

Черные металлы



Совместное издание · № 4 (1048), 2019

stahl
und
eisen

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения



Черные металлы

Издательский
дом
«Руда
и Металлы»



Немецкое издание: № 11, ноябрь 2018
Русское издание: апрель 2019

stahl
und
eisen

Издается с 1961 г.
(№ 1048)

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения

Учредители:

АО «Издательский дом
«Руда и Металлы»

ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСиС»

ФГБОУ ВО «Магнитогорский
государственный технический
университет им. Г. И. Носова»

При участии:

ПАО «ММК»
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»
Государственного Эрмитажа

Официальный информационный орган
Федерального УМО
«Технологии материалов»

Редакционный совет:

Председатель редакционного совета: О. Н. Сосковец
Главный редактор: В. М. Колокольцев
Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев
Зам. главного редактора: А. Г. Воробьев, Е. В. Цирульников
А. М. Беленький, В. Блек (Германия), О. И. Борискин,
Р. М. Валеев, Е. П. Волюнкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин,
Я. М. Гордон (Канада), В. Я. Дашевский, Д. Г. Еланский,
Н. А. Зюбан, В. П. Иващенко, И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина,
А. А. Казаков, А. П. Коликов, А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарев,
И. О. Леушин, И. П. Мазур, Ю. Ю. Пиотровский, А. Н. Савенок,
А. Я. Стомахин, И. А. Султангузин, С. С. Ткаченко, А. Я. Травянов,
Н. А. Чиченев, М. В. Чукин, П. Шеллер (Германия),
А. А. Юсупходжаев

Редакция:

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников
Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова
Набор: Л. М. Чичерина
Перевод: А. Л. Алексашин, И. В. Леушина, Ю. А. Платонов,
В. А. Цирульников, К. В. Чапковская, Т. Е. Щербакова
Ответственный за предпечатную
подготовку издания: Д. И. Воробьева

Russische Ausgabe der Zeitschrift «Stahl und Eisen». Zeitschrift für Technik und Wissenschaft der Herstellung und Verarbeitung von Eisen und Stahl. Herausgegeben von Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Hans Jürgen Kerkhoff Präsident Wirtschaftsvereinigung Stahl, Vorsitzender Stahlinstitut VDEh. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Carl-Dieter Wuppermann Geschäftsführendes Vorstandsmitglied Stahlinstitut VDEh. © 2019 Maenken Kommunikation GmbH. Von-der-Wettern-Strasse 25, 51149, Köln, Germany.

Русский перевод журнала «Шталь унд Айзен» по проблемам черной металлургии (производство и обработка черных металлов), издаваемого Обществом немецких металлургов. Х. Ю. Керкхофф, президент Экономического объединения «Сталь», председатель Института стали Общества немецких металлургов. Докт.-инж., дипл. инж.-экон. К.-Д. Вупперман, руковод. член правления Института стали Общества немецких металлургов. © 2019 Maenken Kommunikation GmbH. Von-der-Wettern-Strasse 25, 51149, Кёльн, Германия.

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 622

Адрес редакции:

• фактический: 119049, Москва, Ленинский проспект 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 619
• почтовый: 119049, Москва, а/я № 71
Телефон/факс: (495) 955-01-75
Эл. почта: chermet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru
www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 4 (1048) апрель 2019 г.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Свидетельство ПИ № ФС77-48681 от 28.02.2012 г.)

Товарный знак и название «Черные металлы» являются исключительной
собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»

Отпечатано с предоставленных готовых файлов
в типографии «Канцлер»
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16. стр. 66А.
Тел. (4852) 58-76-33.

Выход из печати 29.04.2019. Формат 60×90/8.
Печ. л. 10,5. Офсетная печать. Бумага офсетная.
Тираж 1000 экз. Цена свободная

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель
За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор
Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции
При перепечатке ссылка на «Черные металлы» обязательна
«Реклама» — материал публикуется на правах рекламы
Публикуемые материалы не обязательно отражают точку зрения редакции
и редсовета журнала

Подписные индексы:
92650 («Роспечать»)
12985 («Пресса России»)

ISSN 0132-0890



9 770132 089006 >

СОДЕРЖАНИЕ

Подготовка сырьевых материалов

- А. А. Франгулян, М. Э. Сасунцян, В. А. Мартиросян. О характере распределения минералов железа в сульфидных медных и полиметаллических рудах 6

Непрерывная разливка и литейное производство

- Б. Шаап, П. Костер, С. Брокхус, Х. Пронк. Автоматизированное управление процессом разливки стали на предприятии компании Tata Steel в Эймёйдене 10
- М. Ю. Чубуков, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, М. В. Кириличев. Влияние химического состава стали на особенности строения непрерывнолитой заготовки диаметром 410 мм 15
- Л. И. Леушина, И. О. Леушин, М. А. Ларин, С. В. Плохов. Применение технологических добавок карбонатов и гидрокарбонатов аммония в ресурсосберегающей технологии точного стального литья 22

Производство труб

- В. А. Топоров, А. А. Богатов, Д. Ш. Нухов, О. А. Панасенко. Определение геометрических соотношений очага деформации при винтовой прошивке заготовок 27
- И. Н. Бажуков, Ан. В. Серебряков, Ал. В. Серебряков, С. И. Паршаков. Сравнительный анализ методов бесконтактного измерения диаметра прецизионных особотонкостенных труб 32
- М. В. Кадач, А. Н. Кошмин, Ю. В. Гамин, Б. А. Романцев. Получение стальных трубчатых изделий переменного сечения по длине 37

Прокатка и другие процессы ОМД

- Х. Менгель, У. Крамер, Т. Хольцхауэр, А. Кастнер, А. Мюллер, В. Фукс. Технические решения для надежного манипулирования рулонами полосы из высокопрочной стали 42
- Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартянов, А. В. Веденеев. Влияние натяжения металлокорда при намотке на его прямолинейность 46

Нагрев и термообработка

- В. Н. Мещеряков, О. В. Федоров, С. С. Титов, Д. В. Безденежных. Расчет и разработка экспериментальной индукционной установки для симметричной закалки мелющих металлических шаров 51
- П. Зеeman, М. Бреннинггер. Установки термической обработки новых сталей повышенной прочности для автомобилестроения 58

Нанесение покрытий и коррозия поверхностей

- Л. С. Белевский, Е. В. Губарев, Ю. Ю. Ефимова. Модификация поверхности пластическим деформированием с нанесением покрытий 61
- И. Е. Илларионов, Ш. В. Садетдинов. Коррозия черных металлов в средах, имитирующих условия эксплуатации автомобилей 67

Аддитивные технологии

- Д. В. Масайло, А. А. Попович, А. В. Орлов, Е. Л. Гюлиханов. Исследование структуры и механических характеристик образцов, полученных газопорошковой лазерной наплавкой и селективным лазерным плавлением из сфероидизирующего порошка на основе железа 73

- Новости металлургии по странам и регионам 78

Журнал «Черные металлы» по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по металлургии

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ 0,165 (2017)

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Chemical Abstracts Service

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Scopus, IV квартиль (2017)

Журнал «Черные металлы» входит в состав базы Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science

РАСЧЕТ И РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ СИММЕТРИЧНОЙ ЗАКАЛКИ МЕЛЮЩИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ШАРОВ

В. Н. МЕЩЕРЯКОВ, О. В. ФЕДОРОВ, С. С. ТИТОВ, Д. В. БЕЗДЕНЕЖНЫХ*

Создание энергоэффективного оборудования непрерывного действия, обеспечивающего симметричный на заданную глубину нагрев под термообработку изделий шарообразной формы без окисления и обезуглероживания, является актуальным для ряда отраслей промышленности, в частности в массовых производствах мелющих тел для горно-обогатительных фабрик (черные и цветные металлы) и цементных заводов, шариков подшипников качения и клапанов в гидравлических системах, в том числе высокоизносостойких шариков в обратных клапанах глубинных насосов для нефтедобычи и др. В наибольшей мере этой востребованной промышленностью совокупности качеств нагрева отвечает индукционный способ с прямым и высокоскоростным (секунды — доли секунды) превращением электрической энергии в тепловую. Данный способ отличается простотой регулирования температуры и глубины прогрева, что позволяет получать после закалки и отпуска оптимальное сочетание высокой поверхностной твердости изделий (контактная выносливость) с относительно пластичной сердцевиной (противораскалываемость). Применимость его в отношении обеспечения требуемой симметричности нагрева в настоящее время ограничена в мировой практике преимущественно изделиями непрерывного сечения или близкого к нему. Следовательно, актуальной задачей является расчет и разработка экспериментальной установки для симметричной индукционной закалки металлических шаров с последующим проведением исследований по определению оптимальной частоты и величины тока индуктора, а также времени нагрева шара. Рассчитана и разработана одна секция индуктора, выбрана оптимальная частота и величина тока индуктора, оценено время нагрева шара. Полученные результаты позволяют разработать концепцию для построения установки с пространственно-спиральным желобом и индуктором, состоящим из множества секций.

Ключевые слова: индуктор, индукционный нагрев, индукционная закалка, резонансный инвертор, заготовка, подшипник качения, мелющие шары.

Введение

Широкое распространение в последние десятилетия поперечно-винтовых шаропрокатных станов (ШПС) практически полностью вытеснило производство литых и штампованных мелющих шаров с газопламенным нагревом под закалку и предопределило применение в том или ином виде индукционного нагрева под термообработку [1]. Достоинства индукционной закалки обусловлены прямым и высокоскоростным (секунды/доли секунд при поверхностном нагреве токами высокой частоты) превращением электрической энергии в тепловую. Способ отличается простотой регулирования температуры и глубины прогрева; поверхность нагреваемого металлического шара практически

не окисляется и не обезуглероживается. При этом после закалки возможно достижение требуемого сочетания высокой поверхностной твердости с вязкопластичной сердцевиной. Следует отметить, что при всех известных достоинствах этого способа применимость его в отношении обеспечения требуемой симметричности нагрева в настоящее время ограничена изделиями непрерывного сечения или близкого к таковому. В связи с этим актуальной является разработка установки индукционного нагрева, обеспечивающей симметричную закалку металлических шаров по всему сечению на заданную глубину.

Постановка задачи

В работах [2–4] описана конфигурация направляющего профиля (рис. 1), который изогнут в пространственную спираль с вертикальной осью симметрии и имеет секции индукторов, распределенных по его длине. Кинематика движения шара по такому спиральному профилю через секции индуктора (свободное скатывание) характеризуется двухмерным или (при переменной кривизне витков спирали или траектории движения центра массы шара) трехмерным побуждением к изменению направления его оси собственного вращения, что предопределяет возможность создания установки индукционного нагрева непрерывного действия, обеспечивающей равномерное по плотности взаимодействие

*ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Липецк, Россия;

докт. техн. наук В. Н. Мещеряков, профессор, зав. кафедрой электропривода;

канд. техн. наук Д. В. Безденежных, доцент кафедры электропривода;

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия; докт. техн. наук О. В. Федоров, профессор кафедры управления инновационной деятельностью;

ООО «НПП Система48», Липецк, Россия;

канд. техн. наук С. С. Титов, генеральный директор;

эл. почта: algebra934@yandex.ru

© Мещеряков В. Н., Федоров О. В., Титов С. С., Безденежных Д. В., 2019

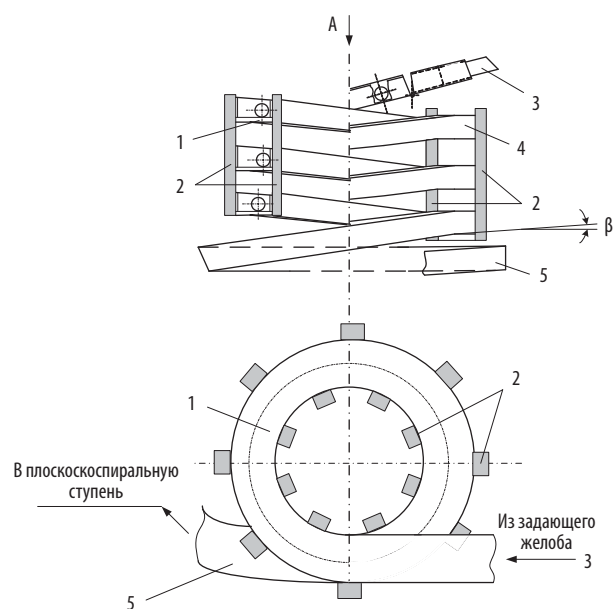


Рис. 1. Спиральный транспортирующий профиль с секциями индуктора: а — главный вид; б — вид в направлении «А»; 1 — трек (беговая дорожка) в корытообразном профиле (желоб); 2 — секции индуктора; 3 — задающий желоб; 4 — верхняя, цилиндрическая пространственно-спиральная ступень; 5 — ступень нижняя, плоскоспиральная; β — угол подъема спирали транспортирующего профиля

всей поверхности скатывающегося шара с электромагнитным полем в секциях индукторов и, соответственно, достижение искомого симметричного нагрева на заданную глубину.

Применение установки с данной конфигурацией направляющего профиля предполагается для металлических шаров небольшого диаметра 15–60 мм, используемых в качестве мелющих для тонкого помола материала.

Секционирование индуктора по длине транспортирующего профиля осуществляют с целью увеличения КПД установки и наличия возможности оперирования параметрами нагрева в широких пределах. Для обеспечения равномерного нагрева мелющих шаров необходимо равноинтенсивно распределить передаваемую им энергию электромагнитного поля по длине транспортирующего профиля. Так как удельное сопротивление и магнитная проницаемость шаров в процессе нагрева изменяются, то и ток индуктора по длине транспортирующего профиля должен быть разным. Вследствие различия магнитной проницаемости шаров по длине профиля должна различаться и частота тока индуктора, так как необходимо поддерживать заданную глубину нагрева. Указанные требования — различные ток и частота индуктора по длине профиля — возможно обеспечить только при разделении индуктора на секции.

В данной публикации рассмотрено решение задачи по построению экспериментальной установки, содержащей одну секцию индуктора, с целью постановки

экспериментов для апробации разработанного в публикациях [2–4] аналитического аппарата нагрева шаров. В дальнейшем полученные результаты исследований, проведенные на одной секции индуктора, позволят произвести расчет всей установки с индуктором, состоящим из множества секций.

Разработка установки

Выбор и расчет секции индуктора начинается с определения его геометрической конфигурации. Материалом для изготовления индуктора являются медные трубки. Во время работы индуктор охлаждается проточной водой. Форма и размеры индуктора зависят от условий нагрева, величины и конфигурации нагреваемой заготовки, а также от мощности и частоты источника питания.

В эксперименте в качестве заготовок использовали мелющие шары. В связи с этим был выбран индуктор многовитковой кольцевой конфигурации, т. е. с круглым поперечным сечением, позволяющим минимизировать воздушный зазор между витками индуктора и заготовкой, что, в свою очередь, повысит КПД.

Обычно индуктор изготавливают из медной трубки круглого или прямоугольного сечения. Использование медных трубок прямоугольного сечения повышает КПД на 2–3 % [5–8], что целесообразно для установок большой мощности. Однако медные трубки круглого сечения более распространены и имеют меньшую стоимость. Мощность рассчитываемого индуктора для экспериментальной установки невелика, поэтому выбраны трубки круглого сечения.

Выбор геометрических размеров секции индуктора (например, длины L) зависит от общего числа секций индуктора, кинематики перемещения шарообразных заготовок по транспортирующему профилю (геометрия транспортирующего профиля, масса и размеры металлоизделий шарообразной формы), требуемой мощности и глубины нагрева заготовок. Поэтому предварительно принимаем длину секции индуктора $L = 5d$ (d — диаметр шарообразной заготовки).

Внутренний диаметр индуктора D зависит от диаметра заготовки и толщины стенки транспортирующего профиля. Толщина стенки определяется выбранным материалом транспортирующего профиля. Требованиями к материалу профиля являются: высокая температура плавления (так как температура шарообразных заготовок будет достигать требуемой закалочной температуры 700–800 °C); низкий коэффициент температурного расширения; большое удельное электрическое сопротивление (для предотвращения нагрева материала индуктируемыми вихревыми токами); относительно высокая механическая прочность; немагнитность материала. В разрабатываемой экспериментальной установке для обеспечения передвижения шарообразной заготовки

внутри секции индуктора применили трубку из высокопрочного кварцевого стекла.

В практике индукционной заковки геометрически близких к шару коротких цилиндрических тел удельная мощность $P_{уд}$ к поверхности нагреваемого изделия находится в интервале 0,5–1,5 кВт/см² (~ 1 кВт/см²) [9]. Предполагаемая мощность экспериментальной установки P — не более 3 кВт. Для указанной мощности в качестве заготовок целесообразно использовать шарики подшипников качения из конструкционной подшипниковой стали ШХ15. Ориентировочный диаметр шарика должен быть не больше

$$d \leq \sqrt{P/\pi P_{уд}} \leq \sqrt{3/\pi \cdot 1} \approx 9,55 \text{ мм.} \quad (1)$$

Согласно ГОСТ 3722–2014 [10], подходящий максимальный диаметр шарика составляет 9,525 мм; это значение будет использовано при дальнейших расчетах. Согласно ТУ 21-54598235-560 – 2001, выбрана кварцевая трубка наружным диаметром $D = 12$ мм со стенкой толщиной $a = 1$ мм.

Произведем расчет электрических параметров индуктора. Необходимая частота тока индуктора f определяется поверхностным эффектом и зависит от требуемой активной глубины нагрева шара Δ_n , а также от свойств материала шара:

$$f = \frac{1}{\pi \mu_0 \mu_3 \frac{1}{\rho_3} \Delta_n^2}, \quad (2)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); μ_3 — относительная магнитная проницаемость заготовки; ρ_3 — удельное сопротивление заготовки.

Удельное сопротивление для углеродистых сталей (в данном случае ШХ15) зависит от температуры [11, 12].

Относительная магнитная проницаемость стали ШХ15 зависит от температуры T и напряженности магнитного поля H . Для расчета использована предложенная в работе [13] аппроксимация данных зависимостей:

$$\mu_3 = 1 + \frac{3,11 \cdot 10^5 \cdot H^{-0,852}}{\left[1 + \left(\frac{T}{T_k - T}\right)^{1,7+0,02 \ln(H)}\right]^{-0,03+0,02 \ln(H)}}, \quad (3)$$

где T_k — температура Кюри.

Требуемая активная глубина нагрева шара должна находиться в диапазоне 1–5 % диаметра шарообразной заготовки; для выбранной заготовки это значение составит 0,1–0,5 мм. Для расчета частоты по формуле (2) требуется знать значение напряженности магнитного поля H согласно формуле (3), однако это значение окончательно можно определить при электрическом расчете индуктора. Поэтому предварительно выбран диапазон значений $H = 20 \div 100$ кА/м с последующим уточнением после определения всех параметров индуктора.

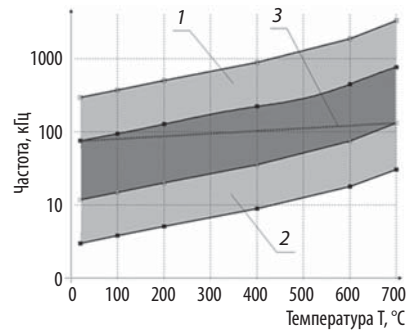


Рис. 2. Зависимость требуемой частоты тока от температуры:

- 1 — диапазон частот при напряженности 20 кА/м;
- 2 — диапазон частот при напряженности 100 кА/м;
- 3 — оптимальная частота, кГц

Зависимости требуемой частоты тока от температуры в виде диапазона, исходя из ограничений по заданной глубине нагрева для двух значений предварительно выбранной напряженности магнитного поля (20 и 100 кА/м), изображены на графиках рис. 2.

Область пересечения двух диапазонов является оптимальной для выбора частоты. Требуемую частоту следует выбирать таким образом, чтобы ее значение изменялось минимально при изменении температуры с целью сохранения параметров индуктора.

На рис. 2 показана линия, отображающая выбранную оптимальную частоту, ее диапазон при изменении температуры находится в пределах 75–132 кГц, что будет использовано в дальнейших расчетах.

Глубину проникновения тока Δ_m в медные проводники индуктора при 100 °С в диапазоне оптимальной частоты можно определить по формуле

$$\Delta_m = \sqrt{\frac{\rho_m}{\pi \mu_0 f}} = 0,22 \div 0,29, \text{ мм.} \quad (4)$$

Данное значение определяет минимально необходимую толщину медной трубки индуктора.

Зависимость наружного диаметра медной трубки d_n от активной площади сечения S_a можно оценить по формуле

$$d_n = \frac{S_a + \pi \Delta_m^2}{\pi \Delta_m}, \text{ мм.} \quad (5)$$

Максимально допустимая плотность тока индуктора $J_{доп}$ при условии охлаждения не должна превышать 150 А/мм² [8]. Зависимость требуемого внешнего диаметра медной трубки от тока индуктора I имеет вид

$$d_n = \frac{\frac{1}{J_{доп}} + \pi \Delta_m^2}{\pi \Delta_m}, \text{ мм.} \quad (6)$$

Значения диаметров более 10 мм нецелесообразны ввиду сложности изгиба трубки на внутренний диаметр, равный 12 мм. Из стандартных диаметров медных трубок выбраны значения 6, 8 и 10 мм (толщина стенки 1 мм). Исходя из ранее принятого

условия равенства длины секции индуктора L пяти диаметрам шара, для трубки диаметром 6 мм секция индуктора будет состоять из 7 витков, 8 мм — 5 витков, 10 мм — 4 витков. За критерий оценки при проведении анализа взято значение мощности нагрева, выделяемое в шарообразной заготовке.

Для расчета мощности нагрева применен метод конечных элементов (МКЭ), для реализации которого использован пакет программ FEMM [14]. В результате разработаны математические модели индуктора с заготовкой и тремя вариантами диаметров медной трубки (6, 8 и 10 мм). Далее были рассчитаны значения мощности нагрева в зависимости от тока индуктора при условии поддержания оптимальной частоты (рис. 3). Выбрано значение диаметра медной трубки индуктора, равное 8 мм, так как переход на больший диаметр (10 мм) практически не дает прироста мощности. Среднее значение мощности равняется 1,6 кВт, с учетом площади поверхности шарообразной заготовки это дает удельную мощность 0,533 кВт/см², что находится в рекомендуемом диапазоне 0,5–1,5 кВт/см².

Далее были построены зависимости напряженности магнитного поля H от расстояния от поверхности в глубь заготовки (рис. 4). Как видно из графиков, значения напряженности близки к предварительно принятому интервалу $H = 20 \div 100$ кА/м.

На следующем этапе исследований осуществлен расчет основных элементов электрической схемы (рис. 5). Исходные данные для расчета соответствовали частоте тока индуктора 75 кГц, величине тока индуктора 1040 А и температуре заготовки 20 °С.

Разработанная электрическая схема (см. рис. 5) состоит из следующих элементов:

- согласующий трансформатор Т1, с ферритовым сердечником Epcos N87 (габаритная мощность 5316 Вт, число витков первичной обмотки — 52, вторичной — 1 виток);

- компенсирующие конденсаторы C_2 К78-2 (емкостью 1,5 мкФ, 75 ед., включенных параллельно);

- конденсатор звена постоянного тока C_1 (два конденсатора К50-35 емкостью 4700 мФ, напряжением 450 В, включенных параллельно);

- силовые транзисторы MOSFET VT1–VT4 со встречно-параллельными диодами (типа IXFN56N90P с номинальным током 36 А);

- L_{s2} — индуктивность рассеяния индуктора; r_2 — активное сопротивление проводников индуктора; L_m , r_2 — эквивалентная индуктивность и активное сопротивление шарообразной заготовки в индукторе.

Напряжение в звене постоянного тока установки составляет порядка 300 В.

Система управления [15] силовыми транзисторами, позволяющая задавать амплитуду и частоту тока индуктора, была реализована на базе микроконтроллера Texas Instruments TMS320F28377S [16–20],

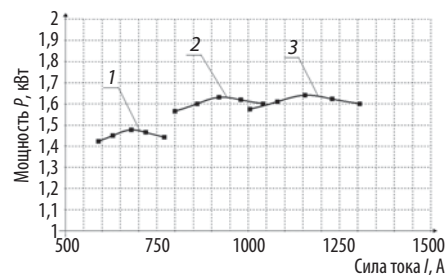


Рис. 3. Мощность нагрева заготовки для диаметров трубки индуктора 6 (1), 8 (2) и 10 (3) мм

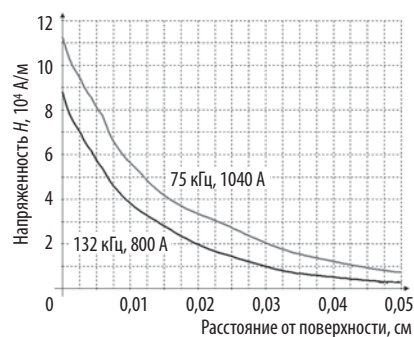


Рис. 4. Зависимость напряженности магнитного поля в шарообразной заготовке от расстояния от поверхности

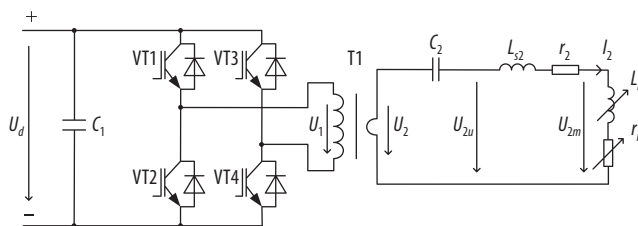


Рис. 5. Электрическая схема установки

полумостовых драйверов IRS2308PBF и оптронов HCPL3120-000Е. Для измерения тока индуктора применен магниторезистивный датчик CMS3025 [21, 22], позволяющий измерять токи большой частоты с точностью порядка $\pm 0,6\%$ номинального измеряемого тока 25 А. Датчик расположен на первичной обмотке трансформатора.

На лабораторной установке определяли оптимальную частоту, величину тока индуктора, время нагрева при работе секции индуктора на неподвижный шар. Оптимальные частоту и величину тока индуктора определили по критерию максимально возможной скорости нагрева шара. При этом допустимый диапазон частоты $f_{\min} - f_{\max}$ должен быть ограничен, исходя из допустимого диапазона глубины нагрева шара [23]:

$$\begin{cases} f_{\max} = \frac{1}{\pi \times \Delta_{\min}^2 \mu_0 \mu_3} \frac{1}{\rho_3} [\text{Гц}]; \\ f_{\min} = \frac{1}{\pi \times \Delta_{\max}^2 \mu_0 \mu_3} \frac{1}{\rho_3} [\text{Гц}], \end{cases} \quad (7)$$

Таблица 1.

Определение допустимого тока батареи конденсаторов

Резонансная частота $f_{\text{рез}}$, кГц	Требуемая емкость C , мкФ	Число пар конденсаторов в батарее	Результирующая емкость C , мкФ	Допустимый ток пары конденсаторов, А	Допустимый ток батареи конденсаторов, А
75	25,59	34	25,5	40,0	680
80	22,49	30	22,5	35,2	528
90	17,77	24	18	27,1	325
100	14,39	19	14,25	21,4	203
110	11,90	16	12	16,7	134
120	10,00	13	9,75	13,1	85
130	8,52	11	8,25	10,8	60
132	8,26	11	8,25	10,5	58

Таблица 2.

Измерение времени нагрева шара при различных частотах тока

Частота тока индуктора, кГц	Ток, потребляемый от выпрямителя, А	Мощность, потребляемая от выпрямителя, Вт	Ток индуктора, А	Емкость батареи конденсаторов C , мкФ	Время нагрева до 500 °С, с
75	2,5	500	130	25,5	25
100	2,5	500	100	14,25	27
120	2,5	500	80	9,75	29,5

где Δ_{\min} — минимальная глубина нагрева шара; Δ_{\max} — максимальная глубина нагрева шара; μ_3 — относительная магнитная проницаемость материала заготовки; ρ_3 — удельное электрическое сопротивление материала заготовки.

Перед проведением экспериментов определили резонансную частоту всего силового контура. Емкость контура определяется числом применяемых компенсирующих конденсаторов. Всего использовано 68 конденсаторов К78-2 емкостью 1,5 мкФ и напряжением 250 В. Для изменения резонансной частоты контура возможно отключение части конденсаторов. Они включены в параллель по 2 последовательно. Суммарно получается максимум 34 пары конденсаторов напряжением 500 В и емкостью 0,75 мкФ. Общая максимальная емкость всей батареи конденсаторов составляет 25,5 мкФ.

Проводили два измерения: на вторичной обмотке трансформатора в разрыв цепи, состоящей из медной трубки индуктора, и на первичной обмотке трансформатора. Измеренную индуктивность на первичной обмотке приводили ко вторичной обмотке через коэффициент трансформации $k = 52$; в результате эквивалентная общая индуктивность трансформатора и пустого индуктора L_1 равна 0,165 мкГн. Аналогичное измерение общей индуктивности $L_1 + L_m$ при помещении ненагретого шара в индуктор дает значение 0,176 мкГн.

Требуемая емкость батареи компенсирующих конденсаторов для поддержания резонансной частоты индуктора определяется по формуле

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 (L_1 + L_m)}, \text{ мкФ.} \quad (8)$$

Определим различные значения требуемых емкостей и число конденсаторов батареи на нескольких промежуточных частотах f в диапазоне 75–132 кГц при условии поддержания резонансной частоты. При этом допустимый ток батареи с рассчитанным числом конденсаторов определим, используя графики, представленные в [24]. Допустимый ток батареи конденсаторов в данном случае будет являться и допустимым током индуктора. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, при увеличении частоты требуемая емкость батареи конденсаторов уменьшается, следовательно, необходимо уменьшать число пар конденсаторов, включенных параллельно. Однако это приводит к уменьшению допустимого тока батареи конденсаторов, который является также током индуктора.

Продолжительность нагрева шара оценивали при частотах 75, 100 и 120 кГц. При этом при всех трех измерениях поддерживали неизменный ток, потребляемый от выпрямителей, т. е. постоянную активную мощность. Величину тока выпрямителя определили по критерию достижения током индуктора значения, равного допустимому току конденсаторной батареи 85 А для частоты 120 кГц, и она составила 2,5 А, что соответствует мощности, потребляемой от выпрямителя 500 Вт. Для поддержания неизменного тока выпрямителя ток индуктора регулировали изменением величины действующего значения выходного напряжения.

Шар нагревали от 20 до 500 °С. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, при неизменной величине потребляемой мощности нагрев на более низкой частоте 75 кГц происходит быстрее, что можно объяснить повышением нагрева транзисторов MOSFET

Таблица 3.

Измерение времени нагрева шара при разных величинах тока

Ток, потребляемый от выпрямителя, А	Мощность, потребляемая от выпрямителя, Вт	Ток индуктора, А	Время нагрева до 780 °С, с
3,7	740	200	27
6,9	1380	400	15,7
8	1600	550	13,5
8,7	1740	650	12,1

на более высокой частоте и, как следствие, снижением КПД установки. В качестве оптимальной выбрана частота 75 кГц, время нагрева при которой (при токе индуктора 130 А) составило 25 с.

Для выбранного значения частоты 75 кГц максимально допустимый ток батареи конденсаторов составляет 680 А (см. табл. 1). В табл. 3 приведена оценка времени нагрева шара и величины потребляемой активной мощности при разных токах индуктора.

Заключение

В результате проведенных исследований рассчитана оптимальная конструкция секции индуктора для нагрева выбранной заготовки — шариков подшипников с максимальным диаметром 9,525 мм. Проведение аналогичных расчетов позволит создать установку для нагрева шаров большего диаметра, в частности для мелющих шаров. Проведенные эксперименты по нагреву шара, при которых были определены оптимальная частота и величина тока индуктора, а также оценено время нагрева неподвижного шара, позволяют разработать концепцию для построения установки с пространственно-спиральным индуктором, состоящим из множества секций.

Перспектива перехода от классических подходов к вопросу термообработки (ТЭНы, газовый нагрев) стальных мелющих шаров к индукционным методам является одним из перспективных направлений развития черной металлургии наряду с уже имеющимся опытом применения энергии электромагнитного поля для нагрева [25, 26].

Исследование выполнено по программе «Старт-1» Фонда содействия инновациям (договор № 1195ГЦ1/21661 от 05.05.2016).

Библиографический список

- Обзор рынка стальных помольных (мелющих) шаров и оборудования для их производства в СНГ. 6-е изд. — М.: ООО «ИГ «Информайн», 2016. — 256 с.
- Пат. №148725 РФ, МПК H05B6/36. Индуктор непрерывного действия для равномерного осесимметричного индукционного нагрева изделий шарообразной формы «Комбиспираль» /

- С. С. Титов ; заявл. 16.12.2013 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.
- Meshcheryakov V. N., Titov S. S. Induction Heating Plant for Heat Treatment of Spherical Metal Products // Russian Metallurgy (Metally). 2015. Vol. 2015, Iss. 12. P. 985–992.
- Мещеряков В. Н., Титов С. С., Безденежных Д. В. Разработка и исследование системы управления индуктором для электро-технических комплексов по симметричному индукционному нагреву металлоизделий шарообразной формы // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. № 2. С. 43–50.
- Fedorov O. V. Assessment of influence parameters of electric equipment at a size of losses the electric power in intra factory networks of low voltage // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). — Chelyabinsk. 2016. P. 836–840.
- Слухоцкий А. И., Немков В. С., Павлов Н. А., Бамунэр А. В. Установки индукционного нагрева. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 328 с.
- Luo F. L., Ye H., Rashid M. Digital power electronics and applications. — San Diego, USA : Elsevier, 2005. — 408 p.
- Bose B. K. Modern power electronics and AC drives. — New Jersey, USA : Prentice Hall PTR, 2002. — 711 p.
- Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. 2-е изд. — М.—Л.: Энергия, 1965. — 552 с.
- ГОСТ 3722–2014. Подшипники качения. Шарикоподшипники. Технические условия. — Введ. 01.01.2016.
- Алиев И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию. — М.: Высшая школа, 2016. — 255 с.
- Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics. Converters, application and design. Second edition. — New Jersey, USA : A John Wiley and Sons, Inc, 2006. — 802 p.
- Владимиров С. Н., Земан С. К., Рубан В. В. Аналитические соотношения, аппроксимирующие температурно-полевую зависимость магнитной проницаемости конструктивных сталей // Известия Томского политехнического университета. 2009. № 4. С. 100–104.
- Байда Е. И. Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. — 147 с.
- Пат. 172183 РФ, МПК H05B6/06. Устройство для управления индуктором / С. С. Титов, В. Н. Мещеряков, Д. В. Безденежных ; заявл. 25.10.2016 ; опубл. 30.06.2017, Бюл. № 19.
- TMS320F2837xS. Delfino™ Microcontrollers (Rev. C). Production Data. Literature Number: SPRS881C. Texas Instruments, 2016. — 218 p.
- LAUNCHXL-F28377S. Overview. User's Guide. Literature Number: SPRUI25. Texas Instruments, 2015. — 25 p.
- Калабеков Б. А. Цифровые устройства и микропроцессорные системы. — М.: Телеком, 2007. — 336 с.
- Гук И. Краткий обзор цифровых сигнальных процессоров DaVinci компании Texas Instrument // Компоненты и технологии. 2007. № 3. С. 1–6.
- Обзор DSP-процессоров // Электронные компоненты. 2008. № 3. С. 125–128.
- Honeywell Current Sensors. SENSING AND CONTROL. Product Range Guide. — Honeywell International Inc, 2010. — 12 p.
- SN54HC14, SN74HC14. Hex Schmitt-trigger Inverters. Literature Number: SCLS085E. — Texas Instruments, 2004. — 15 p.
- Demidovich V. B., Rudnev V. I., Komrakova G. D. Space Change of Eddy Current Power by Induction Heating of Steel Cylinders Second. — Nottingham : University of Nottingham, 1994. — 189 p.
- Технические условия ОЖ 0.461.112 ТУ. К78-2 Фольговые и металлизированные высокочастотные полипропиленовые конденсаторы.
- Leushin I. O., Subbotin A. Yu., Geyko M. A. Recycling of galvanized steel scrap for use in cast iron melting in induction melting facilities // CIS Iron and Steel Review. 2015. Vol. 10. P. 19–22.
- Баранкова И. И., Михайлова У. В., Мугалимов Р. Г., Никуфоров Г. В. Развитие технологий индукционного нагрева для термообработки // Черные металлы. 2017. № 8. С. 54–58.

CALCULATION AND DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL INDUCTION INSTALLATION FOR SYMMETRIC HARDENING OF GRINDING METAL BALLS

V. N. Meshcheryakov¹, Dr. Eng., Prof., Head of the chair of electric drive

D. V. Bezdenezhnykh¹, Cand. Eng., Associate prof., Chair of electric drive

O. V. Fedorov², Dr. Eng., Prof., Chair of innovation management

S. S. Titov³, Cand. Eng., General director

¹Lipetsk State Technical University (Lipetsk, Russia)

²Nizhniy Novgorod State Technical University (Nizhniy Novgorod, Russia)

³“Systema 48” Scientific and Production Enterprise (Lipetsk, Russia)

E-mail: algebra934@yandex.ru

To create energetically efficient continuous-action equipment for symmetric heating of spherical metal products to a given depth for heat treatment without oxidation and decarburization is a challenging problem for some industries, including the mass production of milling bodies for ore-dressing and processing enterprises and cement plants, balls for rolling bearings and valves in hydraulic systems, and wear-resistant balls in the backwater gates of deep-well pumps for oil production. Induction heating with direct high-rate (several seconds or fractions of a second) conversion of electric energy into heat energy meets these industrial heating requirements best of all. This method of heating is characterized by simple temperature and heating depth control, which makes it possible to obtain the optimum combination of a high surface hardness (back-to-back endurance) of products with a relatively plastic core (anticracking) after quenching and tempering. However, despite all advantages of this method, it is only applied to produce articles of a continuous or near-continuous cross section with ensured symmetry of heating in the world practice. Therefore, the actual task is the research and development of equipment for symmetric induction heating of metal balls with subsequent studies to determine the optimal frequency and value of the current of the inductor, as well as the heating time of the ball. As a result of this research, one section of the inductor was research and developed, the optimal frequency and value of the inductor current was chosen, the heating time of the ball was estimated. The obtained results allow us to develop a concept for the construction of a induction heating plant with a spatially-spiral chute and an inductor consisting of a set of sections.

Keywords: inductor, induction heating, induction hardening, resonant inverter, billet, rolling bearing, grinding balls.

The study has been performed under the Start-1 program of the Innovation Assistance Fund (Contract No. 119SGS1 / 21661 dated 05. 05. 2016).

References:

1. Market overview of steel grinding balls and equipment for their production in the CIS. 6th edition. Moscow: «IG «Infomine» company, 2016. 256 p.
2. Titov S. S. Kombispiral inductor of continuous action for uniform axisymmetric induction heating of products of the spherical shape. Patent RF No. 148725. Applied: 16.12.2013. Published: 10.12.2014. Bulletin No. 34.
3. Meshcheryakov V. N., Titov S. S. Induction Heating Plant for Heat Treatment of Spherical Metal Products. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2015. Vol. 2015, Iss. 12. pp. 985–992.

4. Meshcheryakov V. N., Titov S. S., Bezdenezhnykh D. V. Development and research of the inductor control system for electrical systems for the symmetric induction heating of spherical metal hardware. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2017. No. 2. pp. 43–50.
5. Fedorov O. V. Assessment of influence parameters of electric equipment at a size of losses the electric power in intra factory networks of low voltage. *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Chelyabinsk. 2016. pp. 836–840.
6. Slukhotsky A. I., Nemkov V. S., Pavlov N. A., Bamuner A. V. Induction heating systems. Leningrad: Energoizdat, 1981. 328 p.
7. Luo F. L., Ye H., Rashid M. Digital power electronics and applications. San Diego, USA: Elsevier, 2005. 408 p.
8. Bose B. K. Modern power electronics and AC drives. New Jersey, USA: Prentice Hall PTR, 2002. 711 p.
9. Babat G. I. Induction heating of metals and its industrial application. 2nd edition. Moscow-Leningrad: Energiya, 1965. 552 p.
10. GOST 3722-2014. Rolling bearings. Steel balls. Specifications. Introduced: 01.01.2016.
11. Aliev I. I. Handbook of electrical engineering and electrical equipment. Moscow: Vyshaya shkola, 2016. 255 p.
12. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics. Converters, application and design. Second edition. New Jersey, USA : A John Wiley and Sons, Inc, 2006. 802 p.
13. Vladimirov S. N., Zeman S. K., Ruban V. V. Analytical relations approximating the temperature-field dependence of the magnetic permeability of structural steels. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2009. No. 4. pp. 100–104.
14. Bayda E. I. Calculation of electromagnetic and thermal fields using the FEMM program. Kharkov: NTU «KhPI», 2015. 147 p.
15. Meshcheryakov V. N., Titov S. S., Bezdenezhnykh D. V. Device for inductor control. Patent RF No. 172183. Applied: 25.10.2016. Published: 30.06.2017. Bulletin No. 19.
16. TMS320F2837xS Delfino™ Microcontrollers (Rev. C). Production Data. Literature Number: SPRS881C. Texas Instruments, 2016. 218 p.
17. LAUNCHXL-F28377S Overview. User's Guide. Literature Number: SPRUI25. Texas Instruments, 2015. 25 p.
18. Kalabekov B. A. Digital devices and microprocessor systems. Moscow: Telekom, 2007. 336 p.
19. Guk I. Overview of Texas Instrument DaVinci Digital Signal Processors. *Komponenty i tekhnologii*. 2007. No. 3. pp. 1–6.
20. DSP Processor Overview. *Elektronnye komponenty*. 2008. No. 3. pp. 125–128.
21. Honeywell Current Sensors. SENSING AND CONTROL. Product Range Guide. Honeywell International Inc, 2010. 12 p.
22. SN54HC14, SN74HC14. Hex Schmitt-trigger Inverters. Literature Number: SCLS085E. Texas Instruments, 2004. 15 p.
23. Demidovich V. B., Rudnev V. I., Komrakova G. D. Space Change of Eddy Current Power by Induction Heating of Steel Cylinders Second. Nottingham: University of Nottingham, 1994. 189 p.
24. Technical conditions OZh 0.461.112 TU. K78-2 Foil and metallized high-frequency polypropylene capacitors.
25. Leushin I. O., Subbotin A. Yu., Geyko M. A. Recycling of galvanized steel scrap for use in cast iron melting in induction melting facilities. *CIS Iron and Steel Review*. 2015. Vol. 10. pp. 19–22.
26. Barankova I. I., Mikhailova U. V., Mugalimov R. G., Nikiforov G. V. Development of heating induction technologies for heat treatment. *Chernye Metally*. 2017. No. 8. pp. 54–58.