

---

---

УДК 621.762;537.622

**В.М. Константинов, В.Г. Дашкевич, В.Г. Щербаков**  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

### **АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫМИ СТАЛЬНЫМИ И ЧУГУННЫМИ ПОРОШКАМИ**

Как известно, при нагреве металлических макрообъектов (деталей) в переменном электромагнитном поле их помещают внутри индуктора или около него. Обычно система индуктор-заготовка представляет собой бессердечниковый трансформатор, в котором индуктор является первичной обмоткой. Нагреваемая деталь является вторичной обмоткой, замкнутой накоротко. Магнитный поток между обмотками замыкается по воздуху. На высокой частоте вихревые токи вытесняются образованным ими же магнитным полем в тонкие поверхностные слои заготовки (скин-эффект), в результате чего их плотность резко возрастает и заготовка разогревается по закону Джоуля-Ленца. Нижерасположенные слои металла прогреваются за счет теплопроводности. В скин-слое толщиной ( $\Delta$ ) плотность тока уменьшается в  $e$  раз относительно плотности тока на поверхности заготовки, при этом в скин-слое выделяется 86,4 % тепла (от общего тепловыделения) [1–3]. Глубина скин-слоя зависит от частоты излучения, чем выше частота, тем тоньше скин-слой. Также она зависит от относительной магнитной постоянной ( $\mu$ ) материала заготовки – чем больше  $\mu$ , тем меньше скин-слой. Для железа ( $T_{\text{Кюри}}=1043$  К), кобальта ( $T_{\text{Кюри}}=1388$  К), никеля ( $T_{\text{Кюри}}=627$  К) и магнитных сплавов при температуре ниже точки Кюри  $\mu$  имеет величину от нескольких сотен до десятков тысяч. Для остальных материалов (расплавы, цветные металлы, жидкие легкоплавкие эвтектики, графит, электролиты, электропроводящая керамика и т.д.)  $\mu$  примерно равна единице. Например, при частоте 60 кГц глубина скин-слоя для меди около 1,5 мм, для железа  $\approx 3,5$  мм.

Выше точки Кюри интенсивность теплового движения атомов ферромагнетика оказывается достаточной для разрушения его самопроизвольной намагниченности и изменения симметрии, в

результате ферромагнетик становится парамагнетиком. Деталь намагничивается во внешнем магнитном поле в направлении этого поля. Это приводит к резкому падению значения магнитной проницаемости с порядка  $10^2 - 10^4$  до единиц [2]. Вследствие этого увеличивается глубина скин-слоя в детали, что ведёт к гораздо большему тепловыделению и более быстрому нагреву детали. Величина скин-слоя растёт с уменьшением магнитной проницаемости и уменьшается с увеличением магнитной постоянной. Вследствие этого тепловыделение в нагреваемой детали увеличивается с уменьшением магнитной постоянной, это объясняется тем, что в большем скин-слое токи будут захватывать больший объём и, следовательно, тепловыделение в детали будет больше [4].

Известно, что магнитомягкие сплавы (стали) лучше поддаются нагреву в индукторе, чем магнитотвёрдые, так как у них коэрцитивная сила (магнитная твёрдость) меньше [1]. Уменьшение размера зерна, наклёп, напряжения в решётке, фазовые превращения вызывают увеличение коэрцитивной силы, следовательно детали, изготовленные из сплавов с большим размером зерна, будут нагреваться в индукторе интенсивнее, потому что у них коэрцитивная сила будет меньшей, чем у мелкозернистых.

Аустенитная парамагнитная сталь будет нагреваться быстрее ферромагнитной [4-7]. Из рис. 2 видно, что у ферритной стали после достижения точки Кюри происходит резкое падение температуры, токи распределяются по всему объёму детали и нагрев происходит медленнее. У аустенитной же стали токи текут сразу по всему объёму, благодаря её парамагнитным свойствам. Это значительно увеличивает скорость нагрева [4].

Металлический порошок (особенно ферромагнитный) полученный с помощью предварительного диффузионного легирования [8-13], является практически прозрачным для электромагнитного поля (см. рис. 1, 2). Гранулы металлической части изолированы друг от друга частицами флюса, поэтому электропроводность порошкового слоя и соответственно выделение энергии в нём очень малы.

Даже если порошок чистый и не содержит гранул флюса, электропроводность в нём в 15–20 раз меньше, чем у макродетали. Это объясняется в основном изоляцией гранул порошка воздушными пузырьками [3]. При сплавлении гранул шихты электропроводность образовавшегося сплошного слоя металла возрастет скачком и одновременно уменьшается расстояние между поверхностями индуктора. Это приводит к резкому возрастанию выделения энергии в этих участках наплавляемой поверхности [6].

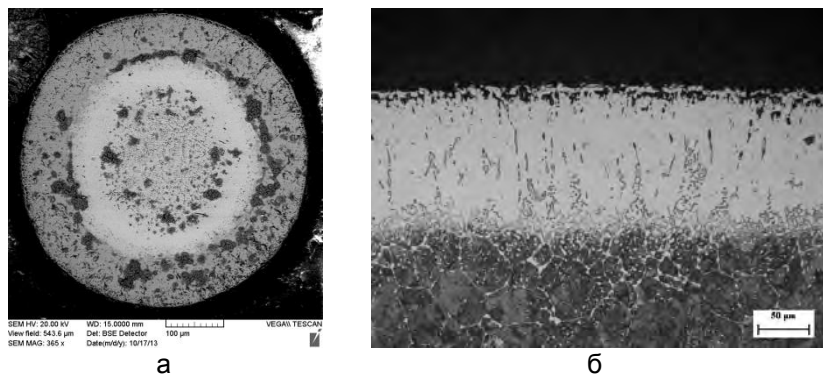


Рис. 1. Диффузионно-легированный сплав из металлических отходов производства:  
а – диффузионно-легированная дробь ДЧЛ 08;  
б – диффузионно-легированная стружка SUJ2

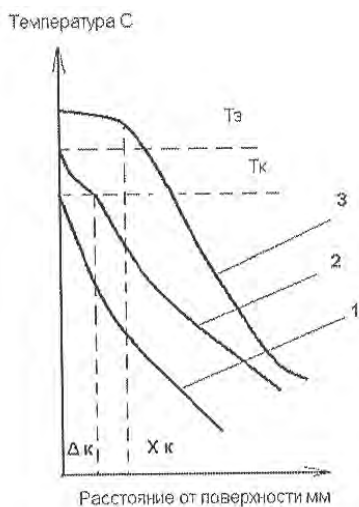


Рис. 2. Распределение температуры по сечению изделия при индукционном нагреве [4] ( $T_k$  – точка Кюри;  $T_3$  – температура закали;  $\Delta$  – толщина скин-слоя;  $X_k$  – заданная глубина закали):  
1 – температура поверхности не достигла точки Кюри (начальный момент нагрева); 2 – температура поверхности выше  $T_k$  (середина нагрева по времени); 3 – металл прогрелся на заданную глубину закали (окончание нагрева)

### **Особенности взаимодействия переменного электромагнитного поля при индукционном нагреве с металлическими микрообъектами размером 0,1–1,0 мм**

Магнитные домены имеют размеры порядка  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  м [5]. Частицы рассматриваемого порошка –  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  м. Ферромагнитный порошок является практически прозрачным для электромагнитного поля. Частицы порошка выстраиваются по силовым линиям поля, вибрируют из-за того, что оно переменное и, более того, высокочастотное. Парамагнитный порошок меньше подвержен вибрации в электромагнитном поле, вследствие анизотропии ориентации доменов в нём, однако в нём тоже не наблюдается наведения тока и, как следствие этого, непосредственный его нагрев [6].

Металлический порошок в высокочастотном электромагнитном поле не нагревается по двум причинам:

1. Гранулы металлической части изолированы друг от друга частицами флюса, поэтому электропроводность порошкового слоя и соответственно выделение энергии в нём очень малы.

2. Гранулы порошка имеют размер, сопоставимый с размерами доменов в металле, то есть каждая частичка порошка представляют собой как бы отдельный домен. Поэтому перестройки такой доменной структуры как единого целого происходить не может и токи в частицах порошка не протекают.

Размер доменов слабо зависит от размера зерна в металле. Изменить размер домена очень сложно (он  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  см), но одним из способов ограничения роста размера доменов является увеличение концентрации дефектов кристаллического строения. Эффективнее всего увеличение плотности дислокаций. Они замедляют рост зёрен в кристаллах сплавов и тем самым способствуют ограничению размера доменов [5].

Существенное значение на нагрев частиц в анализируемых условиях оказывает их размер. Гранулометрически самостоятельные частицы металлического порошка будут лучше нагреваться в электромагнитном поле если:

1) их размер будет не меньше  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  см для создания доменной структуры на уровне одной частицы (порядка 100 доменов в грануле порошка);

2) между свободно насыпанными частицами порошка будет увеличена электропроводность.

Выполненный анализ свидетельствует о решающей роли воздействия физических (магнитных) свойств порошка на результаты индукционного нагрева. Известно, что при использовании

ферромагнитного порошка тепловыделение непосредственно в наплавляемой шихте не происходит. В то же время парамагнитному порошку не требуется преодолевать точку Кюри для выстраивания своих доменов по силовым линиям поля, а следовательно, этот порошок сразу начнёт греться (хоть и слабее монолитной детали) под воздействием наведённых токов. Это значит, что парамагнитный порошок использовать для указанных задач предпочтительнее.

### **Рекомендации по физическим свойствам металлического порошка для эффективного индукционного нагрева и последующего расплавления**

1. Парамагнитный порошок более предпочтителен.
2. Порошок с меньшей магнитной проницаемостью более эффективно нагревается в переменном магнитном поле.
3. Чем ниже точка Кюри нагреваемого порошка, тем лучше.
4. Композиционный порошок с дополнительной проводящей оболочкой лучше однородного металлического. На гранулы порошка лучше нанести тонкий слой высокопроводящего металла для улучшения электропроводности наплавляемого на деталь порошка.

### Список литературы

1. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1977. – 650 с.
2. Иванов В.Н., Фролов В.Я., Иванов Д.В. Индукционный нагрев металлов. Теория и практика. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2008. – 362 с.
3. Ткачёв В.Н., Фиштейн Б.М., Казенцев Н.В. Индукционная наплавка сплавов. – М.: Машиностроение, 1970. – 183 с.
4. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева / [А.И. Гордиенко и др.] ; Национальная академия наук Беларуси, Физико-технический институт. – Мн.: Белорусская наука, 2009. – 287 с.
5. Федорченко И.М. Энциклопедия неорганических материалов: в 2 т. – Киев: Главная редакция Украинской советской энциклопедии, 1977. – 2 т.
6. Ткачёв В.Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания. – М.: Машиностроение, 1995. – 334 с.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: в 10 т. – М.: Наука, 1987. – 10 т.
8. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.

9. Ворошнин Л.Г., Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. – 2-е изд., перераб. и доп. – Мн.: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001. – 148 с.
10. Износостойкие газотермические покрытия из диффузионно-легированных порошков на основе чугунной стружки / В.М. Константинов [и др.]; под ред. Ф.И. Пантелеенко. – Мн.: Технопринт, 2005. – 146 с.
11. Щербаков В.Г. Снижение температуры плавления диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки // Литье и металлургия. – 2014. – № 1 (74). – С. 97–100.
12. Щербаков В.Г. Получение диффузионно-легированных сплавов в подвижных порошковых средах из металлических отходов производства для индукционной наплавки и пути повышения их технологических свойств // Литейные процессы: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – Вып.13. – С. 90–98.
13. Щербаков В.Г. Оплавление диффузионно-легированных сплавов из металлических дискретных металлоотходов для получения защитных покрытий ТВЧ // Литейные процессы: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. – Вып.14. – С. 15–23.

УДК 621.74.046

**В.В. Аникеев**

Самарский государственный технический университет, г. Самара

### **ПОВЫШЕНИЕ ВЫХОДА ГОДНОГО ПОЛУНЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ**

Технология полунепрерывного литья стальных заготовок большого сечения (500–700 мм) для электрошлакового, вакуумно-дугового переплавов и прессования имеет специфические особенности в сравнении с литьём в изложницы. Отличие состоит в отсутствии конусности заготовки и её большой относительной длине