

Основные принципы подбора источников питания

для индукционного нагрева стержней и проволоки

(печатается в сокращении)

Описание специфических особенностей метода индукционного нагрева и его возможных альтернативных реализаций позволит читателям провести более точный выбор оборудования для нагрева проволоки. В статье приведены примеры и расчеты.

**Д. Дж. Вильямс,
Г. Дж. Траверс
(D. J. Williams,
G. J. Traverse)**

**Перевод
Юрий Болотовский, к. т. н.**

eltech@ufacom.ru

Георгий Таназлы, к. т. н.

g_thanazly@mail.ru

Нагрев проволоки в процессе производства

Многочисленные технологические процессы, применяемые при производстве проволоки, связаны с нагревом. В некоторых случаях он требуется непосредственно в производстве, в других — для обеспечения необходимых характеристик материала. Часто нагрев используется и в том, и в другом случае. Отжиг, например, осуществляется на определенных операциях между уменьшением диаметра проволоки и поддержания ее мягкости, а затем повторно, как завершающая операция, при которой проволока приобретает желаемые механические свойства.

Предварительный нагрев проволоки в случае ее цинкования применяется для улучшения адгезии и предотвращения нежелательного остывания ванны с расплавленным цинком при прохождении через нее проволоки. Некоторые процессы, как, например, GALFAN (нанесение цинко-алюминиевого покрытия), чаще всего выполняются двойным погружением проволоки и требуют двойного нагрева перед каждым погружением. Определенные металлы, такие как титан, предварительно нагреваются перед протяжкой для исключения растрескивания проволоки.

Независимо от снижения угла контакта и скорости подачи, использования мыльных эмульсий и других приемов, облегчающих процесс волочения, уменьшение диаметра холодной проволоки приводит к появлению внутренних напряжений. Внутренние напряжения снимаются или существенно уменьшаются нагревом стали до 500–550 °С. Снять их позволяет также процесс отжига. Температура для отжига зависит от материала и всегда ниже критической. Он может быть дорогостоящим, но должен проводиться для улучшения модуля упругости, предела текучести и снятия напряжений. Модуль упругости и усталостная прочность уменьшаются и во время холодного волочения проволоки.

В таких материалах, как проволока для железобетона, устойчивость к скручиванию также улучшается. Нагрев до температуры отжига при этом приво-

дит к выжиганию остаточных примесей на поверхности, очищая ее и улучшая адгезионные свойства. Увеличение напряжения при растяжении проволоки во время повышения температуры при отжиге обеспечивает улучшение усталостной прочности, упругих свойств и снятие напряжений.

В большинстве случаев отжиг производится в среде инертного газа (чаще всего смесь азота и водорода), что предотвращает окисление поверхности.

Тепловая диффузия — еще один процесс, для которого требуется нагрев. Хорошим примером тепловой диффузии является производство стальной проволоки для каркаса автомобильной шины. После нескольких волочений проволоки и снижения ее диаметра до 0,059 дюйма (1,4986 мм) проволоку нагревают до температуры аустенизации в среде инертного газа, а затем охлаждают в солевой ванне при температуре 1000 °F (540 °C). Покрытие металлом делается при повышенной температуре. Вместо непосредственной металлизации латуни в ванне с цианидом используется раздельное нанесение слоев меди и цинка с последующей тепловой диффузией. Нагрев для диффузии может быть выполнен методом электрического сопротивления, индукционным или электролитическим методом. Непосредственная металлизация латуни может быть затруднена, так как всегда тяжело получить требуемые соотношения меди и цинка. Она также требует применения цианидов, в результате чего появляются опасные отходы, утилизация которых связана с большими затратами. При диффузии проволока получает более плотное покрытие, удается обойтись без цианидов, и процесс легче проводить, используя двухступенчатое покрытие с последующей термодиффузией.

Закалка арматуры для железобетона осуществляется в напряженном состоянии стержней, что обеспечивает уменьшение текучести стали и упрочнение железобетонных конструкций. Она достигается путем нагрева материала выше температуры аустенизации с последующим быстрым охлаждением, после чего материал отпускается. При закалке стали нагрев осуществляется до температуры 950 °C с использо-

ванием в качестве рабочей жидкости предварительно охлажденной воды. Полимерные присадки добавляются в охлаждающую жидкость и служат двум целям: снижению скорости охлаждения и замедлению процессов коррозии.

Варианты нагрева проволоки

Применение электрических печей гораздо дешевле и предпочтительней с точки зрения управления процессом. Как новые, так и уже используемые электрические печи являются очень надежными для процессов, протекающих при температурах меньше 230 °С. Электрические печи ограничено используются для отпуска и, при условии улучшенной изоляции, — для отжига. Они недороги, но требуют больших производственных площадей, и время их разогрева — около часа. Благодаря низкой теплопроводности газа и минимально используемой площади поверхности требуется относительно большое время для нагрева проволоки до необходимой температуры.

Газовые печи являются наиболее эффективными при различных технологических процессах, связанных с нагревом проволоки. Печи, в которых повторно после других технологических процессов используется нагретый газ, являются наиболее экономичными. При использовании электрических печей тепло передается от нагретой спирали конвекционным способом. Теплопередача зависит от площади поверхности нагреваемой проволоки и теплопроводности газа, используемого в печи. Так как поверхность нагреваемой проволоки минимальна и газ имеет низкую теплопроводность, процессы нагрева являются медленными, и, в ряде случаев, функционирование такой системы неэффективно. Печи работают относительно чисто, выбросами являются только водяной пар, углекислый газ и собственно тепло. Они могут занимать значительные производственные площади, но при этом легко управляются и настраиваются. Печам этого типа для разогрева необходимо время около часа.

Источник инфракрасного излучения может быть очень эффективным в диапазоне невысоких температур нагрева, поскольку не требует времени для разогрева. Уровень нагрева зависит от площади поверхности обрабатываемой проволоки. Она может быть мала по отношению к ширине луча каждого инфракрасного источника. Уровень нагрева также определяется коэффициентами излучения и отражения проволоки. Если нагревается проволока с блестящей, хорошо отражающей поверхностью, то инфракрасная энергия не поглощается, а отражается, и эффективность нагрева мала. Зеркала и изолирующие камеры помогают ее увеличить. Нагрев для инфракрасных и ультрафиолетовых типов покрытия может быть скорректирован достаточно эффективно.

Нагрев провода за счет пропуска через него тока приводит к достаточно высокому соотношению «эффективность–затраты» с незначительными расходами на эксплуатацию.

При этом электрический ток, чаще всего промышленной частоты, пропускается непосредственно через проволоку. Количество выделяемого тепла в этом случае пропорционально произведению величины протекающего тока на квадрат сопротивления нагреваемого проводника, что в результате приводит к быстрому (порядка секунд) нагреву проводника, подключенного к питающим зажимам. Поскольку тепло передается не за счет теплопередачи, процесс высокоэффективен, достигается высокая температура нагрева (550 °С), требуется минимальное количество производственных площадей и не расходуется время на предварительный разогрев.

Питающие зажимы, к которым подключается провод с соответствующим напряжением, обеспечивают протекание рабочего тока. Если контакт нарушается, а потом восстанавливается, происходит дугобразование, способное вызвать увеличение плотности тока и, как следствие, — перегрев контактных областей. Когда температура нагрева материала выше критической, может произойти нежелательная закалка проволоки с образованием точечных мартенситовых пятен в контактных областях. При более новом (1988 г., Глен Мур) методе нагрева сопротивлением используется барабан, на котором намотаны проволока или полоса, что увеличивает поверхность токоподвода. Барабан подключается к генератору постоянного тока, электрическая энергия питает проволоку, а барабан преобразует ее в тепло. Вращаясь с переменной скоростью, он регулирует температуру.

Расплавленный свинец и солевые ванны обычно прогреваются с применением газа и эффективны из-за хорошей теплопередачи, которая связана с непосредственным контактом проволоки со свинцом, солью или песчаной средой. Проволока пропускается непосредственно через теплообменную среду, при этом обеспечивается постоянство температуры нагрева. Использование свинца, в силу его вредности, делает данную технологию достаточно дорогой. Нагревательные ванны, хотя и просты в обслуживании, но могут представлять опасность для обслуживающего персонала и операторов. Время прогрева (так же как и время остывания) для этих установок составляет около часа.

Индукционный нагрев является методом неконтактного воздействия, когда проволока или стержень проходят через электромагнитное поле, создаваемое специальной медной катушкой — индуктором. Через катушку пропускается переменный ток повышенной частоты и осуществляется подвод необходимой мощности для получения требуемого нагрева. Большая часть тепла обеспечивается наведением в проволоке вихревых токов; некоторая доля выделяется за счет явления гистерезиса. Метод индукционного нагрева не требует разогрева, эффективен по скорости нагрева, обеспечивает хорошо повторяемые результаты, не загрязняет производственные помещения и напоминает метод резистивного нагрева, легко встраивается в производственную линию, позволяет исключить накопление обрабатываемого материала между техноло-

гическими операциями. Хотя затраты на индукционный метод выше, чем на резистивный, он может использоваться в защитной атмосфере для исключения или уменьшения повреждения нагреваемой поверхности за счет отслаивания чешуек.

Обзор достоинств и недостатков методов нагрева

В таблице 1 приводится информация о целесообразности применения возможных методов нагрева для различных технологических процессов и дается оценка их достоинств и недостатков.

Время прогрева — интервал прогрева технологической установки до ее готовности к работе. Оценка «плохо» означает большое время прогрева. Оценка «отлично» — время для прогрева не требуется (установка готова к работе сразу после включения).

Эффективность нагрева — готовность подачи тепла непосредственно в нагреваемое тело. Оценка «плохо» означает высокую длительность цикла нагрева. Оценка «отлично» — быстрый нагрев.

Глубина прогрева — способность передавать тепло от поверхности к сердцевине нагреваемого тела. Оценка «плохо» означает невозможность прогрева сердцевины. Оценка «отлично» — быстрый сквозной прогрев.

Термин «чистота» — эффект влияния оборудования и технологического процесса на рабочую среду. Оценка «плохо» означает опасную рабочую среду. Оценка «отлично» — высокую чистоту в производственном помещении.

Термин «синхронизация» — способность системы автономно функционировать в поточной линии как замкнутая ячейка. Оценка «плохо» означает низкую адаптацию к работе в производственной линии. Оценка «отлично» — беспроблемное решение этой задачи.

Контактность метода: оценка «плохо» означает необходимость контакта нагревателя с нагреваемым телом. Оценка «отлично» — возможность отсутствия контакта.

КПД — эффективность использования энергии, необходимой для нагревания проволоки или стержня. Оценка «плохо» означает низкий КПД. Оценка «отлично» — высокий КПД.

Потребность в производственных площадях — оценка производственных площадей для реализации технологического процесса. «Плохо» подразумевает наличие громоздких установок. «Отлично» относится к компактным системам, минимизирующим потребность в производственных площадях.

Стоимость оборудования — капитальные вложения, необходимые для приобретения и ввода в строй оборудования. Оценка «плохо» означает большие вложения, оценка «отлично» — малые.

Стоимость функционирования — стоимость энергии и обслуживания. Оценка «плохо» означает неэффективную систему, требующую сложного обслуживания. Оценка «отлично» — эффективная система с простым обслуживанием.

Таблица 1. Достоинства и недостатки возможных методов нагрева для различных технологических процессов

Виды нагрева	Время прогрева	Эффективность нагрева	Глубина прогрева	Чистота	Синхронизация	Контактность метода	КПД	Потребность в производственных площадях	Стоимость оборудования	Стоимость функционирования	Качество	Гибкость	Настройка
Электрическая печь	●	■	◆	◇	◆	◆	◆	■	◇	◆	*	*	◇
Резистивный нагрев	*	*	*	*	*	●	*	*	*	*	■	◆	◇
Газовая печь	●	■	◆	◇	◆	◆	◆	■	◇	◆	*	*	◇
Индукционный нагрев	*	*	*	*	*	*	◆	*	■	■	*	◆	◇
Инфракрасный нагрев	◆	■	◆	*	◆	◆	■	■	*	◆	*	*	*
Расплавленный свинец/солевая ванна	●	◇	◆	●	*	●	◆	◆	◆	◆	◆	*	●

*● – плохо; ■ – средне; ◆ – хорошо; ◇ – очень хорошо; * – отлично.

Таблица 2. Удельные электрические сопротивления (микроом/дюйм)

Материал	Температура в °F (°C)						
	68 (20)	200 (93)	600 (316)	1000 (538)	1400 (760)	1800 (982)	2200 (1204)
Медь	0,68	0,82	1,5	2,2	3	3,7	
Низкоуглеродистая сталь	5	6,5	15,3	24	40	46	48
Высокоуглеродистая сталь	7,4	9	18,5	28	43	48	50

Таблица 3. Относительная глубина проникновения (дюймы/мм) $[d = 3160\sqrt{(\rho/f)}$

Частота	Сталь при 1800 °F (982 °C)	Сталь при 1400 °F (760 °C)	Сталь при 1000 °F (538 °C)
450 000	0,0326 / 0,828	0,0307 / 0,780	0,0029 / 0,074
100 000	0,0692 / 1,758	0,0651 / 1,6535	0,0061 / 0,155
30 000	0,1264 / 3,211	0,1189 / 3,020	0,0110 / 0,279
10 000	0,2189 / 5,560	0,2060 / 5,2324	0,0191 / 0,485
3000	0,3997 / 10,152	0,3761 / 9,5529	0,0349 / 0,886
Частота	Нержавеющая сталь (марка 400) при 1000 °F (538 °C)	Алюминий при 600 °F (316 °C)	Медь при 1800 °F (982 °C)
450 000	0,0298 / 0,757	0,0077 / 0,196	0,0091 / 0,231
100 000	0,0632 / 1,605	0,0164 / 0,417	0,0192 / 0,488
30 000	0,1154 / 2,931	0,0300 / 0,762	0,0351 / 0,892
10 000	0,1999 / 5,077	0,0519 / 1,318	0,0608 / 1,544

Качество — способность стабильно производить продукцию приемлемого качества. Оценка «плохо» означает значительное количество отклонений от эталонного качества при эксплуатации. Оценка «отлично» — стабильное поддержание эталонных характеристик.

Гибкость — способность адаптировать оборудование к различным технологическим процессам. Оценка «плохо» означает, что система является сугубо специализированной и способна функционировать в узком диапазоне размеров, веса или других характеристик производимой продукции. Оценка «отлично» означает, что система способна работать в широком диапазоне этих параметров и легко перестраивается при их изменении.

Настройка — оценка легкости или сложности настройки оборудования. «Плохо» — трудная настройка системы, «отлично» — легкая настройка системы.

Основы индукционного нагрева проволоки и стержней

Приведем некоторые определения и положения, необходимые при рассмотрении систем индукционного нагрева.

Относительная глубина проникновения электрического тока в проводящий материал определяется удельным сопротивлением, магнитной проницаемостью материала нагреваемой

проволоки и частотой тока, протекающего через индуктор.

Формула, определяющая относительную глубину проникновения:

$$d = 5000\sqrt{(\rho/\mu f)}$$

(для метрической системы)

или

$$d = 3160\sqrt{(\rho/\mu f)}$$

(для британской системы),

где ρ — удельное электрическое сопротивление, микроом/сантиметр (для метрической системы), микроом/дюйм (для британской системы); μ — относительная магнитная проницаемость, $\mu = 1$ для температур выше критических и немагнитных металлов; f — частота, Гц.

Глубина проникновения изменяется с частотой. Например, если рассматривается нагрев стальной проволоки до температуры 1800 °F

(982 °C), то для начала определяется удельное сопротивление стали, равное приблизительно 48 микроом/дюйм (табл. 2). Поскольку эта температура выше точки Кюри, магнитная проницаемость равна 1. Следовательно, относительная глубина проникновения будет следующей (табл. 3).

Глубина проникновения определяет эффективность системы и технологического процесса. Определяется верхняя граница частоты, которая дает минимально допустимую зону нагрева, и частота, ниже которой нагрев проволоки затруднен. Медленный нагрев определяет большую длину индуктора, что требует большего времени нагрева, для того чтобы обеспечить передачу тепла от поверхности проволоки к сердцевине. Если частота слишком низка для эффективного нагрева проволоки, он требует больше энергии, что вызывает увеличение стоимости установки. Рекомендованное отношение диаметра проволоки к глубине проникновения для эффективного индукционного нагрева должно быть 3:1.

Заметим, что глубина закаленного слоя увеличивается с ростом электрического сопротивления и падает с ростом частоты и проницаемости (рисунком).

Проводимость является способностью материала проводить электрический ток. Она зависит от числа свободных электронов. Материалы, имеющие много свободных электронов, называются проводниками, а материалы, имеющие мало свободных электронов, — изоляторами. Удельная электропроводность — величина, обратная удельному электрическому сопротивлению, и выражается в сименсах (См).

Температура Кюри — это температура, при которой ферромагнитные материалы теряют магнитные свойства.

Энергия (табл. 4) определяется способностью тела совершить некоторую работу (мощность за период времени — энергия) и выражается в следующих единицах:



Таблица 4. Перевод единиц энергии из одной системы в другую

Единицы	Значения					
	Btu	Cal	HPH	J	kCal	kWh
Btu	1	251,996	0,00393015	1055,056	0,251996	0,00293071
Cal	0,0396832	1	0,00015569	4,1868	0,001	0,0001163
HPH	2544,43	641 186	1	26 845 200	641,186	0,7457
J	0,00947817	0,238846	3,72506E-06	1	0,000238846	2,77778E-07
kCal	3,96832	1000	0,015569	4186,8	1	0,01163
kWh	3412,14	859 845	1,34102	36 000 000	859,845	1

- британская тепловая единица (Btu) — количество теплоты, необходимое для нагрева 1 фунта воды на 1° Фаренгейта;
- калория (Cal) — количество теплоты, необходимое для нагрева 1 грамма воды на 1° Цельсия;
- лошадиная сила в час (HPH) — количество энергии, полученное при реализации мощности в 1 лошадиную силу в течение 1 часа;
- джоуль (J) — количество энергии, необходимое для перемещения тела на 1 метр с приложением силы в 1 Ньютон;
- килокалория (KCal) — 1 тысяча калорий;
- киловатт-час (kWh) — количество энергии, полученное при реализации мощности в 1 киловатт в течение 1 часа.

Частота определяется как количество переходов переменного тока от положительной полуволны к отрицательной (или наоборот) в секунду. Единицей измерения может быть цикл в секунду (cps), но обычно применяется герц (Гц). Для процессов индукционного нагрева частота измеряется тысячами герц или килогерцами (кГц).

Оборудование подразделяется на радиочастотное (RF), звуковой частоты (AF) и сетевой частоты (50 или 60 Гц). К радиочастотам относятся частоты от 20 кГц и выше. Звуковые включают частоты до 20 кГц. В последнее время общепринятым стало понятие средних частот — от 1 до 50 кГц.

Ниже перечислены 3 вида источников питания для индукционного нагрева, применяемые в настоящее время в промышленности:

1. Старейшим является ламповый генератор со штатной рабочей частотой в 100 кГц; большой опыт эксплуатации за счет простоты применения; схема построена по классической схеме электрического генератора, имеется возможность использования индукторов упрощенной конструкции.
2. Новейшим является полупроводниковый инвертор (в некоторых случаях может эксплуатироваться на частотах до 850 кГц), который построен с применением таких полупроводниковых устройств, как тиристоры, IGBT (MOSFET)-транзисторы. Полупроводниковый инвертор обеспечивает КПД от 85 до 95%, в то время как КПД лампового генератора достигает только 50%.
3. Третий тип — машинные генераторы. Большинство из них может быть заменено на полупроводниковые инверторы.

Существует два основных типа индукционного нагрева, которые определяются рабочими частотами и мощностями: поверхностный нагрев, который требует мощностей с большой плотностью, и сквозной нагрев. Последний очень часто используется при нагреве про-

волоки и стержней. Основной проблемой при этом является выбор самой низкой частоты, при которой нагрев будет эффективным.

Индукционные методы более эффективны, чем системы резистивного нагрева. Например, для нагрева стального стержня диаметром 0,625 дюйма (15,875 мм) до однородной температуры 1400 °F (760 °C) выбирается частота 10 кГц. Относительная глубина проникновения на этой частоте составляет 0,206 дюйма (5,2324 мм), что соответствует выше сформулированному правилу «3:1». На 3 кГц относительная глубина проникновения будет 0,3761 дюйма (9,5529 мм), что не удовлетворяет правилу «3:1» и приводит к затруднению нагрева стержня. Из табл. 3 видно, что любая частота выше 10 кГц соответствует этому правилу, но необходимо дополнительное время для передачи тепла к сердцевине проволоки.

Магнитная индукция — наведение тока в электропроводящем материале с использованием переменного магнитного поля. Результатом этого является нагрев электропроводящего материала.

Магнитная проницаемость относительно магнитных силовых линий напоминает явление электропроводности материала при протекании электрического тока. Чем выше проницаемость, тем ниже сопротивление между двумя силовыми линиями. Малое сопротивление между силовыми линиями (и, следовательно, магнитный поток) приводит к их вытеснению на поверхность. Проницаемость определяется как:

$$\mu = V/H \text{ (Вебер/ампер-метр),}$$

где μ — относительная магнитная проницаемость; V — плотность потока, Вебер/м²; H — напряженность поля, А × м.

Магнитная проницаемость вакуума равна:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Вебер.}$$

Другой способ объяснения этого явления состоит в следующем: магнитная проницаемость — отношение количества силовых линий в рассматриваемом материале к количеству силовых линий в воздухе. Пять элементов имеют магнитную проницаемость более 1. Три наиболее распространенные из этих пяти элементов — металлы кобальт (Co), железо (Fe) и никель (Ni). Обычно магнитная проницаемость уменьшается с ростом температуры и становится равной 1 при достижении точки Кюри.

Мощность источника питания для индукционного нагрева измеряется в киловаттах и обеспечивает нагрев заданной массы до определенной температуры за заданный интервал

времени. Выходная мощность при статической нагрузке определяется следующим образом:

Выходная мощность = [производительность] × [теплоемкость материала],

где выходная мощность — киловатт; производительность — фунт/час; теплоемкость — киловатт-час/фунт.

Например, для нагрева 13,608 фунтов (16,7 кг) стали за 1 час до температуры 1350 °F (732,2 °C), с учетом того, что теплоемкость стали в этом случае будет приблизительно 0,063 кВт*ч/фунт (0,14 кВт × ч/кг), требуется источник с выходной мощностью около 857 кВт. Потребляемая мощность в этом случае определяется как:

Потребляемая мощность = выходная мощность/КПД.

Например, если КПД = 68%, то требуется потребляемая мощность 1260 кВт.

Сопротивление — способность препятствовать протеканию электрического тока в проводящем материале, определяемая, среди других параметров, температурой. В таблице 2 приведены приблизительные удельные сопротивления некоторых материалов для ряда фиксированных температур. Единица измерения — Ом.

Преимущества индукционного нагрева при термообработке проволоки и стержней

Индукционный нагрев — высокоэффективный способ термообработки (нагрев до 1750 °F (950 °C) за несколько секунд), при котором нагревается непосредственно материал (проволока и т. п.), и, поскольку отсутствует теплопередача (конвекция), как при нагреве в печи, на нагрев окружающего воздуха тратится гораздо меньше тепла. Этот метод практически не требует времени на предварительный прогрев.

Индукционный нагрев является неконтактным. При прохождении через индуктор проволока подвергается воздействию электромагнитного поля. Это приводит к появлению в ней вихревых токов, которые, нагревая проволоку, способствуют выделению в ней тепла.

Индукционный нагрев предоставляет преимущества при непосредственном встраивании в производственную линию. Индуктор может быть установлен в этой линии в различных местах, если это необходимо. При этом обеспечивается непрерывность технологического процесса. Например, после протяжки нагартованная медная проволока может быть нагрета без сворачивания в бухту и последующего нагрева в печи.

Будучи неконтактным и электрически управляемым, индукционный нагрев является чистой технологической операцией и обеспечивает минимальное загрязнение окружающей среды. При нем не требуется ванн с расплавленным свинцом или солью, которые являются источниками опасности и коррозии. Не выделяются газы, он не связан с пламенем, излучением и не требует вытяжных систем.

Оборудование для индукционного нагрева очень надежно и требует минимальных настроек. Осуществляется разовая настройка индуктора в начале эксплуатации, которая легко может быть изменена. Необходимость в до-

рогой и затратной по времени повторной изоляции исключается.

Для предотвращения окисления при нагреве проволоки или стержня индукционный нагрев можно использовать в комбинации с защитной инертной средой из азотно-водородной смеси.

Определение типа и параметров источника питания

Современные полупроводниковые источники питания обеспечивают точное и повторяемое управление выделением энергии и нагревом.

Первым параметром, подлежащим определению при выборе нового источника питания, является оптимальная рабочая частота. Эффективность всего комплекса, его производительность, качество получаемой проволоки и стоимость оборудования зависят, в первую очередь, именно от частоты.

Глубина нагрева проволоки от поверхности непосредственно связана с частотой и вычисляется по следующим формулам:

$$d = 5000\sqrt{(\rho/\mu f)}$$

(для метрической системы)

или

$$d = 3160\sqrt{(\rho/\mu f)}$$

(для британской системы),

где ρ — удельное электрическое сопротивление, микроом/сантиметр (для метрической системы), микроом/дюйм (для британской системы); μ — относительная магнитная проницаемость; f — частота, Гц.

Глубина проникновения является важнейшим параметром, определяющим эффективность нагрева. Если использовать достаточно высокую частоту, это приводит к уменьшению зоны нагрева. При отжиге потребуется увеличение длины индуктора и времени нагрева, так как при этом передача тепла от поверхности к внутренним слоям проволоки затруднена. С другой стороны, занижение частоты может привести к той же проблеме и неэффективности всей системы термообработки.

Желаемая глубина проникновения в проволоку — не меньше 1/5 и не больше 1/2 от диаметра проволоки. Таким образом, оптимальное отношение диаметра проволоки к глубине проникновения лежит в диапазоне [2...5] к 1. Наиболее предпочтительным является отношение 3:1. Хотя существуют исключения, которые прежде всего касаются нагрева тонкой проволоки, в подавляющем большинстве случаев сформулированное правило справедливо.

Как следует из приведенных формул, глубина проникновения является не только функцией частоты, но и существенным образом зависит от таких параметров, как удельное сопротивление материала проволоки и магнитная проницаемость. Важным является то, что отношение магнитных проницаемостей различных материалов может колебаться более чем в 1000 раз.

Таблица 3 иллюстрирует влияние частоты и температуры на глубину проникновения. На-

пример, при нагреве стали на частоте 450 кГц до 1800 °F (982 °C) достигается более глубокое проникновение поля и тепла в нагреваемый материал, чем при температуре 1000 °F (537,78 °C). Это объясняется тем, что магнитная проницаемость материала уменьшается при увеличении температуры и тем самым вызывает большую глубину проникновения. Уменьшение проницаемости происходит и при усилении электрического сопротивления в результате нагрева материала, что также влечет за собой увеличение глубины проникновения.

После определения оптимальной частоты выбираются еще несколько важных параметров источника питания, связанных с большим количеством факторов. Среди последних большинство являются независимыми, но есть и взаимовлияющие элементы. К факторам, определяющим параметры источника питания, относятся: КПД индуктора, магнитная проницаемость, удельное сопротивление, диаметр, масса проволоки, которую необходимо нагреть за час работы, и температура нагрева.

Диапазон КПД индуктора — от 3 до 97%. Обычно он составляет от 60 до 80%, но имеет тенденцию к понижению, как только температура нагреваемого тела достигает точки Кюри. Поскольку стальная проволока нагрета, ее проницаемость падает с 95 до проницаемости вакуума. На критических температурах около 1400 °F (760 °C) проницаемость падает до 1, и материал называют парамагнитным. На КПД оказывает также влияние коэффициент связи индуктора или расстояние между поверхностью проволоки и внутренним диаметром индуктора и коэффициент заполнения или отношение поперечного сечения проволоки к поперечному сечению индуктора. Проволоку с диаметром менее 15 мм часто располагают на плоском параллельном листе с целью повышения КПД и производительности.

Магнитная проницаемость и сопротивление являются зависимыми переменными, так как они существенным образом связаны с температурой. Чем больше значение этих параметров, тем легче реализовать процесс индукционного нагрева проволоки. Величина магнитной проницаемости материала напрямую определяется плотностью магнитного потока: чем выше первое, тем выше второе, так как силовые линии будут плотнее на поверхнос-

ти. Если температура материала проволоки достигает точки Кюри, магнитная проницаемость падает, что приводит к уменьшению плотности магнитных линий на поверхности и ее увеличению внутри проволоки.

Магнитные материалы, такие как сталь, имеют высокое значение магнитной проницаемости, что обеспечивает их быстрый эффективный нагрев. Немагнитные — медь, алюминий и некоторые марки нержавеющей стали — относятся к материалам с низкой магнитной проницаемостью (чаще всего она равна 1) и требуют большей мощности источника питания. Эффект нагрева меньше, когда магнитная проницаемость низка и магнитные линии в большей степени распределены в нагреваемом теле.

Глубина проникновения в стали с магнитной проницаемостью 95 на частоте 10 кГц в среднем составляет 0,0072 дюйма (0,1829 мм), в то время как на той же частоте для меди с магнитной проницаемостью 1 эта величина будет составлять 0,026 (0,6604 мм) дюйма, так как медь имеет более низкое сопротивление.

Определение мощности источника питания — это второй шаг, который необходимо выполнить в случае новой разработки. Требуется следующая информация:

- материал и требуемая температура нагрева;
- производительность (фут/минуту или фунт/час);
- диаметр проволоки или стержня и возможный диапазон его изменения;
- ожидаемый ежегодный выпуск каждого вида проволоки, подлежащей нагреву на проектируемой установке;
- количество одновременно нагреваемых нитей проволоки;
- производственные площади для размещения технологической линии (если необходимо).

В таблице 5 приведены результаты одновременного нагрева 36 нитей стальной проволоки до температуры 1350 °F (732 °C). Диапазон диаметров — от 8 до 22-го калибра. Первая часть таблицы показывает результаты использования источника мощностью 2000 кВт, с частотой 30 кГц на 80% выходной мощности на скорости протяжки проволоки в линии (установка для отжига). Вторая часть таблицы демонстрирует эффект уменьшения скорости линии до 600 футов/мин и его влияние на мощность.

Таблица 5. Результаты одновременного нагрева 36 стальных нитей до 1350 °F (732 °C)

Калибр	Диаметр, дюйм	Фунт / фут	Фут / мин	Фунт / ч	КПД, %	Исп. мощность	Стоим., \$ (\$0,08 кВт / час)	BTU/ч
8	0,162	0,0702	126	19 097	74	1600	128	5 462 400
9	0,1483	0,0589	148	18 839	73	1600	128	5 462 400
11	0,1205	0,0389	215	18 065	70	1600	128	5 462 400
14	0,08	0,0171	475	17 548	68	1600	128	5 462 400
15	0,072	0,0139	585	17 548	68	1600	128	5 462 400
16	0,0625	0,0105	774	17 548	68	1600	128	5 462 400
19	0,041	0,0045	1195	11 613	45	1600	128	5 462 400
22	0,0286	0,0022	2064	9807	38	1600	128	5 462 400
16	0,0625	0,0105	600	13 608	68	1241	99,28	4 236 774
19	0,041	0,0045	600	5832	45	804	64,32	2 744 856
22	0,0286	0,0022	600	2851	38	465	37,2	1 587 510

Таблица 6. Результаты индукционного нагрева одной нити проволоки из нержавеющей стали марки 400 после ее протяжки до температуры 1562 °F (850 °C)

Внешний диаметр	Фунт / фут	Фут / мин	Фунт / ч	КПД, %	Использ. мощность	Стоим., \$ (\$0,08 кВт/ час)	ВТУ/ч
0,0984	0,0259	98	153	59	21	1,66	70 786
0,1772	0,084	49	248	64	31	2,48	105 820

В сложившейся практике, там, где это возможно, используется 80% номинальной выходной мощности источника питания. Из таблицы 5 видно, что при КПД 68% проволока 16-го калибра может быть нагрета до 1350 °F (732 °C) с производительностью 17,548 фунтов/ч. Удельная масса проволоки 0,0105 фунтов/фут и использование параллельной протяжки 36 ниток проволоки позволяют получить линейную скорость 774 фута/мин.

Если максимальная линейная скорость протяжки, которую позволяет достичь оборудование — 600 футов/мин, то это соответствует производительности 13,608 фунтов/ч. При КПД 68% потребляемая мощность источника 1241 кВт.

Попробуем свести стоимость оборудования к минимуму. Оптимальная частота для этого процесса — 30 кГц. Заметим, что КПД падает с уменьшением диаметра проволоки. Однако поскольку проволока большого диаметра составляет, как правило, большую часть производства, то за счет более низких цен на ее нагрев удастся компенсировать денежные потери при нагреве проволоки малого диаметра.

В таблице 6 приведены результаты индукционного нагрева одной нити проволоки из нержавеющей стали марки 400 после ее протяжки до температуры 1562 °F (850 °C) и использования для этой технологической операции системы нагрева 50 кВт – 30 кГц.

Проконсультируйтесь с производителем индукционного оборудования при выборе параметров требуемой вам установки для получения наилучших результатов.

Литература

1. Cook Ray. Basics of Induction Heating.
2. Robson John K. Managing Director. Inductoheat PTY Ltd. 6th Annual Inductoheat World Induction Conference. March 1995.
3. Samples Jr., Robert H. Induction Heaters and Wire Heating: Let the Smoke Out. September 1995.
4. Tudbury Chester A. Basics of Induction Heating. John F. Rider Publisher, Inc., 1960.
5. Van Vlack, Lawrence H. Materials For Engineering.
6. Williams Daniel J. Methodology for Designing Better Machines for the Industrial Heating Industry. March 1994.
7. Sayenga Donald. Oliver Evans, The Man Who Wrote the First American Treatise on Wire Drawing. September 1991.