

С. В. ДЗЛИЕВ, доктор техн. наук,
А. А. ЗАВОРОТКИН, инженер,
Д. М. ЖНАКИН, аспирант,
К. Е. ПИЩАЛЕВ, инженер,
Ю. Ю. ПЕРЕВАЛОВ, аспирант,
СПбГЭТУ (ЛЭТИ), г. Санкт-Петербург

Неустойчивость при индукционном нагреве магнитной стали

Изотермическая поверхность Кюри в магнитной стали является поверхностью фазового перехода второго рода из ферромагнитного в парамагнитное состояние при нагревании и обратно при охлаждении. При индукционном нагреве магнитной стали резкое изменение магнитной проницаемости на этой поверхности и изменение ее пространственного положения приводит к пространственному перераспределению плотности индуцированного тока и источников выделяющегося тепла. Это при определенных условиях обуславливает неустойчивость поверхности фазового перехода Кюри – колебания ее во времени и в пространстве, разрывы на отдельные участки.

Неустойчивость изотермической поверхности Кюри при индукционном нагреве неподвижного цилиндра из магнитной стали проявляется в полосатом нагреве. Полосатый индукционный нагрев описан в [1, 2], где приводятся примеры из практики индукционного нагрева, получены экспериментально некоторые количественные соотношения, изложены причины и условия возникновения этого явления. В [2] сделан практически важный вывод о невозможности одновременной закалки широкой полосы на глубину меньше глубины проникновения тока из-за явления полосатого нагрева.

Относительно узкая область практического применения явления полосатого индукционного нагрева явилась причиной отсутствия интереса исследователей к этому явлению в течение долгого времени. Однако, в настоящее время повышение требований к качеству термообработки и, в частности, к сканирующей закалке, требует проведения дополнительных исследований и моделирования этого явления на современном уровне.

На рис. 1 приводится серия кадров из видеофильма, снятого при нагреве стального цилиндра в многовитковом индукторе

Ключевые слова: полосатый индукционный нагрев магнитной стали, аппроксимация $\mu(T)$ стали, неустойчивость изотермической поверхности Кюри

вом индукторе для моментов времени 14, 15, 16, 17, 19, 24 и 34 секунды с начала нагрева. В данной индукционной системе индуктор несколько короче детали, поэтому нагрев начинается со средней части детали, где на 14 секунде появляются явно видные кольца, нагретые выше и ниже точки Кюри. В последующем полосатый нагрев распространяется на всю высоту цилиндра (17 секунда), после чего температура поверхности выравнивается при значениях выше точки Кюри.

Кажущаяся на первый взгляд очевидная связь «полосатого нагрева» с зазорами между витками индуктора («тень от витков») не играет решающей роли в объяснении этого явления, так как оно наблюдается и при нагреве в одновитковом индукторе из широкой водоохлаждаемой шины (рис. 2). В данном эксперименте индуктор и деталь имеют такие же размеры, что и на рис. 1, температура также достигает точки Кюри сначала в середине заготовки (а), затем полосатый нагрев распространяется к торцам (б и в) и в конце температура выравнивается, превысив точку Кюри (г).

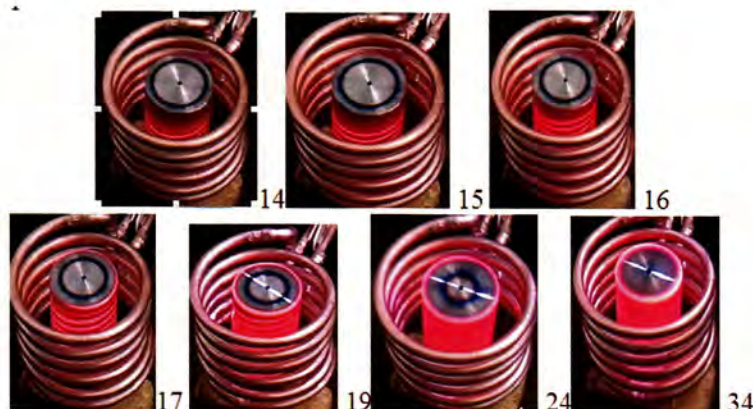


Рис. 1. Полосатый нагрев цилиндра из магнитной стали в многовитковом индукторе

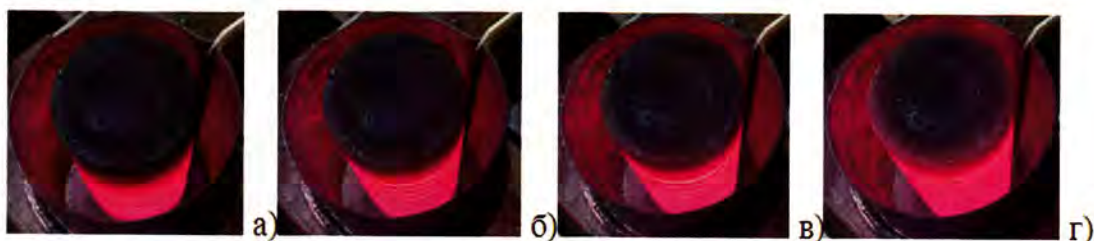


Рис. 2. Полосатый нагрев цилиндра из магнитной стали в одновитковом индукторе

Данные эксперименты полностью подтверждают выводы, сделанные в [2] по результатам исследования полосатого нагрева неподвижного цилиндра.

В [2] также сделан вывод о невозможности возникновения полосатого нагрева при сканирующей закалке узким одновитковым индуктором, когда индуктор равномерно перемещается относительно стального изделия. Однако проведенные эксперименты при сканирующем индукционном нагреве неподвижного стального цилиндра движущимся снизу вверх узким одновитковым индуктором, опровергают это положение. Для иллюстрации полосатого нагрева (автоколебаний температуры поверхности стальной детали) при сканирующем нагреве на рис. 3 приведена серия кадров из видеofilма. За поднимающимся индуктором на поверхности цилиндра остаются периодически повторяющиеся кольца, нагретые выше и ниже точки Кюри. Эти колебания температуры возникают без внешних периодических воздействий при стабилизации мощности или тока индуктора.



Рис. 3. Автоколебания температуры под индуктором при сканирующем нагреве цилиндра из магнитной стали

Фотография на рис. 4 иллюстрируют спиральный след, который может оставаться на поверхности цилиндрической детали после сканирующей индукционной поверхностной закалки с вращением. След свидетельствует о наличии областей с существенно различной температурой поверхности, что также может быть следствием неустойчивости изотермы Кюри.



Рис. 4. Спиральный след на поверхности цилиндра из магнитной стали после сканирующей закалки с вращением

Приведенные примеры экспериментально зафиксированных нелинейных эффектов наглядно свидетельствуют о возможной неустойчивости индукционных систем при нагреве деталей из магнитной

стали. Для изучения этого явления с точки зрения условий возникновения, характера и области существования неустойчивых режимов был проведен ряд исследований на компьютерных моделях.

В ходе этих исследований были использованы различные аппроксимации температурной зависимости магнитной проницаемости стали $\mu(T)$, приводимые в литературе [3, 4], а также выполнена собственная экспериментальная оценка параметра аппроксимации из [3].

Для моделирования индукционных систем путем совместного решения электромагнитной задачи в комплексных амплитудах и тепловой задачи в [3] предложена следующая формула аппроксимации справедливая для текущего значения напряженности магнитного поля H :

$$\mu(T) = 1 + (\mu - 1) \left(1 - \left(\frac{T}{T_k} \right)^n \right), \quad (1)$$

где T – текущая температура, $T_k = 750^\circ\text{C}$ – температура Кюри для стали, $\mu(T)$ – относительная магнитная проницаемость при текущей температуре, μ – относительная магнитная проницаемость при температуре 20°C , n – коэффициент, определяющий крутизну зависимости.

Компьютерные модели систем индукционного нагрева деталей из магнитной стали, основанные на совместном решении электромагнитной задачи в комплексных амплитудах и тепловой задачи, при использовании рекомендуемых в [3] значений $n = 2 \dots 4$ не описывают зафиксированные экспериментально неустойчивые режимы, т.е. качественно расходятся с экспериментальными данными.

Для получения зависимости $\mu(T)$, которая при численном моделировании процессов высокочастотного индукционного нагрева с решением электромагнитной задачи в комплексных амплитудах давала бы качественно и количественно правильные результаты, был выполнен эксперимент. В эксперименте деталь из магнитной стали нагревалась в многовитковом индукторе при стабилизации тока. Разработанная компьютерная модель этой же индукционной системы оптимизировалась по параметру n , входящему в формулу аппроксимации $\mu(T)$ (1). Полученное оптимальное значение $n = 25$, радикально отличается от рекомендованных в [3] значений $n = 2 \dots 4$. Сравнение графиков зависимостей $\mu(T)$ для $n=2$ и $n=25$ (рис. 5), построенных для напряженности магнитного поля, создаваемой индуктором в эксперименте ($H \approx 37000 \text{ А/м}$), показывает существенно более резкую нелинейность $\mu(T)$ при $n=25$ в районе точки Кюри.

На рис. 5 приведена также более сложная аппроксимация $\mu(T)$ из [4], которая также основана на эксперимен-

тальных исследованиях. Она совпадает с кривой $n=25$ в области температур $740\dots750^\circ\text{C}$, т.е. описывает резкую нелинейность в этой зоне, и занимает среднее положение между кривыми $n=2$ и $n=25$ в остальном диапазоне температур.

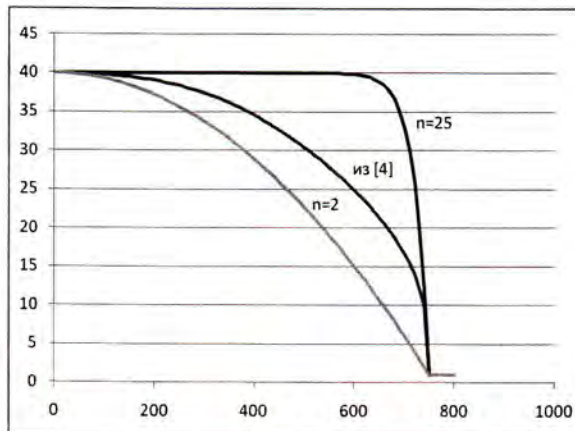


Рис. 5. Графики зависимости $\mu(T)$, рассчитанные по различным аппроксимирующим формулам

Обе аппроксимации $\mu(T)$ – по формуле (1) с $n=25$ и из [4] – использованы далее при моделировании.

Ниже приведены результаты компьютерного моделирования процесса индукционного нагрева цилиндрической детали из магнитной стали в 6-ти витковом индукторе из медной трубки (рис. 6) и в одновитковом индукторе из широкой водоохлаждаемой медной шины (рис. 7) при одинаковых внутренних диаметрах и высотах индукторов.

На рис. 6 приведены изотермы температурного поля в сечении цилиндра (рис. 6, а) и линии уровня источников тепла, выделяющегося в детали (рис. 6, б) в определенный момент нагрева в 6-ти витковом индукторе. Моделирование производилось со значением $n=25$.

На рисунке показана только верхняя половина симметричной индукционной системы.

Изотерма, соответствующая температуре Кюри 750°C , отмечена жирной линией на рис. 6, а). Видно, что изотермическая поверхность, характеризующаяся температурой Кюри, разорвана на отдельные участки, границы которых выходят на поверхность цилиндра. В поверхностном слое стального цилиндра образовались кольцевые полосы с температурой выше и ниже температуры Кюри. В горячих зонах глубина проникновения тока существенно больше, чем в промежуточных кольцевых зонах, не достигших температуры Кюри. Соответственно и сопротивление прогретых колец индуцированному току меньше, чем сопротивление холодных колец. Это обуславливает перераспределение индуцированного в цилиндре тока и неравномерное выделение тепла – в горячих кольцах тепло выделяется на большей глубине и более интенсивно. Это приводит к нарастанию разности температур между кольцевыми зонами до определенного уровня. Затем, с ростом энтальпии, растет средняя температура цилиндра, изотермическая поверхность Кюри уходит вглубь цилиндра и температура поверхности выравнивается.

Необходимо отметить, что при шести витках индуктора число «горячих» полос равно восьми, и они расположены не под витками, т.е. неустойчивость изотермической поверхности Кюри не связана напрямую с неравномерностью поля, создаваемого отдельными витками индуктора.

В подтверждение этого на рис. 7 приведены те же зависимости, рассчитанные для одновиткового индуктора из широкой медной шины. Качественно картина неустойчивости изотермической поверхности Кюри совпадает с рассмотренным случаем нагрева многovitковым индуктором и с экспериментом (рис. 2).

Таким образом, возникающая по каким либо причинам незначительная неравномерность нагрева по длине детали (краевой эффект, влияние отдельных витков, предварительный неравномерный нагрев детали, движение детали относительно индуктора) усиливается и приводит к появлению кольцевых полос при прохождении изотермы Кюри.

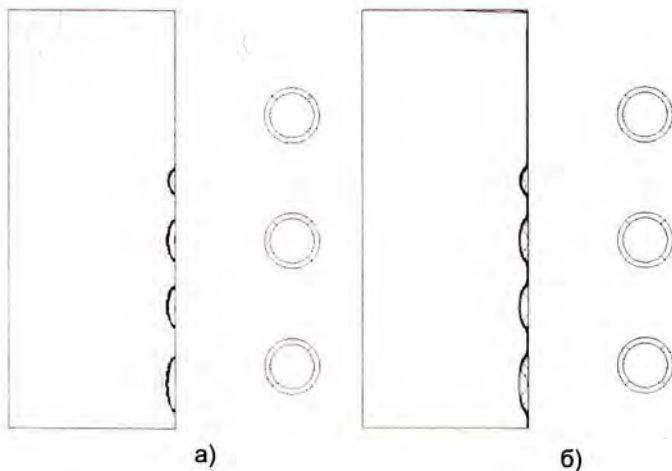


Рис. 6. Температурное поле (а) и поле источников тепла (б) в сечении цилиндра из магнитной стали в определенный момент нагрева многovitковым индуктором

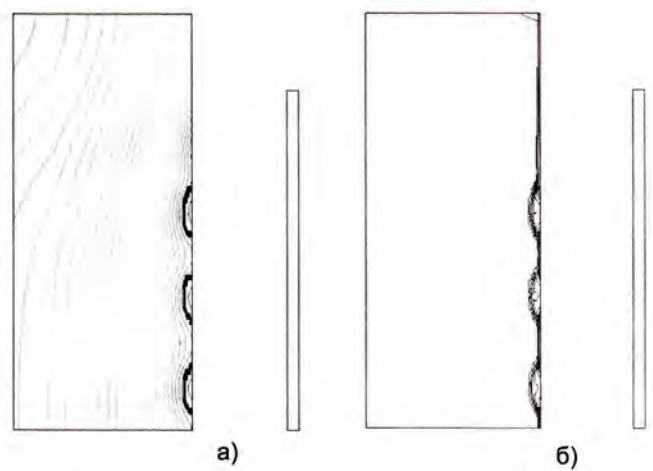


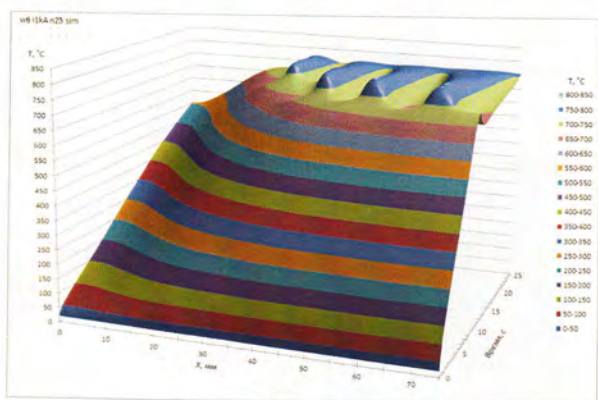
Рис. 7. Температурное поле (а) и поле источников тепла (б) в сечении цилиндра из магнитной стали в определенный момент нагрева одновитковым индуктором

На рис. 8 и рис. 9 приводятся трехмерные графики зависимости температуры поверхности цилиндра от координаты x (расстояния от торца цилиндра) и от времени при нагреве 6-ти витковым индуктором: а) объемный график функции $T(x, t)$, б) – вид сверху на этот график – изотермы.

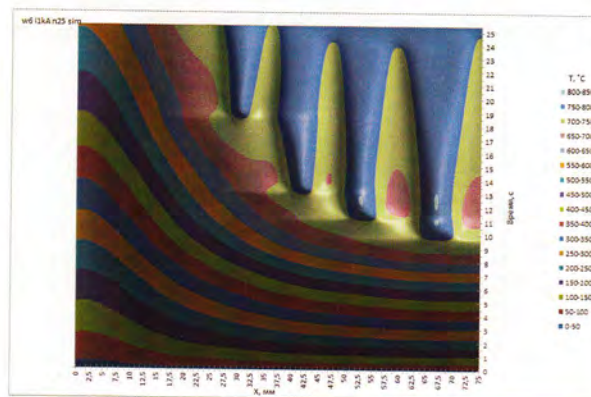
Результаты рис. 8 получены при аппроксимации $\mu(T)$ по формуле (1) при $n=25$, а рис. 9 – по формулам из [4].

Видно, что при нагреве до $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура поверхности по длине детали начинает колебаться, т. е. появляются чередующиеся кольца, нагретые выше и ниже точки Кюри.

Аналогичные зависимости, полученные в модели при использовании аппроксимации $\mu(T)$ из [3] с рекомендованным там значением $n=2$ (рис. 10), не отражают неустойчивости изотермы Кюри, т. е. дают качественно отличный от эксперимента результат.

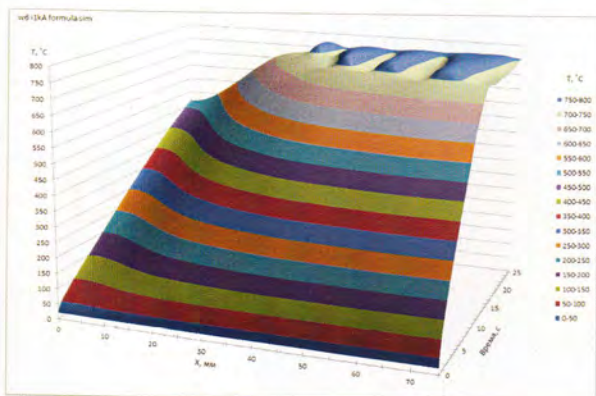


а)

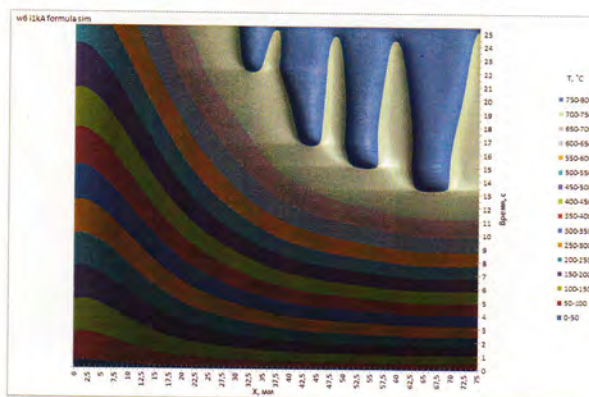


б)

Рис. 8. Изменение температурного поля на поверхности стального цилиндра в процессе нагрева многовитковым индуктором, рассчитанное при аппроксимации $\mu(T)$ по формуле (1) при $n=25$

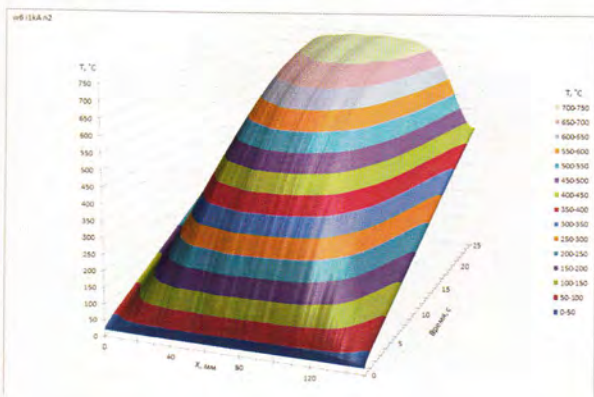


а)

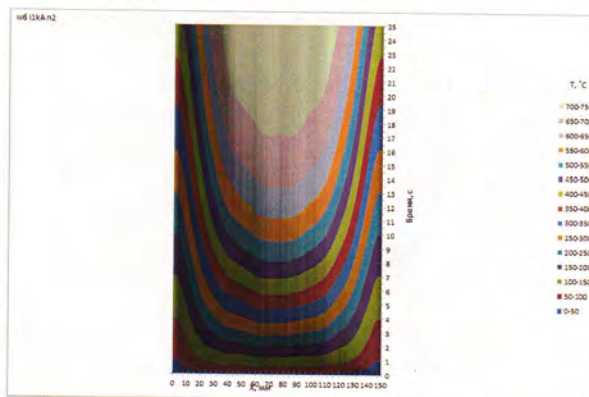


б)

Рис. 9. Изменение температурного поля на поверхности стального цилиндра в процессе нагрева многовитковым индуктором, рассчитанное при аппроксимации $\mu(T)$ по формулам из [4]



а)



б)

Рис. 10. Изменение температурного поля на поверхности стального цилиндра в процессе нагрева многовитковым индуктором, рассчитанное при аппроксимации $\mu(T)$ по формуле (1) при $n=2$

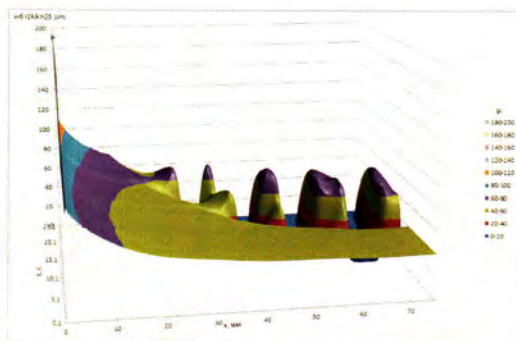
На рис.11...13 показаны зависимости магнитной проницаемости на поверхности детали от координаты x и от времени при нагреве 6-ти витковым индуктором: а) объемный график функции $\mu(x, t)$, б) – вид сверху на этот график – линии уровня. Зависимости получены на компьютерных моделях с различными формулами аппроксимации $\mu(T)$: формула (1) с $n=25$ – рис. 11; формула из [4] – рис. 12; формула (1) с $n=2$ – рис. 13.

На рис. 11 и 12 видно, что в зоне температур, близких к точке Кюри, магнитная проницаемость резко меняется в соседних областях, что и приводит к неустойчивости.

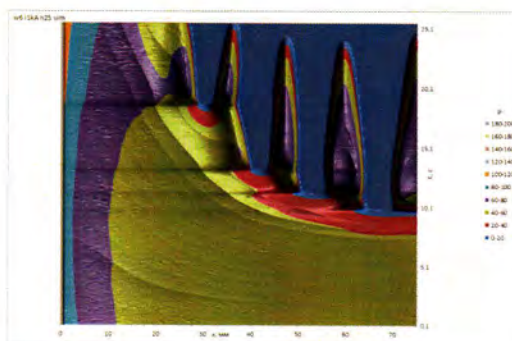
Для сравнения, на рис. 14...16 показаны результаты моделирования нагрева цилиндра из магнитной стали в широком одновитковом индукторе при $n=25$.

На рис. 14 приводятся трехмерный график зависимости температуры поверхности цилиндра от координаты x (расстояния от торца цилиндра) и от времени: а) объемный график функции $T(x, t)$, б) – вид сверху на этот график – изотермы.

На рис. 15 показана зависимость магнитной проницаемости на поверхности детали от координаты x и от времени: а) объемный график функции $\mu(x, t)$, б) – вид сверху на этот график – линии уровня.

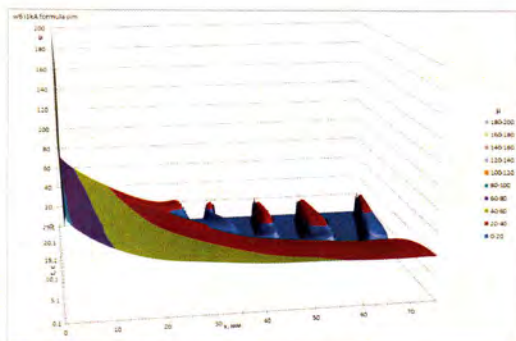


а)

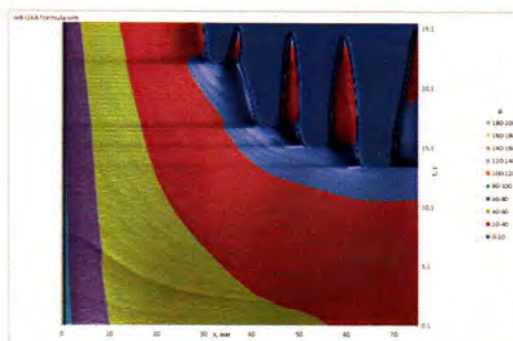


б)

Рис. 11. Изменение поля $\mu(x)$ на поверхности стального цилиндра в процессе нагрева многовитковым индуктором, рассчитанное при аппроксимации $\mu(T)$ по формуле (1) при $n=25$

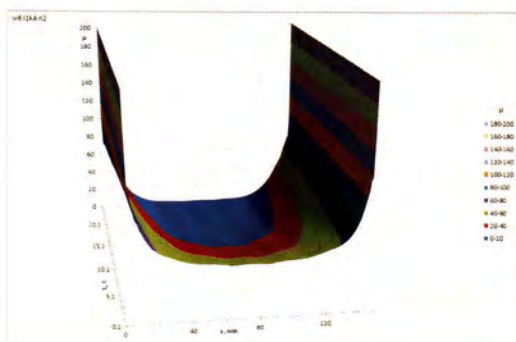


а)

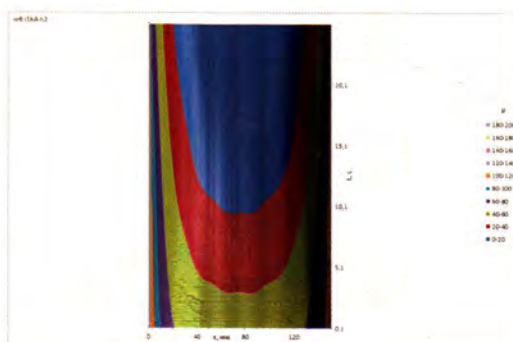


б)

Рис. 12. Изменение поля $\mu(x)$ на поверхности стального цилиндра в процессе нагрева многовитковым индуктором, рассчитанное при аппроксимации $\mu(T)$ по формулам из [4]



а)



б)

Рис. 13. Изменение поля $\mu(x)$ на поверхности стального цилиндра в процессе нагрева многовитковым индуктором, рассчитанное при аппроксимации $\mu(T)$ по формуле (1) при $n=2$

На рис. 16 приведена зависимость источников тепла на поверхности цилиндра от координаты x и от времени при постоянном токе индуктора.

Видно, что в начале нагрева поверхностная мощность велика, распределяется достаточно равномерно по длине детали, но на краях резко падает из-за того, что длина одновиткового индуктора несколько меньше, чем длина детали. После прогрева до температуры, близкой к

температуре Кюри, поверхностная мощность резко падает по двум причинам: во-первых, из-за снижения активного сопротивления индуктора при постоянном токе индуктора, и, во-вторых, из-за выделения части мощности в глубинных слоях цилиндра.

Это является причиной общего замедления нагрева с постоянным током индуктора при прохождении температуры Кюри.

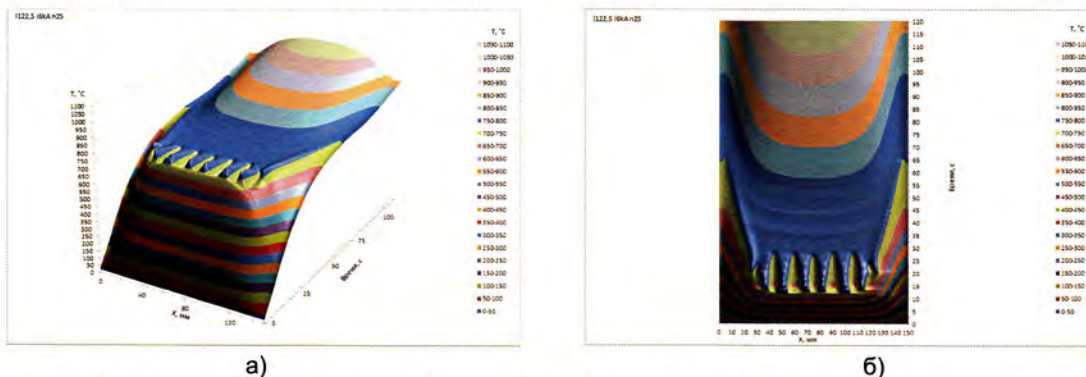


Рис. 14. Изменение температурного поля на поверхности стального цилиндра в процессе нагрева одновитковым индуктором, рассчитанное при аппроксимации $\mu(T)$ по формуле (1) при $n=25$

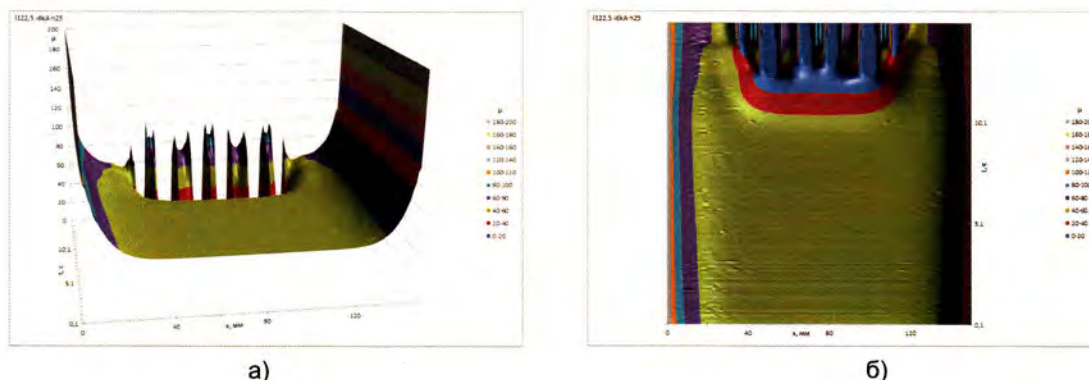


Рис. 15. Изменение поля $\mu(x)$ на поверхности стального цилиндра в процессе нагрева одновитковым индуктором, рассчитанное при аппроксимации $\mu(T)$ по формуле (1) при $n=25$

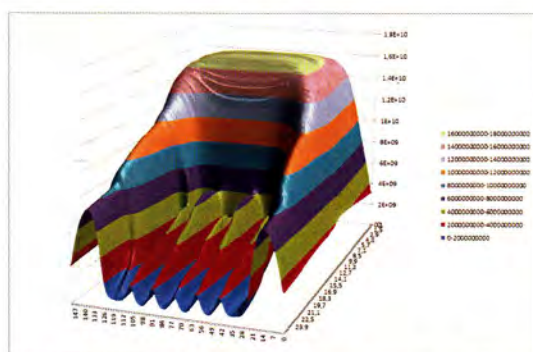


Рис. 16. Изменение поля источников тепла на поверхности стального цилиндра в процессе нагрева одновитковым индуктором, рассчитанное при аппроксимации $\mu(T)$ по формуле (1) при $n=25$

В заключение необходимо отметить, что знание условий возникновения и области существования неустойчивых режимов позволит повысить качество проектирования технологических процессов с индукционным нагревом магнитных сталей, таких как сканирующая закалка, нагрев ленты, шовная сварка труб, высокий отпуск, отжиг и др.

В настоящее время проведены исследования и готовятся к публикации материалы по моделированию сканирующего нагрева узким одновитковым индуктором цилиндрических деталей и ленты из магнитной стали.

Список литературы

1. Лозинский М. Г. Промышленное применение индукционного нагрева. М.: АН СССР, 1958. 472 с.
2. Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. изд. «Энергия», 1965, 552 с.
3. Немков В. С., Демидович В. Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 286 с.
4. Владимиров С. Н., Земан С. К., Рубан В. В. Аналитические соотношения, аппроксимирующие температурно-полевою зависимость магнитной проницаемости конструктивных сталей. Изв. Томского политехнического университета. 2009. Т. 315. № 4. С. 100...104