



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХ

# Структура и электромагнитные свойства Li феррита, изготовленного аддитивным методом

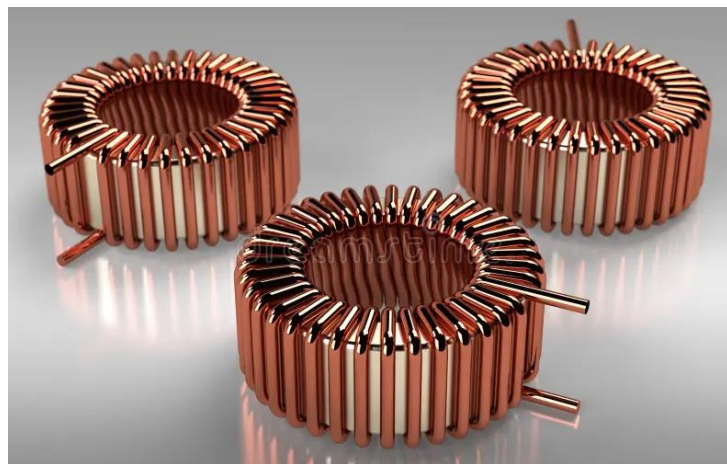
---

**Свирков А.С.,** Лысенко Е.Н.

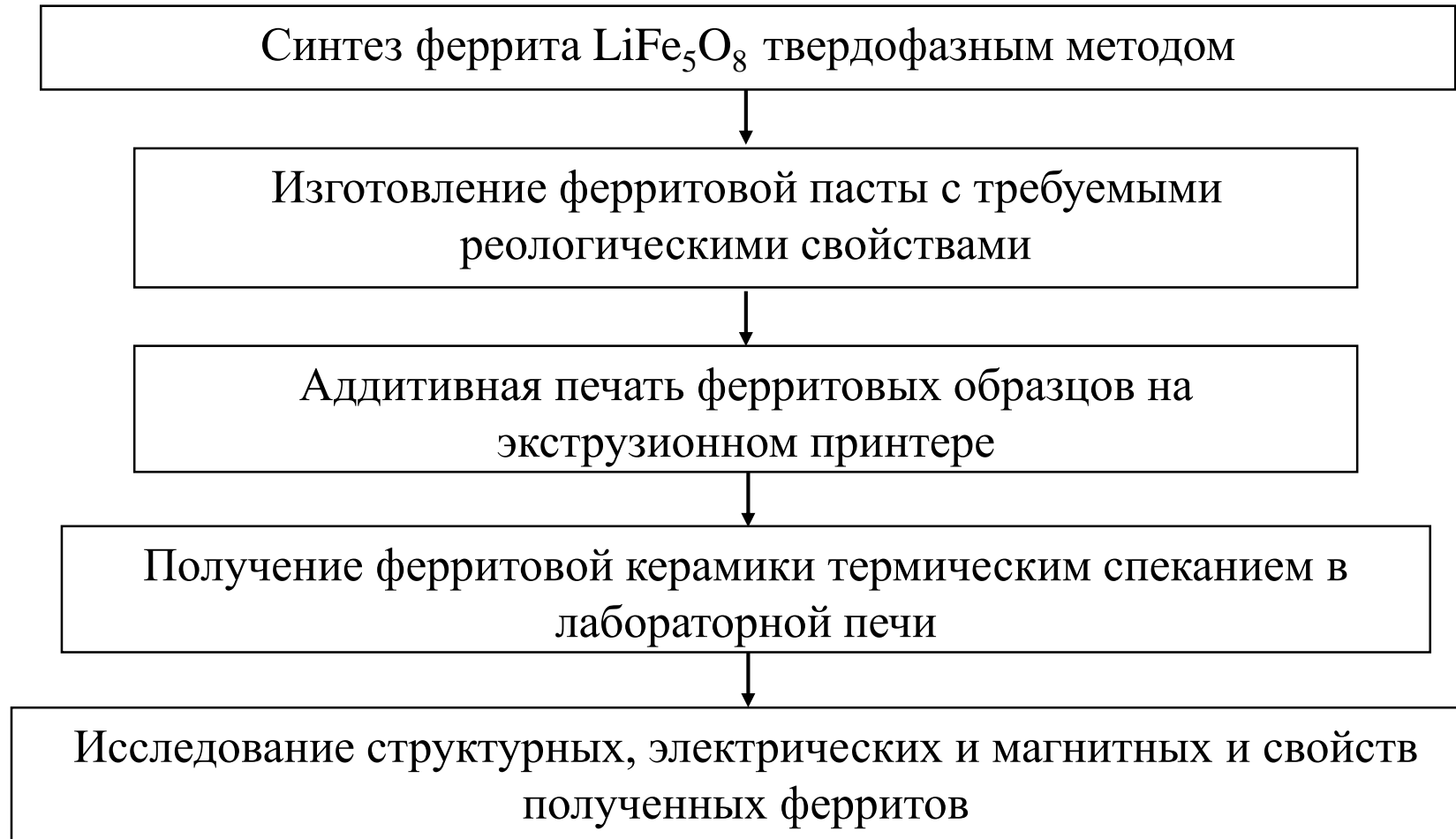
Проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники,  
диэлектриков и полупроводников

26-29.05.2026

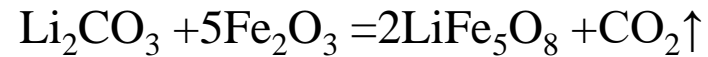
**Цель работы** – исследование структуры и электромагнитных свойств литиевого феррита  $\text{LiFe}_5\text{O}_8$ , изготовленного аддитивным методом, основанном на экструзионном нанесении ферритовых образцов со связующим веществом и последующего их спекания в лабораторной печи.



# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА



# СИНТЕЗ ФЕРРИТОВЫХ ПОРОШКОВ



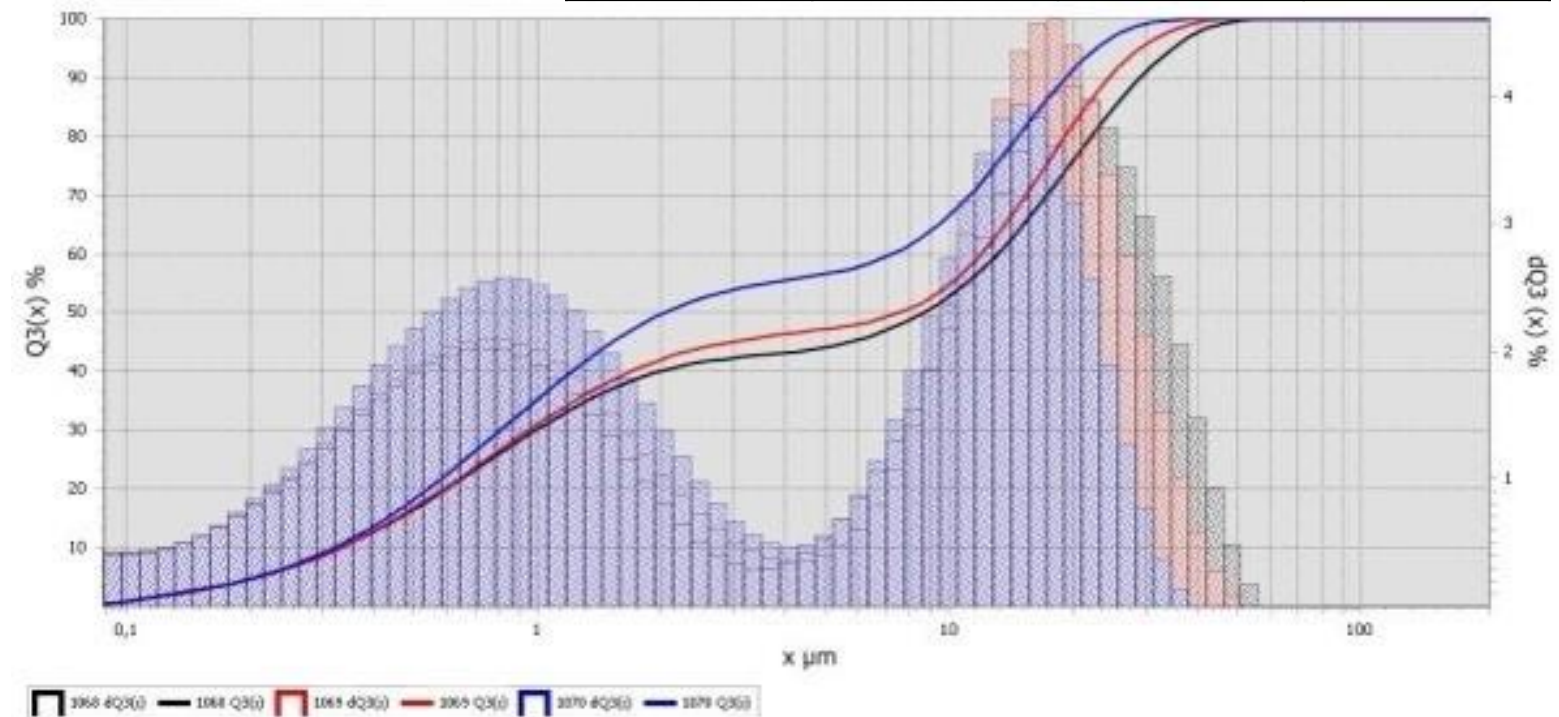
Образец	D10 (мкм)	D50 (мкм)	D90 (мкм)
LiFe <sub>5</sub> O <sub>8</sub>	0.32	2.5	22

Сушка исходных порошков при 200°C  
в течение 3 часов в печи

Взвешивание порошков в определенных  
пропорциях в соответствии с  
химической формулой феррита

Механическая активация смеси  
реагентов в планетарной мельнице

Твердофазный синтез ферритовых  
порошков путём нагрева смеси реагентов  
при температуре 900°C в течение 4 часов



**Рис.1** Объемное дифференциальное и интегральное (кумулятивное) распределение частиц по размерам для ферритового порошка после механического измельчения, по данным лазерной дифракции с использованием анализатора Fritsch Analysette 22 (D – эквивалентный размер частиц; Q3 – объемная доля частиц с размером D и менее, %; q3 – количество частиц с размером менее x, отнесенное к общему количеству частиц).

# СХЕМА АДДИТИВНОЙ ПЕЧАТИ

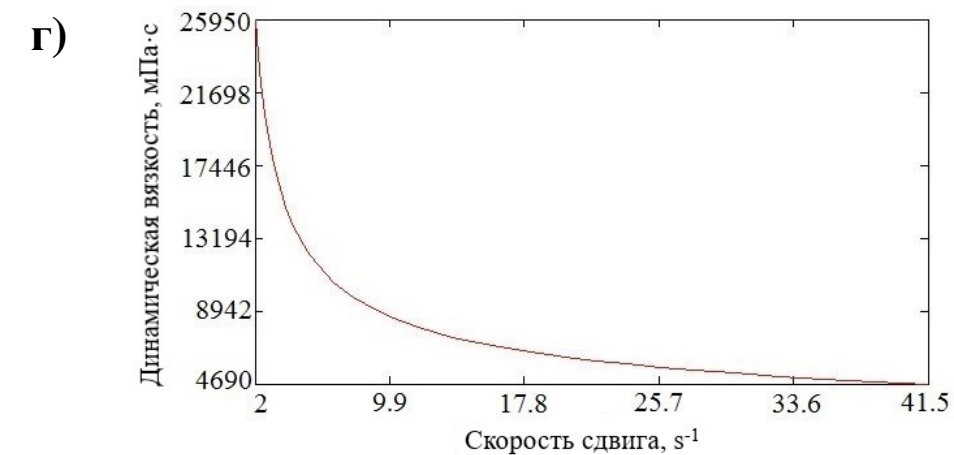
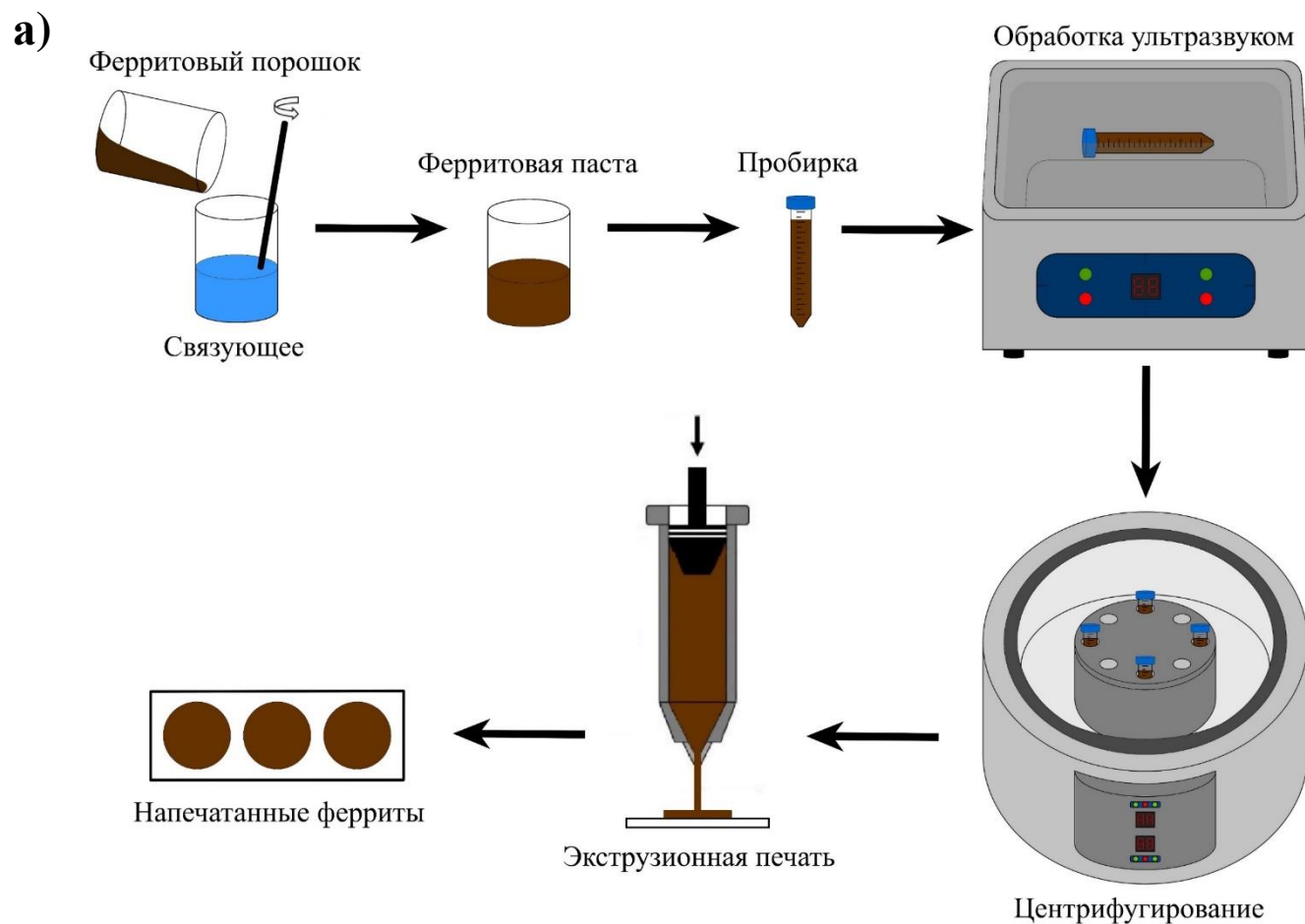
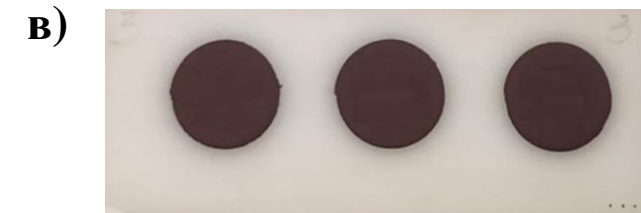
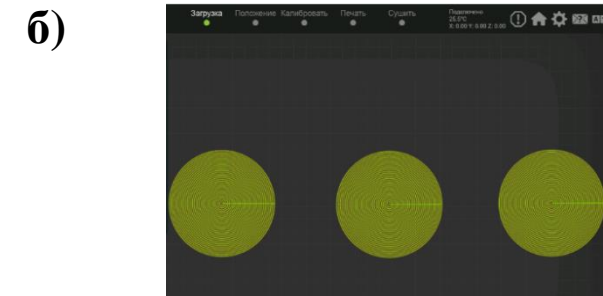


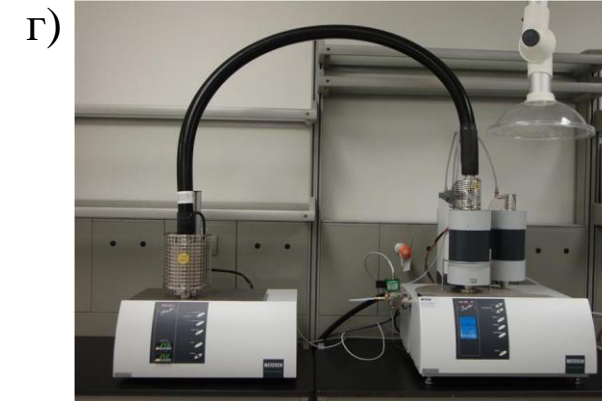
Рис.2 Схема получения ферритов аддитивным методом (а), смешивание ферритового порошка со связующим в ступке (б); обработка ультразвуком (в), зависимость динамической вязкости от скорости сдвига пасты (г)

# ПРОЦЕСС АДДИТИВНОЙ ПЕЧАТИ

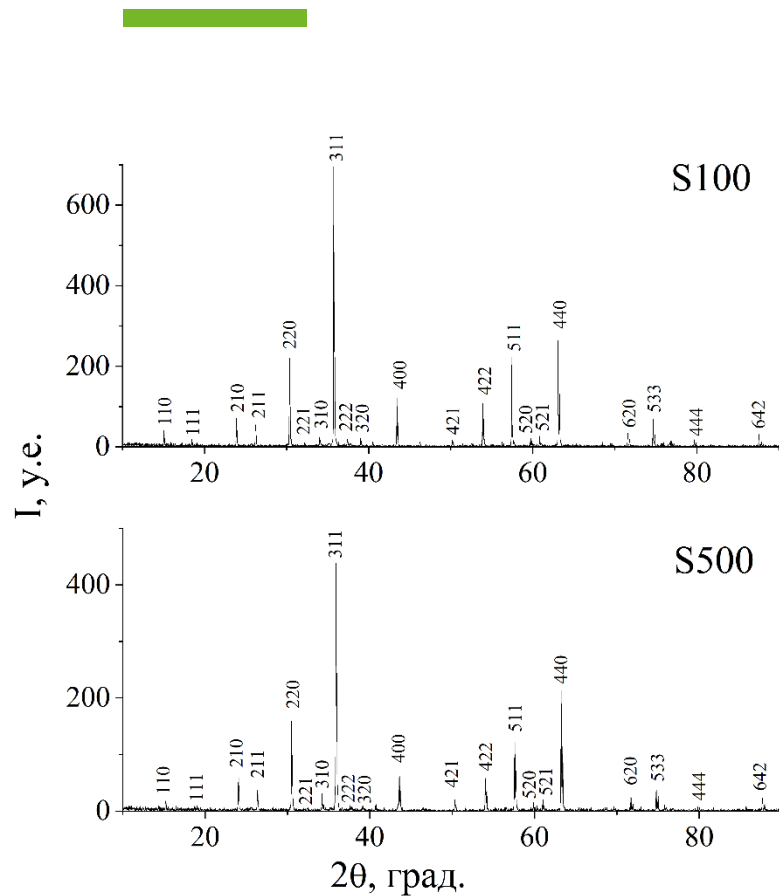


**Рис.3** Процесс печати ферритовых образцов на принтере Voltera V-one (а), вид загрузки цифрового файла с топологией (б) и напечатанные образцы (в)

# ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ



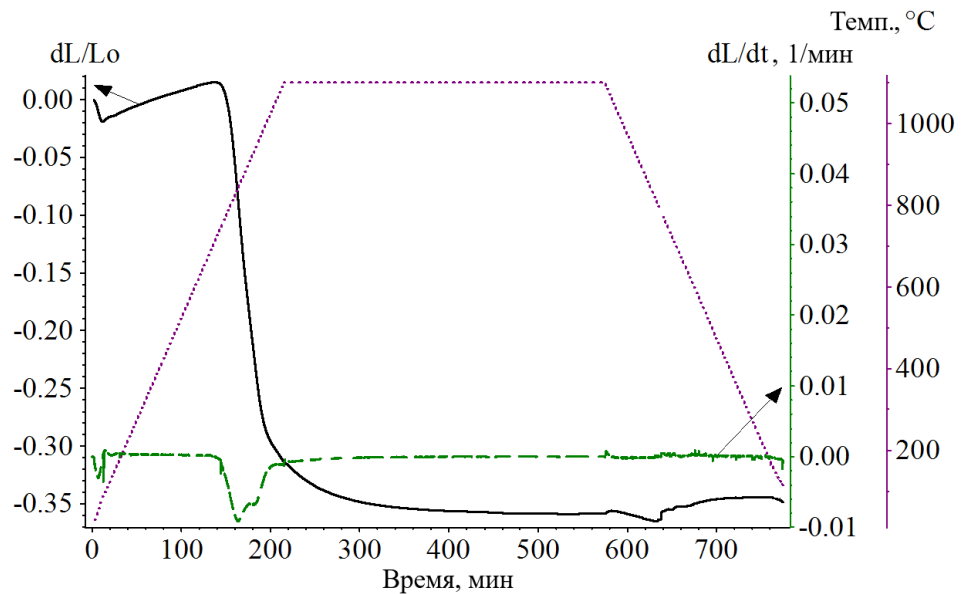
**Рис.4** Общий вид экспериментальных установок, где:  
а) дилатометр Netzsch DIL 402С; б) дифрактометр ARL X'TRA; в) СЭМ Hitachi TM-3000; г) термоанализатор Netzsch STA 449С; д) установка для измерений температурных зависимостей тока электрической проводимости; е) вибрационный магнитометр VSM Lakeshore 7400 System



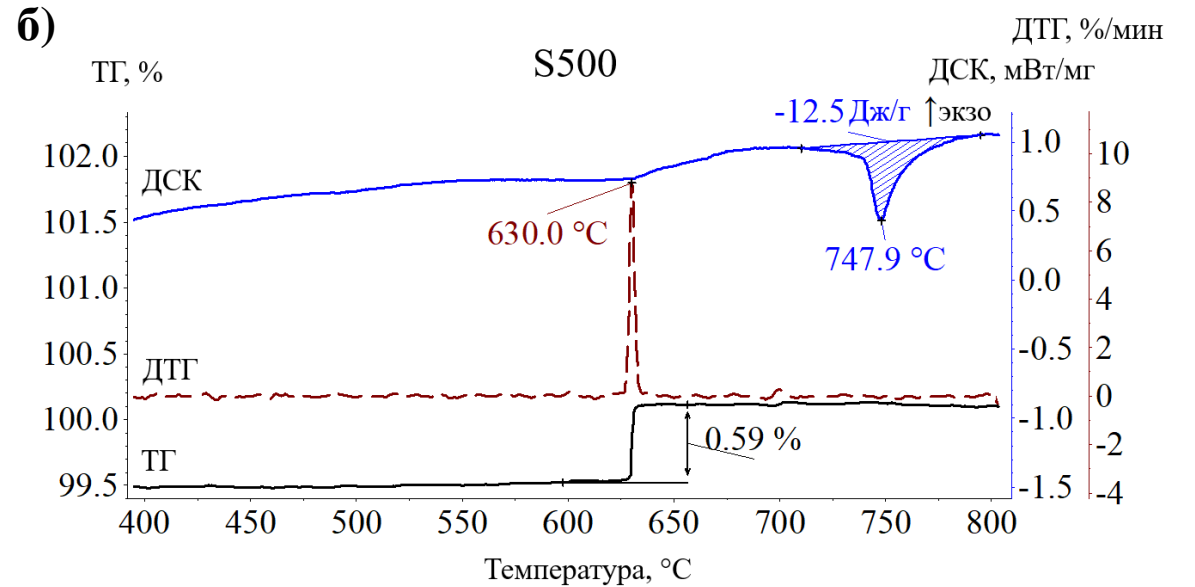
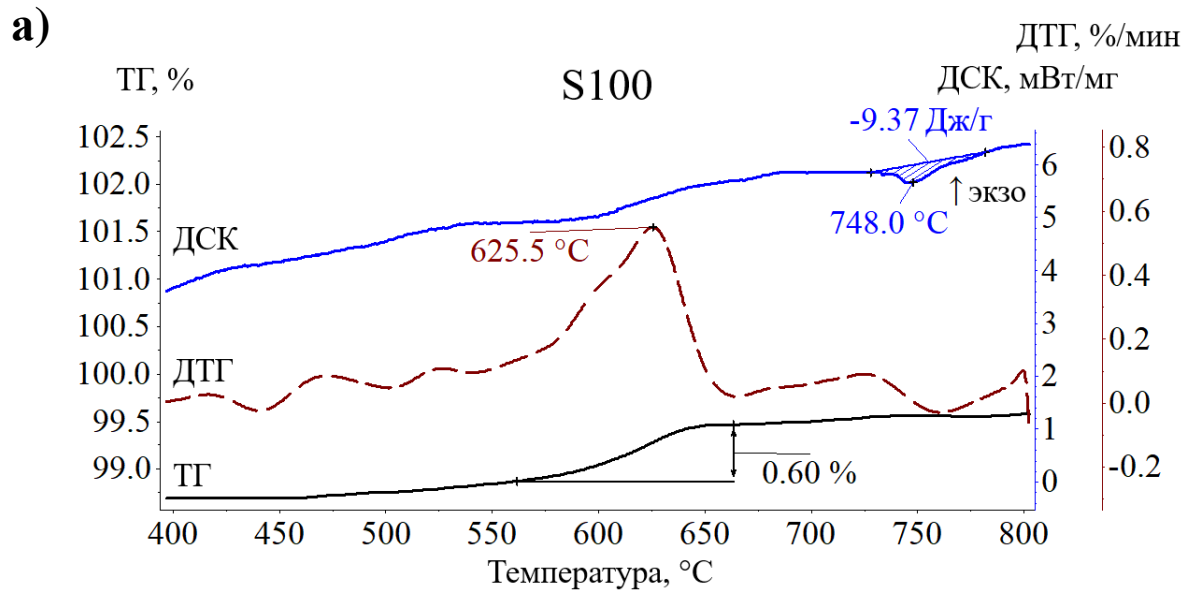
**Рис.5** Дифрактограмма спечённой ферритовой керамики (ARL X'TRA)

Таблица 1 – Данные РФА анализа образцов

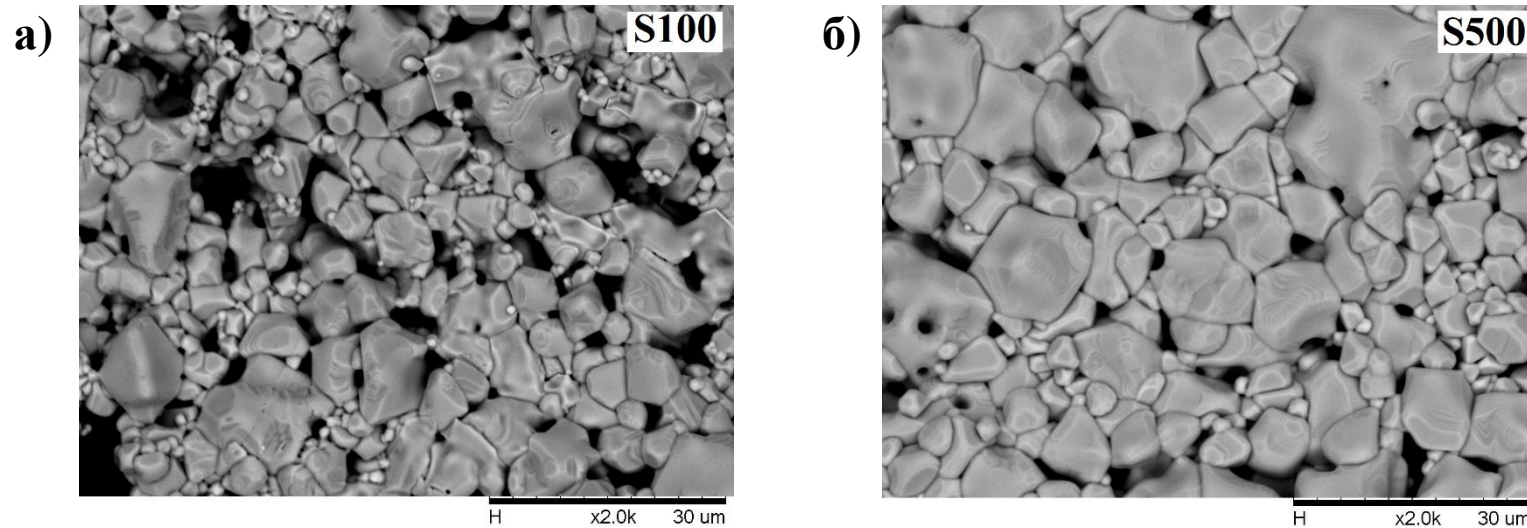
Образец	Параметр решётки (a=b=c), Å	ОКР (нм)	Микронапряжения, $\Delta d/d \cdot 10^3$
S100	8.3322	68	0.7
S500	8.3355	150	0.2



**Рис.6** Дилатограмма спекания образца, изготовленного из Li ферритовой пасты (S500)



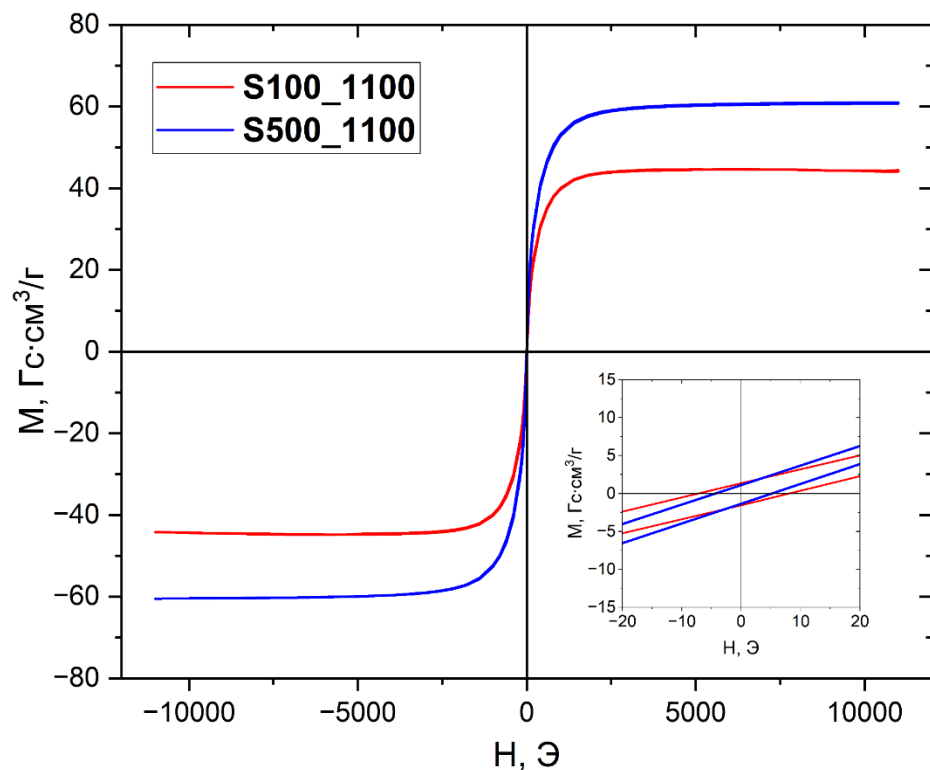
**Рис.7** ТГ-ДСК анализ Li феррита с толщиной 100 мкм (а) и 500 мкм (б)



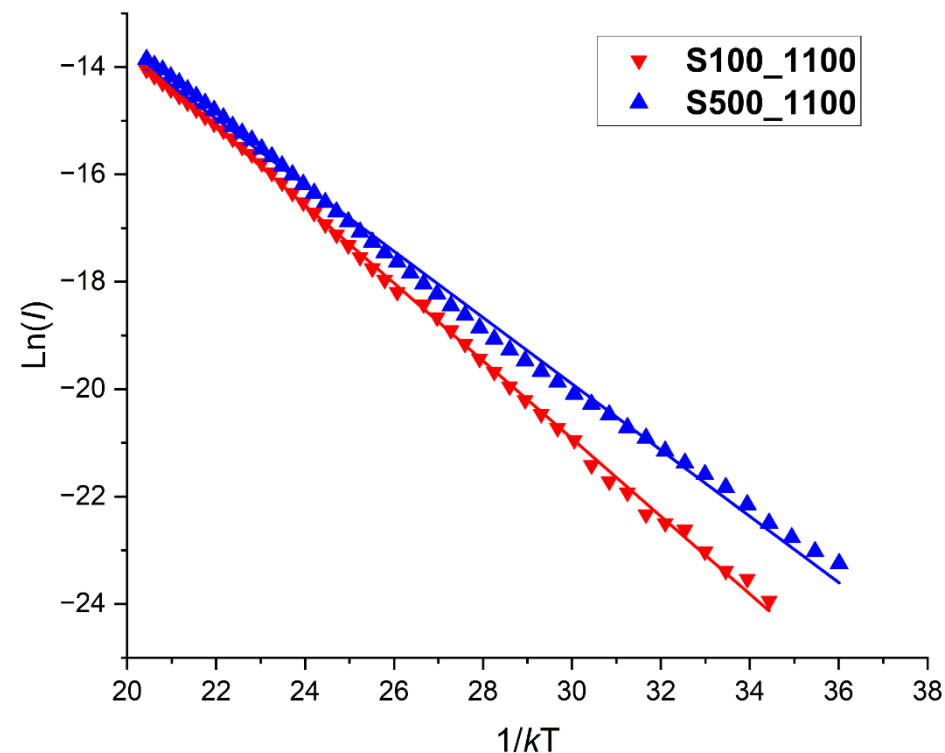
**Рис.8** СЭМ изображения спечённых образцов Li феррита с толщиной 100 мкм (а) и 500 мкм (б)

Таблица 2 – Структурные характеристики Li ферритовой керамики, спеченной при 1100 °С

Образец	плотность		пористость	средний размер зерна
	г/см <sup>3</sup>	%	%	мкм
S100	3.39	72	19	4.5
S500	3.65	76	16	5.9



**Рис.9** Температурные зависимости тока электрической проводимости для Li ферритов разной толщины (VSM Lakeshore 7400 System)



**Рис.10** Температурные зависимости тока электрической проводимости для Li ферритов разной толщины

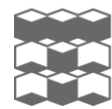
# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Таблица 3 – Данные электрических и магнитных характеристик образцов Li феррита

Образец	Электрическое сопротивление $\rho$ , $\Omega \cdot \text{см}$	Энергия активации электропроводности $E_A$ , эВ	Температура Кюри $T_c$ , $^{\circ}\text{C}$	Удельная намагниченность $\sigma_s$ , $\text{Гс} \cdot \text{см}^3/\text{г}$	Коэрцитивная сила $H_C$ , Э
S100	$1.1 \times 10^{10}$	0.724	625.5	50.1	12
S500	$1.6 \times 10^9$	0.642	630.0	62.1	4

В работе были исследованы фазовый состав, плотность, пористость, удельная намагниченность насыщения, температура Кюри и удельное электрическое сопротивление литиевого феррита  $\text{LiFe}_5\text{O}_8$ , полученного методом аддитивного производства, основанного на экструзионном нанесении слоёв различной толщины с последующим высокотемпературным спеканием. Установлено, что толщина напечатанных образцов заметно влияет на свойства литиевого феррита. Образцы толщиной до 100 мкм обладают более дефектной структурой, что приводит к ухудшению их магнитных характеристик. В то же время образцы толщиной 500 мкм характеризуются более высокой плотностью, меньшей пористостью и совокупностью магнитных свойств, типичных для феррита с высоким содержанием упорядоченной фазы  $\alpha\text{-LiFe}_5\text{O}_8$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (Проект FSWW–2026–0047).



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХ

# Структура и электромагнитные свойства Li феррита, изготовленного аддитивным методом

---

**Свирков А.С.,** Лысенко Е.Н.

Проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники,  
диэлектриков и полупроводников

26-29.05.2026