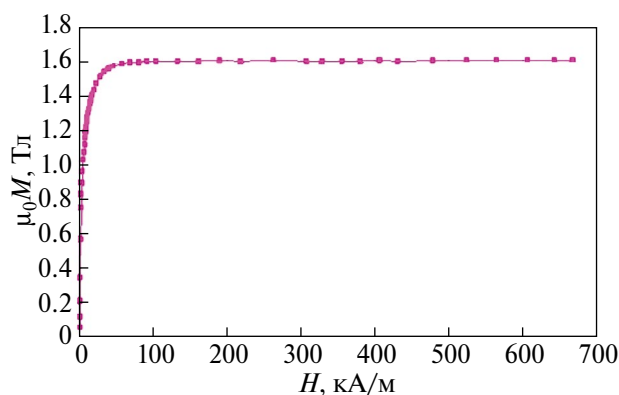


Рис. 5. Зависимость $\mu_0 M(H)$ для исследуемого образца 04X13H8MTЮ–ВИ. Намагниченность насыщения $\mu_0 M = 1.6$ Тл, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

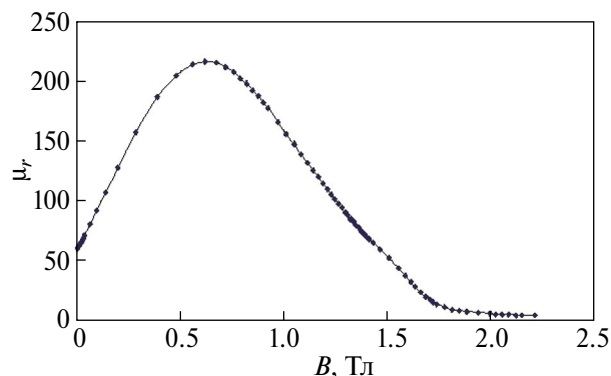


Рис. 6. Зависимость магнитной проницаемости μ_r от магнитной индукции B .

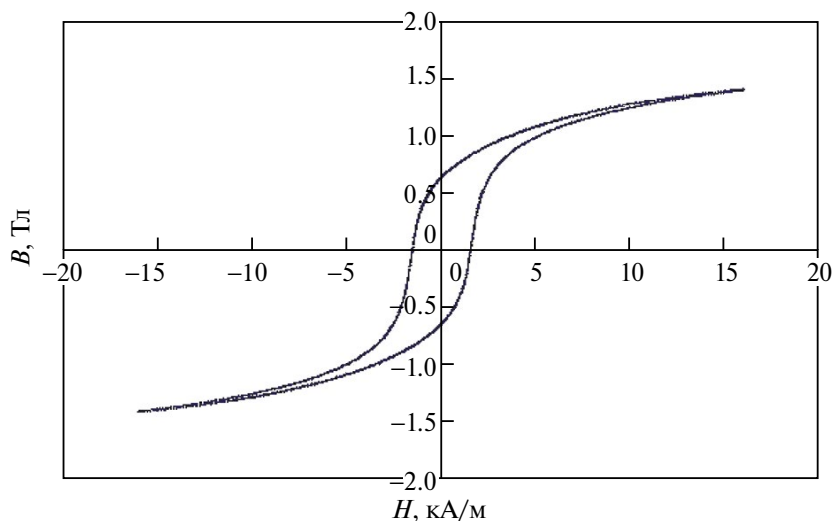


Рис. 7. Петля гистерезиса исследуемого образца.

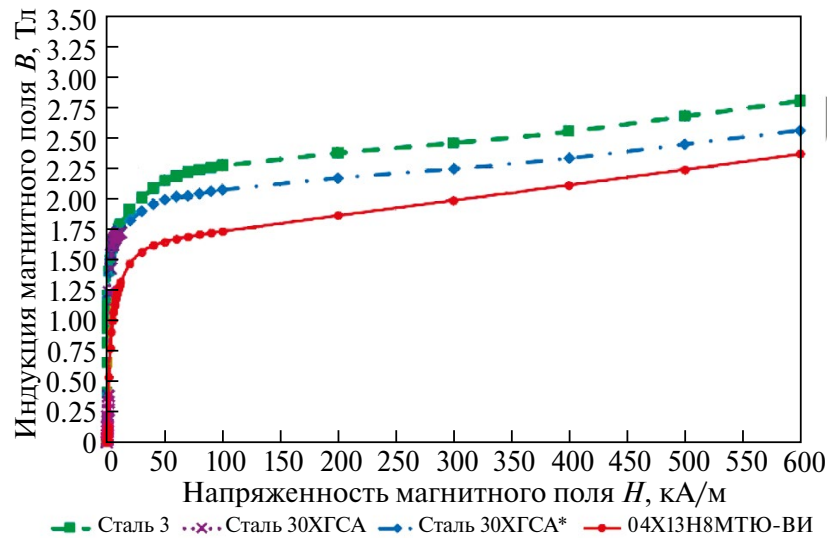


Рис. 8. Сравнительная зависимость $B(H)$ для сталей 3, 30ХГСА и 04Х13Н8МТЮ-ВИ.

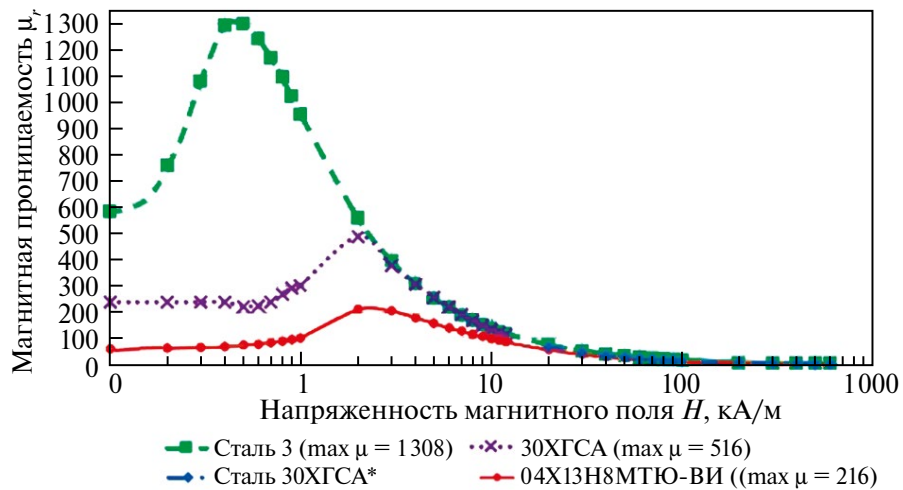


Рис. 9. Зависимости μ_r от напряженности магнитного поля H .

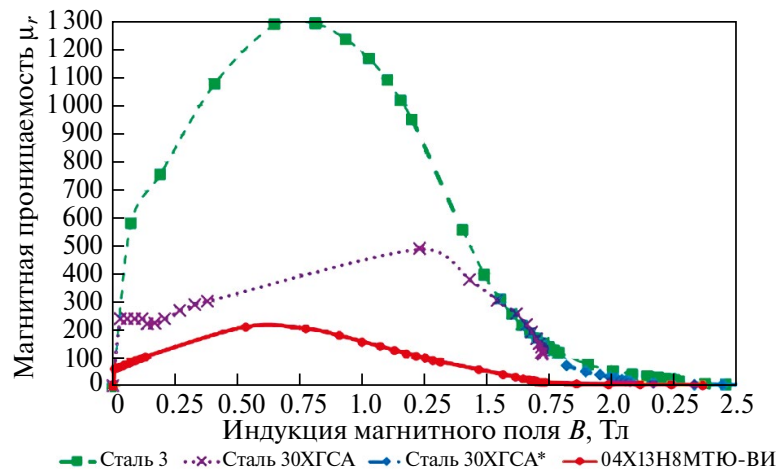


Рис. 10. Зависимости μ_r от индукции магнитного поля B .

Таблица 3. Результаты электромагнитных расчетов

Параметр	Ст.3	30ХГСА	04Х13Н8МТЮ–ВИ
Электромагнитный момент, кН·м	19.710	19.690	19.663
Средняя индукция B в зазоре двигателя, Тл	0.552	0.552	0.551
Максимальная индукция B в расчетном секторе, Тл	2.35	2.35	2.35

Результаты сравнительного расчета электрической машины с постоянными магнитами (ЭДПМ) с применением указанных сталей

Для получения информации о степени влияния различия магнитных характеристик указанных сталей на параметры ЭДПМ был проведен расчет магнитной системы полюсного сектора с характеристиками указанных сталей.

Сравнение результатов расчетов приведено в табл. 3.

Из данных, представленных в табл. 3, видно, что результаты расчетов с полюсами, выполненными из разных сталей, практически совпадают.

Различие по величине момента между сталями 30ХГСА и 04Х13Н8МТЮ–ВИ составляет менее 0.2% несмотря на то, что магнитная проницаемость этих сталей отличается в несколько раз.

Необходимо отметить, что предел текучести стали 04Х13Н8МТЮ–ВИ (~1300 МПа) почти в 1.6 раза выше, чем стали 30ХГСА (820 МПа), что позволяет повысить частоту вращения ротора и мощность машины на 25%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Магнитные параметры стали 04Х13Н8МТЮ–ВИ, несмотря на более низкую магнитную проницаемость (в 6 раза ниже, чем у стали 3, и примерно в 2.4 раза ниже, чем у 30ХГСА), вполне приемлемы для применения в роторах высокооборотных электрических машин с постоянными магнитами.

2. Проведенный сравнительный расчет параметров электрической машины с постоянными магнитами с применением стали 30ХГСА и новой стали 04Х13Н8МТЮ–ВИ продемонстрировал различие менее 0.2%, что в совокупности с повышенными механическими характеристиками свидетельствует о целесообразности применения исследуемой стали в роторах высокооборотных электрических машин.

3. Механические характеристики стали 04Х13Н8МТЮ–ВИ позволяют повысить частоту вращения ротора на 25% по сравнению со сталью 30ХГСА.

Данная работа финансировалась за счет средств организаций. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tian J., Yang B., Feng S., Yu L., Zhou J. Investigation of rotor–gas foil bearing system and its application for an ultra-high-speed permanent magnet synchronous motor // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J: Journal of Engineering Tribology. 2022. V. 236 (4). P. 595–606. <https://doi.org/10.1177/13506501211031703>
2. Cheng W., Deng Z., Xiao L., Zhong B., Duan W. Rotor dynamic experimental investigation of an ultra-high-speed permanent magnet synchronous motor supported on a three-pad bidirectional gas foil bearing // Adv. Mech. Eng. 2019. V. 11 (9). P. 1–11. <https://doi.org/10.1177/1687814019875368>
3. He T., Zhu Z., Eastham F., Wang Y., Bin H., Wu D., Gong L., Chen J. Permanent Magnet Machines for High-Speed Applications // World Electric Vehicle Journal. 2022. V. 13 (1). <https://doi.org/10.3390/wevj13010018>
4. Каблов Е.Н., Бакрадзе, М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП “ВИАМ” // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11>
5. Якушева Н.А., Громов В.И. Мартенситно-старяющие стали ВИАМ для ответственных деталей ГТД // Высокопрочные стали для аэрокосмической техники и технологии их производства: материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2019. С. 15–25.
6. Bibin J., Manikandan M., Arivazhagan N., Nageswara R., Muktinutalapati G., Madhusudhan R. Development of a low heat-input welding technique for joining thick plates of 250 grade maraging steel to fabricate rocket motor casings // Materials Letters. 2022. V. 326. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132984>
7. Geng L., Jie S., Ao W., Zhuoyue Y., Yali D., Jing N., Qi G. A novel Fe–Cr–Ni–Co–Mo maraging stainless steel with enhanced strength and cryogenic toughness: Role

- of austenite with core-shell structures // *Mater. Sci. Eng.: A*. 2023. V. 863.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144537>
8. *Zhang H., Sun M., Wang F., Liu Z., Xu B., Li D.* Exploring the relationship between the accelerated austenite reversion and two-steps solution treatment in a Cr–Ni–Mo cryogenic maraging stainless steel // *Materials Characterization*. 2023. V. 196.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112581>
 9. *Zheng Z., Lee Y.J., Zhang J., Jin X., Wang H.* Ultra-precision micro-cutting of maraging steel 3J33C under the influence of a surface-active medium // *J. Mater. Process. Techn.* 2021. V. 292.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117054>
 10. Патент № 2738033 Российская Федерация, МПК C22 C38/50 (2020.08), C22C 38/60 (2020.08). Мартенситно-стареющая сталь: № 2020112264; заявл. 26.03.2020; опубл. 07.12.2020. Бюл. № 34 / Мазничевский А.Н., Сприкут Р.В.; заявитель и патентообладатель Лаборатория специальной металлургии (ООО “Ласмет”). 8 с.: ил. Текст: непосредственный.
 11. *Амосков В.М., Беляков В.А., Белякова Т.Ф., Гикал Б.Н., Гульбилян Г., Дмитриев С.Н., Иваненко И.А., Илясов О.В., Костырев В.А., Кучинский В.Г., Кухтин В.П., Ларионов М.С., Ламзин Е.А., Максимов Б.П., Семченков А.Г., Семченкова О.В., Сычевский С.Е., Филатов О.Г., Фирсов А.А., Франко И.* Аппаратно-программный комплекс для измерения характеристик магнитных материалов в широком диапазоне индукций // Препринт ОИЯИ P13–2004–158. Дубна: Объедин. ин-т ядер. исслед. 2004. 19 с.
[https://www1.jinr.ru/publish/Preprints/2004/158\(P13–2004–158\).pdf](https://www1.jinr.ru/publish/Preprints/2004/158(P13–2004–158).pdf)
 12. *Sha W., Guo Z.* 2 – Microstructure of maraging steels // *Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. 2009. P. 17–48.
<https://doi.org/10.1533/9781845696931.17>
 13. *Исмаилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е.* Высокооборотные электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. Инновационное машиностроение. 2017. 247 с.