

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОТЖИГА НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ С МАЛЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ

Быков Н.А., Ивченко Д.А., Саликов М.П.

ГОУ ВПО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург

Для изготовления сердечников электрических машин применяется электротехническая листовая сталь, являющаяся по своим магнитным свойствам магнитномягким материалом.

Применяемая сталь должна обладать высокой магнитной проницаемостью, а при работе в переменном магнитном поле, кроме того, малыми потерями на перемагничивание (гистерезис) и малыми потерями от вихревых токов. Малые потери на гистерезис характеризуются узкой, с малой площадью, петлей гистерезиса. Снижение потерь от вихревых токов достигается увеличением удельного объемного сопротивления стали и выполнением сердечников не из массива, а из отдельных листов, изолированных друг от друга.

Кристаллическая решётка электротехнической стали представляет собой множество кристаллов, каждый из которых обладает магнитной анизотропией, т.е. он неодинаково намагничивается вдоль различных кристаллографических направлений, что в свою очередь существенно влияет на магнитные свойства стали.

В процессе механической обработки электротехнической стали значительно снижаются её электромагнитные свойства, увеличиваются потери на гистерезис.

Для улучшения магнитных свойств электротехнической стали проводят отжиг.

Основные преимущества применения отжига электротехнической стали:

- уменьшение внутренних напряжений;
- возрастание размеров кристаллов;
- повышение магнитной проницаемости;
- уменьшение коэрцитивной силы.

Свойства сталей, предназначенных для работы в средних и сильных магнитных полях при частоте 50 Гц, приведены в [1, 2]. Эта группа сталей является самой большой по количеству марок и объёму применения. Ее используют для производства энергетического оборудования – генераторов, двигателей, силовых трансформаторов. Все марки сталей этой группы производят в виде рулонов, листов и резаной ленты. Толщина рулонной стали от 0,28 до 0,65 мм.

Основными электромагнитными характеристиками этой группы сталей являются кривая намагничивания и зависимость удельных потерь от магнитной индукции. Зависимость удельных потерь от магнитной индукции для различных марок сталей имеет приблизительно одинаковый характер.

Считается, что отжиг электротехнических сталей с малым содержанием кремния (стали 2011, 2012, 2112 и т.д.) почти не влияет на их магнитные свойства. По этой причине ряд электромашиностроительных заводов в целях экономии отказывается от отжига вырубленных листов сердечников и сердечников в целом из таких сталей.

Для проверки этого положения проводился соответствующий эксперимент. В качестве объекта исследования был выбран сердечник, набранный из листов электротехнической стали марки 2011, изготовленный на заводе «Уралэлектро», город Медногорск. На заводе листы стали не подвергались повторному отжигу, а сердечник из листов скреплялся скобами. При определении магнитных свойств использовался ваттметровый метод [3,4]. Экспериментальная схема эксперимента приведена на рисунке 1. При проведении экспериментов предполагалось, что магнитный поток замыкается по спинке статора. Ответвление потока в основание зубцов (см. рисунок 1) не учитывалось.

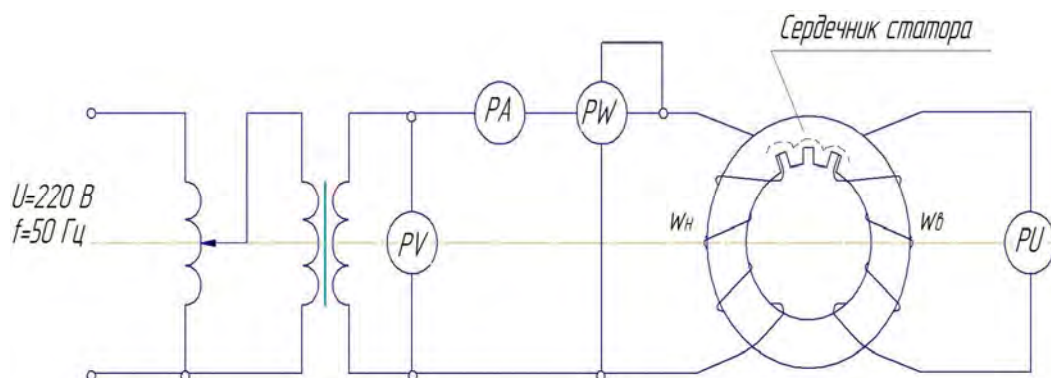


Рисунок 1 – Схема ваттметрового метода измерений

Исследование проводилось в три этапа. Магнитные свойства определялись для заводского неотожженного сердечника, для отожженного при температуре 860 °С в течение шести часов. Третий этап состоял в том, что отожженный сердечник разбирался на отдельные листы, которые изолировались с двух сторон слоем изоляционного лака и после просушки листы снова собирались в сердечник, который подвергался испытанию. Кривые намагничивания и потерь для сердечника до его отжига (кривые B_1 и ρ_1), после (кривые B_2 и ρ_2) и собранного из изолированных листов (кривые B_3 и ρ_3) приведены на рисунке 2 и 3.

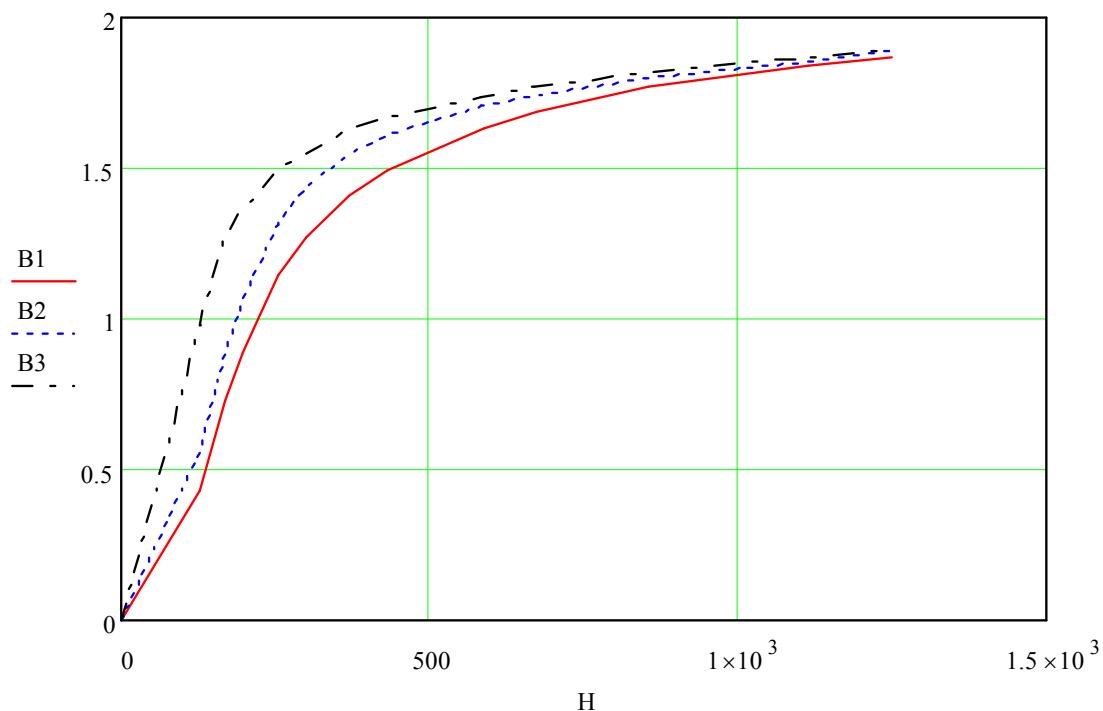


Рисунок 2 – Зависимости индукции магнитного поля B (Тл) в образце от напряженности поля H (А/ м)

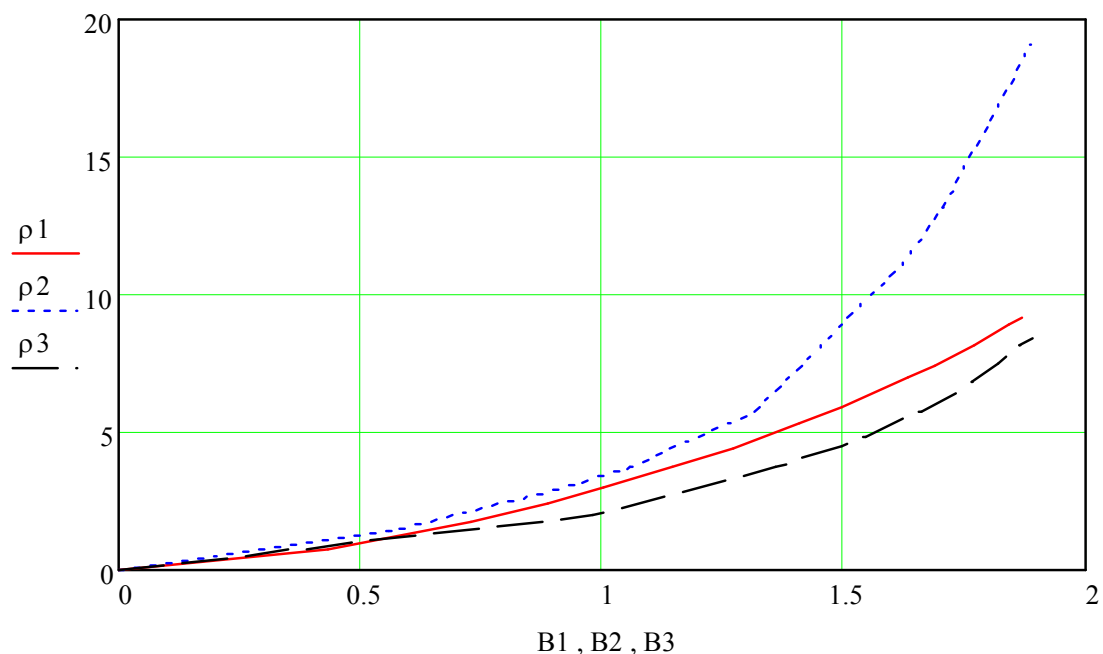


Рисунок 3 – Зависимость удельных потерь $p_{y\delta}$ (Вт/кг) от индукции магнитного поля B (Тл)

Из рисунков 2 и 3 видно, что после отжига магнитная проницаемость возросла, как и возросли потери на перемагничивание. Последнее можно объяснить спеканием листов между собой [5] и образованием «массива», когда вихревые токи значительно увеличиваются. В собранном из изолированных

листов сердечнике вихревые токи, замыкаясь в пределах каждого отдельного листа, уменьшаются по величине, меньше размагничивают сердечник и создают меньшие потери в сердечнике на его нагрев.

Рост магнитной индукции в отожженном сердечнике приведен в таблице 1 и на рисунке 4.

Увеличение удельных потерь в отожженном сердечнике приведено в таблице 2 и на рисунке 5.

Таблица 1 – Увеличение магнитной индукции B после отжига

Параметры	Результаты эксперимента								
$H, A/m$	250	300	350	400	450	500	550	600	700
$B1, Tл$	1,14	1,28	1,37	1,46	1,51	1,57	1,59	1,65	1,69
$B2, Tл$	1,246	1,43	1,52	1,59	1,62	1,66	1,68	1,72	1,75
$\Delta B, \%$	8,51	10,48	9,93	8,18	6,79	5,42	5,36	4,07	3,43

Таблица 2 – Увеличение удельных потерь $\rho_{уд}$ после отжига

Параметры	Результаты эксперимента								
$B, Tл$	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
$\rho1, Вт/кг$	2,95	3,48	4,05	4,64	5,36	5,92	6,69	7,5	8,5
$\rho2, Вт/кг$	3,55	4,27	5,24	6,45	7,58	9,03	10,57	12,9	16,2
$\Delta\rho, \%$	16,9	18,5	22,71	28,06	29,29	34,44	36,71	41,9	47,3

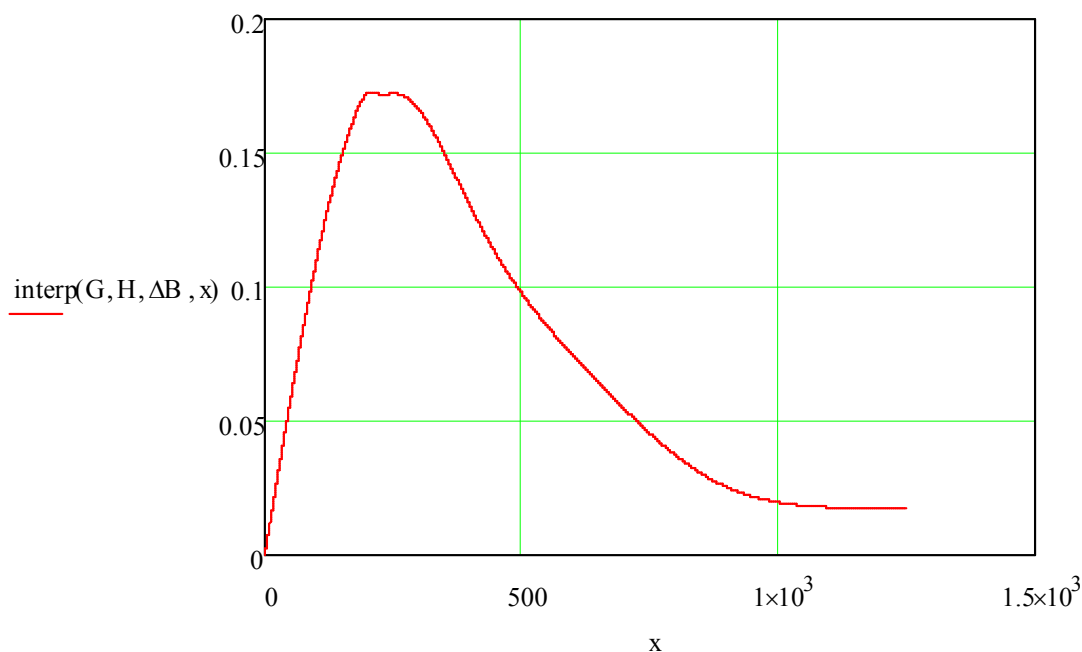


Рисунок 4 – Увеличение магнитной индукции $\Delta B(Tл)$ в зависимости от напряжённости магнитного поля $H(A/ м)$

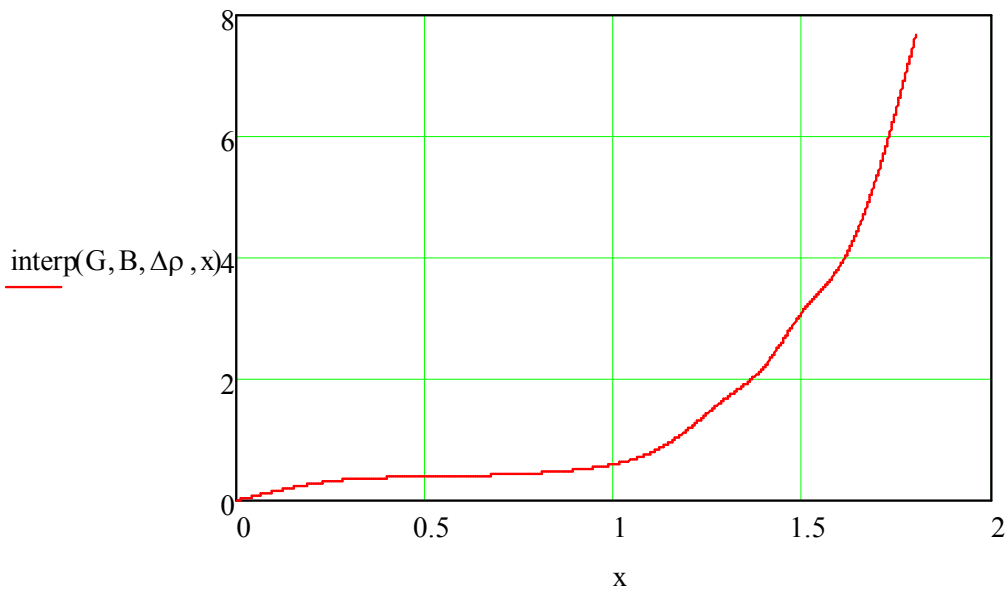


Рисунок 5 – Увеличение удельных потерь $\Delta p_{уд}$ ($Вт/кг$) в зависимости от магнитной индукции B ($Тл$)

Рост магнитной индукции в сердечнике, собранном из изолированных листов, приведен в таблице 3 и на рисунке 6.

Снижение удельных потерь в сердечнике, собранном из изолированных листов, приведено в таблице 4 и на рисунке 7.

Таблица 3 – Увеличение магнитной индукции B после изоляции листов

Параметры	Результаты эксперимента								
$H, А/м$	250	300	350	400	450	500	550	600	700
$B1, Тл$	1,14	1,28	1,37	1,46	1,51	1,57	1,59	1,65	1,69
$B3, Тл$	1,5	1,57	1,61	1,65	1,68	1,69	1,73	1,74	1,77
$\Delta B, \%$	24	18,47	14,91	11,52	10,12	7,1	8,09	5,17	4,52

Таблица 4 – Снижение удельных потерь $\rho_{уд}$ после изоляции листов

Параметры	Результаты эксперимента								
$B, Тл$	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
$\rho1, Вт/кг$	2,95	3,48	4,05	4,64	5,36	5,92	6,69	7,5	8,5
$\rho3, Вт/кг$	2,11	2,56	2,98	3,45	3,95	4,49	5,26	6,16	7,3
$\Delta \rho, \%$	28,5	26,4	26,4	25,7	26,31	24,16	21,38	17,87	14,3

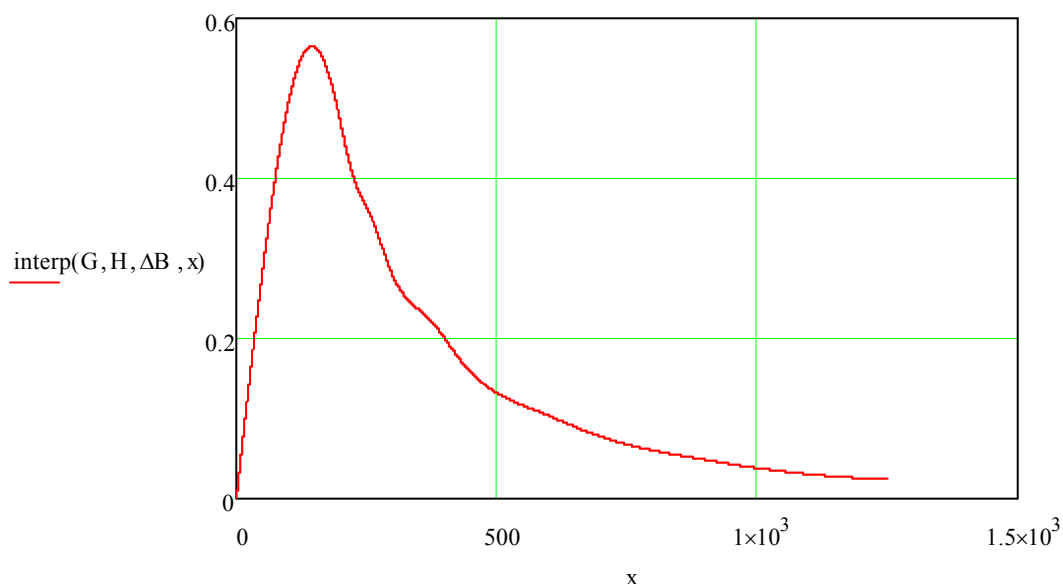


Рисунок 6 – Увеличение магнитной индукции ΔB (Тл) в зависимости от напряжённости магнитного поля H (А/м)

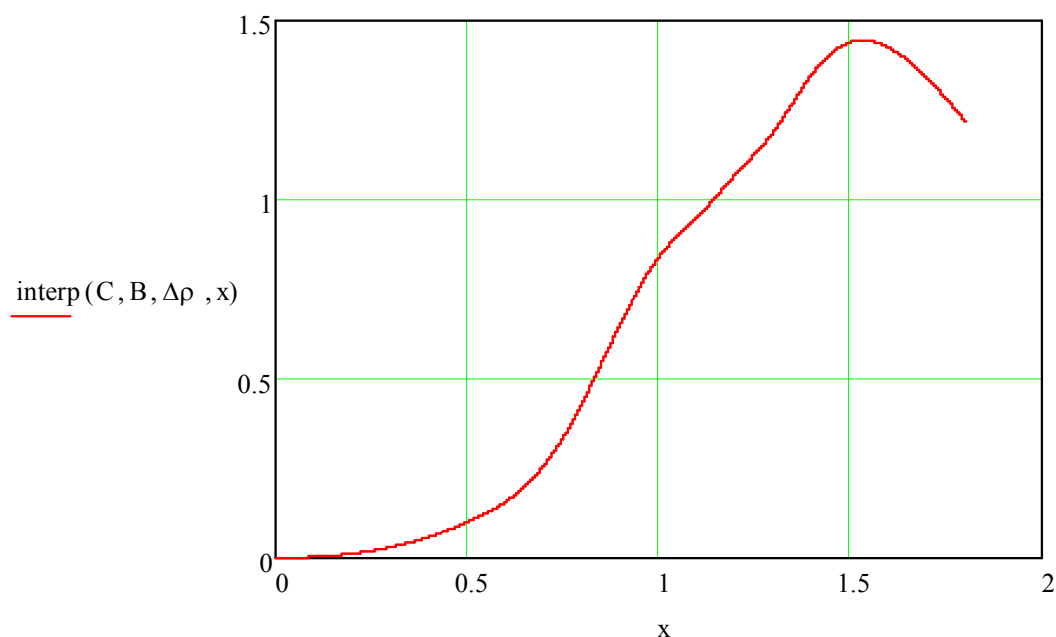


Рисунок 7 – Снижение удельных потерь $\Delta p_{уд}$ (Вт/кг) в зависимости от магнитной индукции B (Тл)

Связь между магнитной индукцией B и напряжённостью магнитного поля H показывает магнитная проницаемость μ . Зависимости магнитной проницаемости $\mu 1$ (до отжига сердечника), магнитной проницаемости $\mu 2$ (после отжига сердечника) и магнитной проницаемости $\mu 3$ (после изоляции листов) от напряжённости магнитного поля H показаны на рисунке 8.

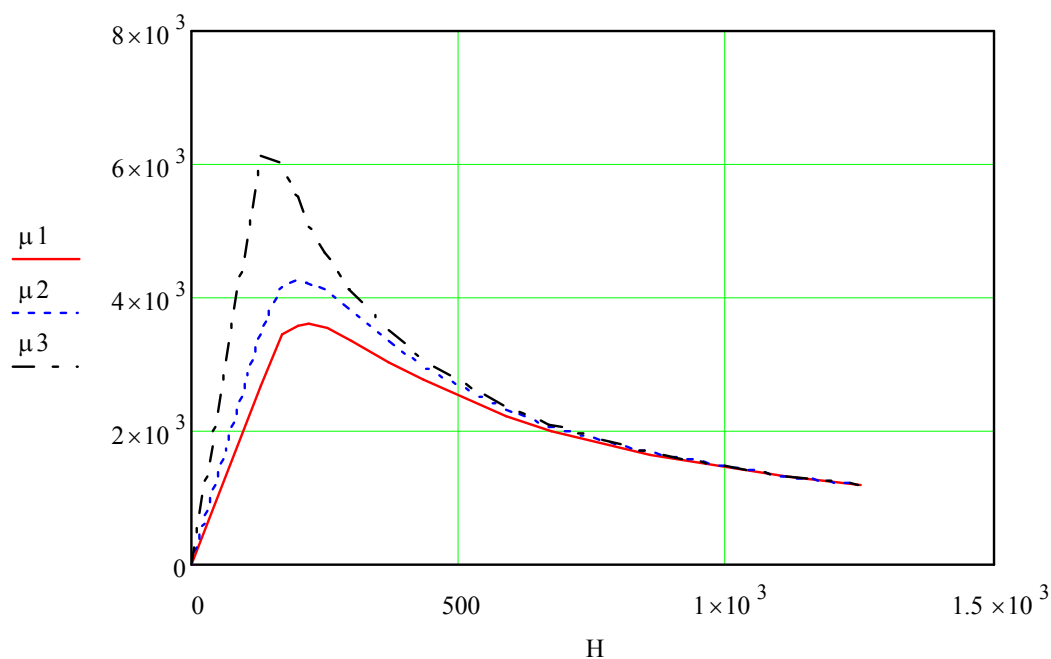


Рисунок 8 – Зависимости магнитных проницаемостей μ_1 , μ_2 и μ_3 (Гауссы) от напряжённости магнитного поля H (А/м)

Выводы:

1. Рост потерь в отожженном сердечнике объясняет спекание листов, по этой причине возникает рост вихревых токов.
2. В собранном из изолированных и отожженных листов сердечнике за счёт снижения вихревых токов снизились потери от них и полные потери, а магнитная проницаемость увеличилась по причине их размагничивающего действия.
3. Эксперимент показал необходимость повторного отжига листов после вырубki. При таком отжиге необходимо наращивать оксидную (электроизоляционную) плёнку на каждой стороне листа.

Список литературы

1. Антонов, М. В. *Технология производства электрических машин: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 582 с.:ил. – ISBN 5-283- 00608-5.*
2. Мишин, Д. Д. *Магнитные материалы: Учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 1981 – 355 с., ил.*
3. Писаревский, Э. А. *Электрические измерения и приборы М., «Энергия», 1970 – 432с., ил.*
4. Чечурина, Е. И. *Методы испытаний магнитомягких материалов в постоянных и переменных полях звуковых частот: Заочные курсы усовершенствования ИТР по метрологии и технике точных измерений, Москва – 1964.*
5. Федорченко, И.М., *Основы порошковой металлургии/ И.М. Федорченко, Р.А. Андриевский. – Киев, Изд-во АН УССР, 1963. – 420с.*