

Д.А. Посмитюха

(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

ОСОБЕННОСТИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПРОВОЛОКИ

На метизных предприятиях Украины находится в эксплуатации устарелое и энергоёмкое термическое оборудование для производства оцинкованной проволоки, модернизация которого не позволяет повысить КПД до 55%. Столь низкий КПД отчасти обусловлен большими габаритами проходных электропечей отжига (20-25)х(2-2,5)х(~1,5)м и, как следствие, значительными потерями тепла с поверхности в окружающую среду. Проблема повышения эффективности использования энергии сегодня является актуальной и требует новых технологических подходов и решений.

Последними разработками в области термической обработки являются колпаковые печи отжига проволоки в защитной среде (N_2 , H_2) с электро- или газонагревом, а также проходные печи термической обработки с газонагревом. Колпаковые электропечи отжига обеспечивают равномерность температуры до +/- 3К, на них исключена опасность слипания в мотках проволоки малых диаметров. Колпаковые печи как с электронагревом, так и с газонагревом, в отличие от проходных, требуют однородность загрузки, т.е. возможен отжиг проволок с допустимым различием их диаметров, марки стали. Колпаковые печи сложны в конструкции и дорогостоящи. При лучшем качестве отжига они по экономичности уступают колпаковым и проходным печам с газовым нагревом. Применение природного газа для нагрева проволоки улучшает производство с экономической точки зрения, однако не всегда способствует повышению качества. К примеру, на проходных газовых печах при отжиге на проволоке осаждаются продукты сгорания газа, что ухудшает теплопередачу и требует дополнительной очистки перед оцинкованием.

Прямой электронагрев с использованием сопротивления самой проволоки не получил распространения, так как трудно было достичь абсолютно точной температуры, из-за отклонений калибровки, различий в химическом составе и сопротивлении проволоки, а также полного отсутствия аккумулятора тепла, несовершенства контактов между проволокой и токопроводящими клеммами.

Существуют установки индукционного отжига пучка проволоки, но в комплексе с электропечью. Проходные индукционные установки для отжига сварочной проволоки под омеднение выпускают в Санкт-Петербурге, однако данная технология по производительности уступает вышечисленным. Это малые скорости (в 2-3 раза меньше, чем для проходных газо- и электропечей), ограничения на количество пропускаемых через индуктор проволок (10-12), а также необходимость использования в загрузке проволок только одного диаметра

При производстве оцинкованной проволоки необходима технология с низкими энергозатратами и высоким качеством отжига. Для метизного производства необходима технология термической обработки, которая

позволит производить обработку проволоки с высокими показателями качества, скорости и эффективности. Если рассматривать индукционный нагрев, то он характеризуется высоким КПД, качеством нагрева вследствие быстроты процесса, отсутствием загрязнений, достижимостью любых температур, гибкостью и высокой точностью управления, что идеально для нагрева проволоки. Однако существуют и особенности индукционного нагрева проволоки. Они обусловлены отсутствием методик расчета данного типа загрузки.

Индукционный нагрев осуществляется в специальных нагревателях, основным элементом которых является индуктор. Наибольшее распространение получили индукторы цилиндрического типа, которые просты в изготовлении, надежны, обладают высоким полным КПД и обеспечивают минимальное окисление заготовок вследствие слабого доступа воздуха в зону нагрева (нагрев в застойной атмосфере). Этот тип индуктора наиболее распространен в практике.

Высокие значения КПД обеспечиваются, прежде всего, расчетом параметров индукционного нагрева под определенные размеры нагреваемого тела. Соотношение размеров индуктора и нагреваемого тела, частота тока и магнитная проницаемость, удельное сопротивление металла – все это определяет эффективность нагрева, т.е. электрический КПД.

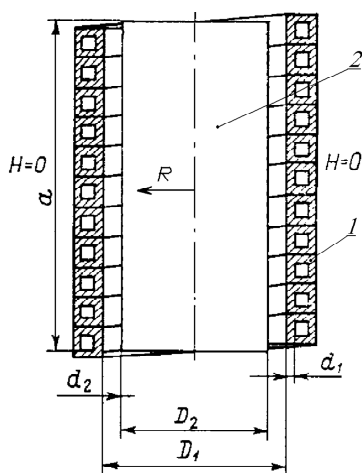


Рис.1. Система индуктор (1) – металл (2).

Чтобы не усложнять анализ учетом всех факторов, рассмотрим отрезок *a* системы бесконечной длины. Магнитное поле в зазоре между индуктором и цилиндром будем считать равномерным, а вне индуктора равным нулю (рис.1). Считается, что магнитная проницаемость среды и удельное сопротивление постоянны во всех точках сечения. Напряженность магнитного поля **H** направлена вдоль оси цилиндра; при условии бесконечной протяженности системы и при осевой симметрии напряженность поля внутри цилиндра зависит от координаты **R**. Это же относится и к напряженности электрического поля **E**.

КПД индуктора равен отношению полезной мощности P_2 , переданной в цилиндр, к полной мощности P_{II} , подведенной к индуктору [1–7]:

$$\eta_{II} = \frac{P_2}{P_{II}} = \frac{P_2}{\Delta P_{II} + P_2} = \frac{I_{II}^2 r_2'}{I_{II}^2 r_1 + I_{II}^2 r_2'} = \frac{1}{1 + r_1/r_2'}, \quad (1)$$

где: $\Delta P_{II} = I_{II}^2 r_1$ – потери в проводе индуктора; $r_1 = \omega^2 \pi D_1 \rho_1 / (a g \Delta_1)$ – активное сопротивление провода индуктора, имеющего ω витков, намотанных с плотностью g ; $r_2' = \omega^2 \pi D_2 \rho_2 / (a \Delta_2)$ – активное сопротивление цилиндра,

приведенное к току индуктора; $\Delta = 503\sqrt{\rho/(\mu f)}$ – глубина проникновения тока в металл [1–6]. Подставив вместо r_1 и r'_2 их значения, получим, учитывая, что индуктор выполняется из меди и $\mu_1 = 1$, получим:

$$\eta_{II} = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2} \frac{\rho_1}{g} \frac{\Delta_2}{\rho_2 \Delta_1}} = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2} \frac{1}{g} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \mu_2}}}. \quad (2)$$

Таким образом, КПД индуктора зависит от соотношения диаметров индуктора и цилиндра, удельного сопротивления и магнитной проницаемости материалов, но не зависит от частоты. Последнее объясняется тем, что r_1 и r'_2 прямо пропорциональны корню квадратному из частоты. Формула (2) показывает, что наибольший КПД будет при нагреве ферромагнитных материалов с большим удельным сопротивлением и при $D_1/D_2 \rightarrow 1$.

Если же использовать индуктор для нагрева одной нити проволоки, то достичь высоких значений КПД будет проблематично. Технически сложно изготовить индуктор, внутренний диаметр которого сопоставим с диаметром проволоки $D_2 = 1,6 - 4 \text{ мм}$. При использовании индукторов большего диаметра необходимо учитывать нелинейный характер физических свойств нагреваемого тела. При расчете индукционного нагрева применяются специальные цилиндрические функции Бесселя нулевого порядка, которые позволяют достаточно точно описать электромагнитные процессы в системе индуктор – нагреваемый цилиндр при осевой симметрии. Тогда сопротивление проволоки, приведенное к току индуктора [6]:

$$r'_2 = \omega^2 \frac{\pi D_2}{a} \frac{\rho_2}{\Delta_2} \frac{m_2 A}{\sqrt{2}},$$

а КПД индуктора

$$\eta_{II} = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{g D_2} \cdot \frac{\sqrt{\rho_1}}{\sqrt{\mu \rho_2}} \frac{\sqrt{2}}{m_2 A}}, \quad (3)$$

где $A = \frac{2}{m_2} \frac{\text{ber } m_2 \text{ber}' m_2 + \text{bei } m_2 \text{bei}' m_2}{\text{ber}^2 m_2 \text{bei}^2 m_2}$; $m_2 = \frac{\sqrt{2} R_2}{\Delta_2} = \frac{D_2}{\sqrt{2} \Delta_2}$ – относительная координата; R – переменный радиус.

КПД индуктора при нагреве проволоки можно повысить путем увеличения ее магнитной проницаемости. Достигается это повышением частоты тока и уменьшением напряженности магнитного поля, что приведет к увеличению длины индуктора при неизменности P_2 .

При $m_2 > 6$ дробь $\sqrt{2}/(m_2 A) \approx 1$, что характерно для частного случая резко выраженного поверхностного эффекта; КПД достигает предельного значения. В литературе для значений $D_1/D_2 = 2$ приводится полоса оптимальных частот при нагреве длинных стальных цилиндров до температуры выше 750°C . Для $3/D_2^2 < f < 6/D_2^2$ оптимальная полоса частот будет в пределах от 0,28 до 1,75 МГц, что в комплекте с индуктором технически сложно реализовать. Одной из трудностей, при широком ассортименте проволоки, является то, что для индукционного нагрева каждого из диаметров проволок необходим соответствующий индуктор.

Анализ выражения (3) показывает, что максимальная мощность на единицу объема весьма протяженного круглого цилиндра, помещенного в *однородное поле* заданной интенсивности, достигается при глубине проникновения Δ_2 , равной 0,57 диаметра цилиндра радиусом R_2 [4]:

$$P' = 0,25 \cdot 10^{-3} \frac{H^2}{R_2} \sqrt{\rho_2 \mu_2 f} F_2\left(\frac{R_2}{\Delta_2}\right), \text{ Вт/см}^3. \quad (4)$$

В литературе [4] рассмотрен случай индукционного нагрева совокупности цилиндров (рис. 2). Подход к расчету данной системы следующий: предполагается, что в просторный индуктор, частота и ток в котором поддерживаются постоянными, помещен металлический цилиндр, у которого $R_2 \gg \Delta_2$. При этом в цилиндре выделяется некоторая мощность. В индуктор вместо одного цилиндра вносят два, с общей массой равной что и у первого. Радиусы их будут в $\sqrt{2}$ раза меньше радиуса первого цилиндра, а суммарная мощность, выделяемая в них, будет в $\sqrt{2}$ раза больше (рис. 3).

Продолжая процесс дробления цилиндра, в соответствии с формулой (4) мощность, выделяющаяся в пучке цилиндров, первоначально растет, а затем постепенно замедляется. При радиусе единичного цилиндра, равном 1,75 глубины проникновения Δ_2 , мощность станет максимальной (рис. 3).

При дроблении цилиндров сумма длин окружностей постепенно увеличивается, следовательно, при постоянной глубине проникновения Δ_2 объем, в котором выделяется мощность, увеличивается.

Применительно к нагреву пучка проволоки, следует отметить некоторые важные моменты:

- 1) ранее рассмотрен просторный индуктор, в котором создается *однородное поле* заданной интенсивности;
- 2) диаметры цилиндров одинаковы;
- 3) магнитная проницаемость постоянна во всех точках сечения цилиндров.

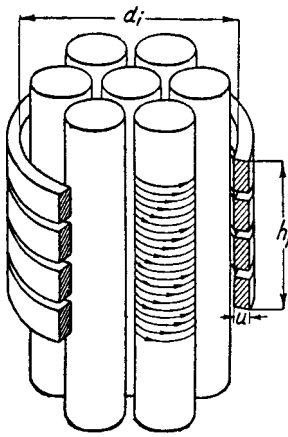


Рис.2. Общий вид нагрева совокупности цилиндров

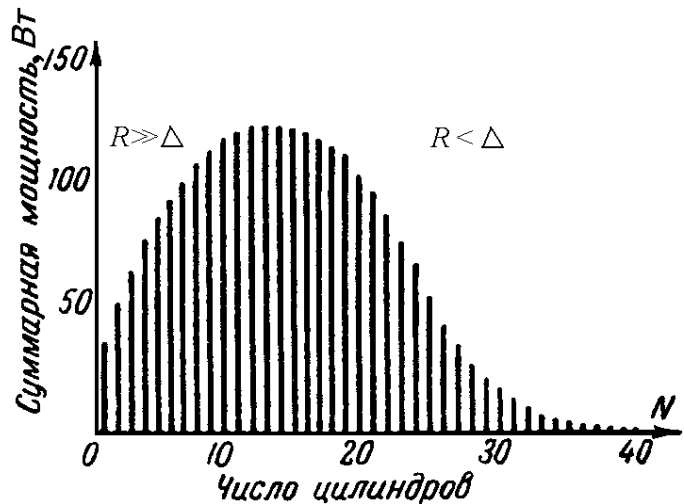


Рис.3 Мощность, выделяемая в совокупности цилиндров

При индукционном нагреве цилиндрическим индуктором напряженность магнитного поля \mathbf{H} направлена вдоль оси нагреваемого цилиндра (при условии осевой симметрии); напряженность полей \mathbf{H} и \mathbf{E} внутри цилиндра зависит от координаты \mathbf{R} . Следовательно, в пучке проволоки внутренние нити будут в более «худших» условиях, чем наружные.

Когда глубина проникновения значительно меньше размеров металлического проводника, пронизываемого переменным магнитным потоком, внутренние участки металла почти совершенно свободны от электромагнитного поля. Током и магнитным потоком нагружены лишь поверхностные слои. Когда глубина проникновения больше размеров проводника, то проводник, внесенный в переменное поле, не нарушает его первоначального распределения. Вихревые токи, пронизывающие теперь всю толщу металла, во много раз менее интенсивны, чем в первом случае, при одной и той же напряженности магнитного поля \mathbf{H} .

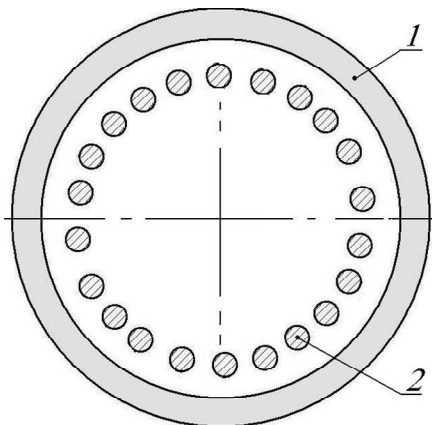


Рис.4. Система индуктор(1) – пучок проволоки(2)

В существующих установках индукционного отжига проволоки расположены симметрично для обеспечения одинаковых условий (рис 4).

Но в то же время вихревые токи в проволоках создают собственные магнитные поля, которые, складываясь со сторонним полем (поле индуктора), образуют результирующее поле. Одновременно вихревые токи, взаимодействуя друг с другом и с исходным полем, создают электродинамические усилия, приводящие, при наличии соответствующих степеней свободы, к перемещению нитей проволок или их вибрации.

Относительно второго и третьего моментов следует отметить, что на производстве в термических установках одновременно подвергаются обработке проволоки различных диаметров с различной степенью обжатия поверхности на волочильных станах. Деформированные поверхностные слои проволоки,

возможно, имеют отличные от сердцевины электромагнитные свойства, т.е. необходимо учитывать возможные колебания магнитной проницаемости. Количество проволок, различных диаметров, одновременно обрабатываемых в проходных термических установках, не является величиной постоянной, а определяется экономическим спросом на данный вид продукции. Следовательно, максимальная мощность, выделяемая в проволоке, будет при других отношениях радиусов единичных цилиндров к глубине проникновения Δ_2 .

В заключение отметим, что имеются определенные особенности индукционного нагрева проволок различного диаметра. В практических расчетах индукционного нагрева используются многочисленные коэффициенты, которые учитывают геометрические параметры и свойства загрузки для более точного описания электромагнитных процессов в системе индуктор – нагреваемый металл. Исследования электромагнитных процессов в системе индуктор – пучок нагреваемой проволоки позволяют выявить новые закономерности и создать математическую модель, с помощью которой можно будет изготовить индукционную установку термической обработки с высокими энергетическими показателями.

Список литературы

1. Кольбе Э., Кувалдин А.Б. Расчет индукторов./ Под ред. Р.К. Джапаровой. – М.: МЭИ, 1982. – 79 с.
2. Слухоцкий А.Е. Индукторы / Под ред. А.П. Шамова – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1989. – 68 с.
3. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
4. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 552 с.
5. Кувалдин А.Б. Низкотемпературный индукционный нагрев стали. –М.: Энергия, 1976. – 112 с.
6. Установки индукционного нагрева: Учеб. пособие для вузов/А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунер; Под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
7. Электротехнологические промышленные установки: Учеб. для вузов/ И. П. Евстюкова, Л. С. Кацевич, Н. М. Некрасова, А. Д. Свенчанский; Под редакцией А. Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.