

А. АЛИФЕРОВ, С. ЛУПИ

ИНДУКЦИОННЫЙ И ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЙ НАГРЕВ МЕТАЛЛОВ



**НОВОСИБИРСК
2 0 1 1**

УДК 621.365
А 502

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *А.Б. Кувалдин* (МЭИ-ТУ);
д-р техн. наук, проф. *В.Ю. Нейман* (НГТУ)

Алиферов А.

А 502 Индукционный и электроконтактный нагрев металлов : монография / А. Алиферов, С. Лупи. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 411 с. – (Серия «Монографии НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-1622-8

Изложены теоретические основы индукционного и электроконтактного нагрева. Обобщены результаты исследований, представленных в российских и зарубежных литературных источниках, а также выполненных в Новосибирском государственном техническом университете (Россия) и в университете г. Падуа (Италия). Исследованы электромагнитные процессы в системе индуктор–загрузка в установках индукционного нагрева и в нагреваемых изделиях в установках электроконтактного нагрева. Рассмотрены различные формы изделий, нагреваемых посредством каждого из этих методов. Приведены аналитические методы расчета параметров электромагнитного поля в нагреваемых изделиях, а также интегральных электрических и энергетических характеристик нагревательных установок; результаты аналитических расчетов сравниваются с данными численного моделирования и физических экспериментов на промышленных установках.

Адресована специалистам, занимающимся проектированием и эксплуатацией нагревательного оборудования, предназначенного для нагрева металлов под механическую обработку давлением и термообработку. Может быть также полезна студентам, магистрантам и аспирантам.

УДК 621.365

ISBN 978-5-7782-1622-8

© Алиферов А., Лупи С., 2011
© Новосибирский государственный
технический университет, 2011

Ministry of Education and Science of the Russian Federation

NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

A. ALIFEROV, S. LUPI

INDUCTION
AND DIRECT RESISTANCE
HEATING OF METALS

Monograph

NOVOSIBIRSK
2011

UDC 621.365
A 502

Reviewers:

Prof. *A.B. Kuvaldin*, D. Sc. (Eng.) (MEI-TU)
Prof. *V.Yu. Neyman*, D.Sc. (Eng.) (NSTU)

Aliferov A.

A 502 Induction and Direct Resistance Heating of Metals : monograph /
A. Aliferov, S. Lupi. – Novosibirsk : NSTU Publisher, 2011. –
411 pp. (“NSTU Monographs” series).

ISBN 978-5-7782-1622-8

Theoretical fundamentals of induction and direct resistance heating are expounded in the monograph. The results of the research conducted in the Novosibirsk State Technical University (Russia), and in Padua University (Italy) are presented. Electromagnetic processes in the inductor-charging system in induction heating installations and in metal pieces heated in direct resistance installations have been studied. Various shapes of workpieces heated by each of these methods have been considered, namely, rectilinear articles of cylindrical and rectangular cross-sections, flat articles, and articles of an irregular shape (gears) heated by the induction method as well as rectilinear articles of rectangular and cylindrical cross-sections, curvilinear articles of the cylindrical cross-section heated by the direct resistance method. Analytical calculation methods of electromagnetic field parameters in heated workpieces along with integral electrical and power characteristics of heating installations are presented. Results of analytical calculations have been compared with numerical modeling data and results of physical experiments carried out on industrial installation.

The monograph is aimed at specialists involved in designing and running heating equipment intended for heating metals to be machined by forming operation and by heat treatment. It can also be useful for undergraduate, graduate and postgraduate students.

UDC 621.365

ISBN 978-5-7782-1622-8

© Aliferov A., Lupi S., 2011
© Novosibirsk State
Technical University, 2011

Оглавление

Предисловие	7
Список обозначений	9
Введение	13
Глава 1. Физические основы индукционного нагрева и электрокон- тактного нагрева	15
1.1. Метод индукционного нагрева.....	15
1.2. Метод электроконтактного нагрева.....	15
1.3. Характеристики электрического поля	16
1.4. Характеристики магнитного поля.....	17
1.5. Связь электрического и магнитного полей друг с другом.....	19
1.6. Закон Джоуля–Ленца	22
1.7. Поверхностный эффект в проводниках.....	23
1.8. Теорема и вектор Пойнтинга в синусоидальном переменном электромагнитном поле	35
Глава 2. Электромагнитные явления при индукционном и электро- контактном нагреве изделий прямолинейной формы	39
2.1. Нагрев плоских изделий	39
2.1.1. Полубесконечное изделие	39
2.1.1.1. Однородный материал	39
2.1.1.2. Материал нагреваемого изделия с переменными физиче- скими свойствами (ферромагнитный)	61
2.1.2. Тонкий металлический сляб	76
Однородный материал	76
2.1.3. Сляб прямоугольного поперечного сечения	105
2.1.3.1. Однородный материал	105

2.1.3.2. Материал нагреваемого сляба с переменными магнитными свойствами	122
2.2. Нагрев цилиндрических изделий	124
2.2.1. Сплошное цилиндрическое изделие	124
2.2.1.1. Однородный материал	124
2.2.1.2. Материал изделия с переменными физическими свойствами (ферромагнитный)	144
2.2.2. Полое (трубчатое) цилиндрическое изделие	153
2.2.2.1. Однородный материал изделия	153
2.2.2.2. Материал изделия с переменными физическими свойствами (ферромагнитный)	164
Глава 3. Аналитические методы расчета электрических и энергетических параметров установок индукционного и электроконтактного нагрева	171
3.1. Расчет электрических и энергетических характеристик установок индукционного нагрева	171
3.1.1. Расчет параметров системы «индуктор – загрузка» по методу полного магнитного потока	171
3.1.2. Метод, основанный на теории электромагнитного поля	176
3.1.3. Метод индуктивно-связанных контуров	180
3.2. Расчет электрических и энергетических характеристик установок электроконтактного нагрева	186
Глава 4. Применение индукционного и электроконтактного нагрева для решения специальных технических задач	203
4.1. Электроконтактный нагрев ферромагнитных изделий прямоугольного поперечного сечения	203
4.2. Электромагнитные и тепловые процессы в токоведущих криволинейных проводниках цилиндрического поперечного сечения	217
4.2.1. Электромагнитные процессы в тороидальных проводниках круглого поперечного сечения	217
4.2.2. Электромагнитные и тепловые процессы при электроконтактном нагреве криволинейных цилиндрических изделий	228
4.3. Индукционный нагрев в поперечном магнитном поле	247
4.4. Плоские кольцевые катушки для индукционного нагрева	275
4.5. Индукционный нагрев цилиндрических заготовок, вращающихся в магнитном поле постоянного тока	287

4.6. Одно- и двухчастотная индукционная поверхностная закалка изделий сложной формы.....	306
4.7. Индукционный нагрев цилиндрических изделий бесконечной длины индукторами конечных размеров.....	339
4.8. Индукционный нагрев внутренних цилиндрических поверхностей.....	358
4.9. Электромагнитные силы.....	366
Приложения.....	387
Библиографический список.....	391

Contents

Foreword.....	7
Abbreviations.....	9
Introduction.....	13
Chapter 1. Physical Fundamentals of Induction and Electrical Contact Heating	15
1.1. Induction heating method.....	15
1.2. Electrical contact method.....	15
1.3. Electric field characteristics.....	16
1.4. Magnetic field characteristics.....	17
1.5. Electric field-magnetic field relationship.....	19
1.6. Joule–Lenz’s law.....	22
1.7. The surface effect in semiconductors.....	23
1.8. The Poynting theorem and energy-flux vector in the sinusoidal alternating electromagnetic field.....	35
Chapter 2. Electromagnetic Phenomena in Electrical Contact and Induction Heating of Workpieces of the Rectilinear Shape	39
2.1. Heating of flat workpieces.....	39
2.1.1. Semi-infinite workpieces.....	39
2.1.1.1. Homogeneous materials.....	39
2.1.1.2. A workpiece material with variable physical properties (ferromagnetic).....	61
2.1.2. Thin metal slab.....	76
Homogeneous materials.....	76
2.1.3. Slab of the rectangular cross-section.....	105
2.1.3.1. Homogeneous materials.....	105
2.1.3.2. A heated slab material with magnetic properties.....	122

2.2. Heating of cylindrical workpieces.....	124
2.2.1. Solid cylindrical workpieces.....	124
2.2.1.1. Homogeneous materials	124
2.2.1.2. A workpiece material with variable physical properties (ferromagnetic).....	144
2.2.2. Hollow (tubular) cylindrical workpieces	153
2.2.2.1. Homogeneous workpiece material	153
2.2.2.2. A workpiece material with variable physical properties (ferromagnetic).....	164
Chapter 3. Analytical Calculation Methods of Electrical and Energy Parameters of Induction and Electrical Contact Heating Installations.....	171
3.1. Calculation of electrical and energy characteristics of induction heating installations.....	171
3.1.1. Calculation of parameters of the inductor-charging system by the total magnetic flux method.....	171
3.1.2. A method based on the magnetic field theory.....	176
3.1.3. The method of inductively coupled circuits.....	180
3.2. Calculation of electrical and energy characteristics of electrical contact heating installations	186
Chapter 4. Application of Induction and Electrical Contact Heating for Solving Special Engineering Tasks	203
4.1. Electrical contact heating of ferromagnetic workpieces of the rectangular cross-section	203
4.2. Electromagnetic and thermal processes in current-carrying curvilinear conductors of the cylindrical cross-section.....	217
4.2.1. Electromagnetic processes in toroidal conductors of the circular cross-section.....	217
4.2.2. Electromagnetic and thermal processes in electrical contact heating of curvilinear cylindrical workpieces	228
4.3. Induction heating in the transverse magnetic field.....	247
4.4. Pancake circular coils for induction heating.....	275
4.5. Induction heating of cylindrical workpieces rotating in the dc magnetic field.....	287
4.6. Single- and two-frequency induction surface hardening of irregular shape workpieces	306

4.7. Induction heating of infinite-length cylindrical workpieces by finite size inductors	339
4.8. Induction heating of internal cylindrical surfaces	358
4.9. Electromagnetic forces	366
Appendices	387
References.....	391