ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НАЦИОНАЛЬНОЙ
АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

90 ЛЕТ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Минск
2021

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Сборник научных трудов
В 2 книгах
Книга 2

Электротехнологии

Минск
ФТИ НАН Беларуси
2021

THE PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE OF THE NATIONAL
ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS, STATE SCIENTIFIC INSTITUTION

ADVANCED METHODS AND TECHNOLOGIES OF MATERIALS DEVELOPMENT AND PROCESSING

Collection of scientific papers
In 2 volumes
Volume 2

Electrical technologies

Minsk
PTI NAS Belarus
2021

УДК [621.7+621.9](082)
ББК 30.61я.43
С56

Редакционная коллегия:
В.Г. Залесский (гл. ред., д. ф.-м. н.),
А.Т. Волочко (зам. гл. ред., д. т. н., профессор),
А.В. Басалай (к. т. н.), А.В. Белый (чл.-корр. НАН Беларуси),
А.И. Гордиенко (академик НАН Беларуси), [illegible] Зеленин (д. т. н.),
В.В. Клубович (академик НАН Беларуси), Г.В. Кожевникова (д. т. н.),
В.А. Кукареко (д. ф.-м. н.), С.Д. Латушкина (к. т. н.), А.И. Михлюк (к. т. н.),
И.П. Смягликов (к. т. н.), И.Л. Поболь (д. т. н.)

С 56 **Современные** методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 2 кн. Кн. 2. Электротехнологии / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2021. — 190 с. : ил.
ISBN 978-985-6441-66-3

Книга вторая содержит информацию об истории, перспективах развития электротехнологий и результатах исследований по созданию новых технологий с использованием концентрированных потоков энергии, электромагнитного, лазерного и СВЧ воздействия. Представлены последние достижения в области формирования упрочняющих слоев и структур с функционально-градиентным распределением свойств на конструкционных и инструментальных материалах. Рассмотрены вопросы развития методов расчета и моделирования различных процессов индукционного нагрева под плавку, графитизацию, пайку, термообработку и нагрева под последующую деформацию.

УДК [621.7+621.9](082)
ББК 30.61я.43

ISBN 978-985-6441-66-3 (кн. 2)
ISBN 978-985-6441-67-0

© Физико-технический институт
Национальной академии
наук Беларуси, 2021

Конференция «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» проводится на базе Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси с 2006 года и за пятнадцать лет стала общепризнанным местом для обсуждения достигнутых результатов, новых идей, актуальных проблем и тенденций развития науки и техники в области создания и обработки материалов. У нас собираются ведущие ученые из России, Украины, Литвы, Польши, Словакии, Великобритании, Египта, КНР, а также специалисты-практики крупнейших промышленных предприятий Республики Беларусь.

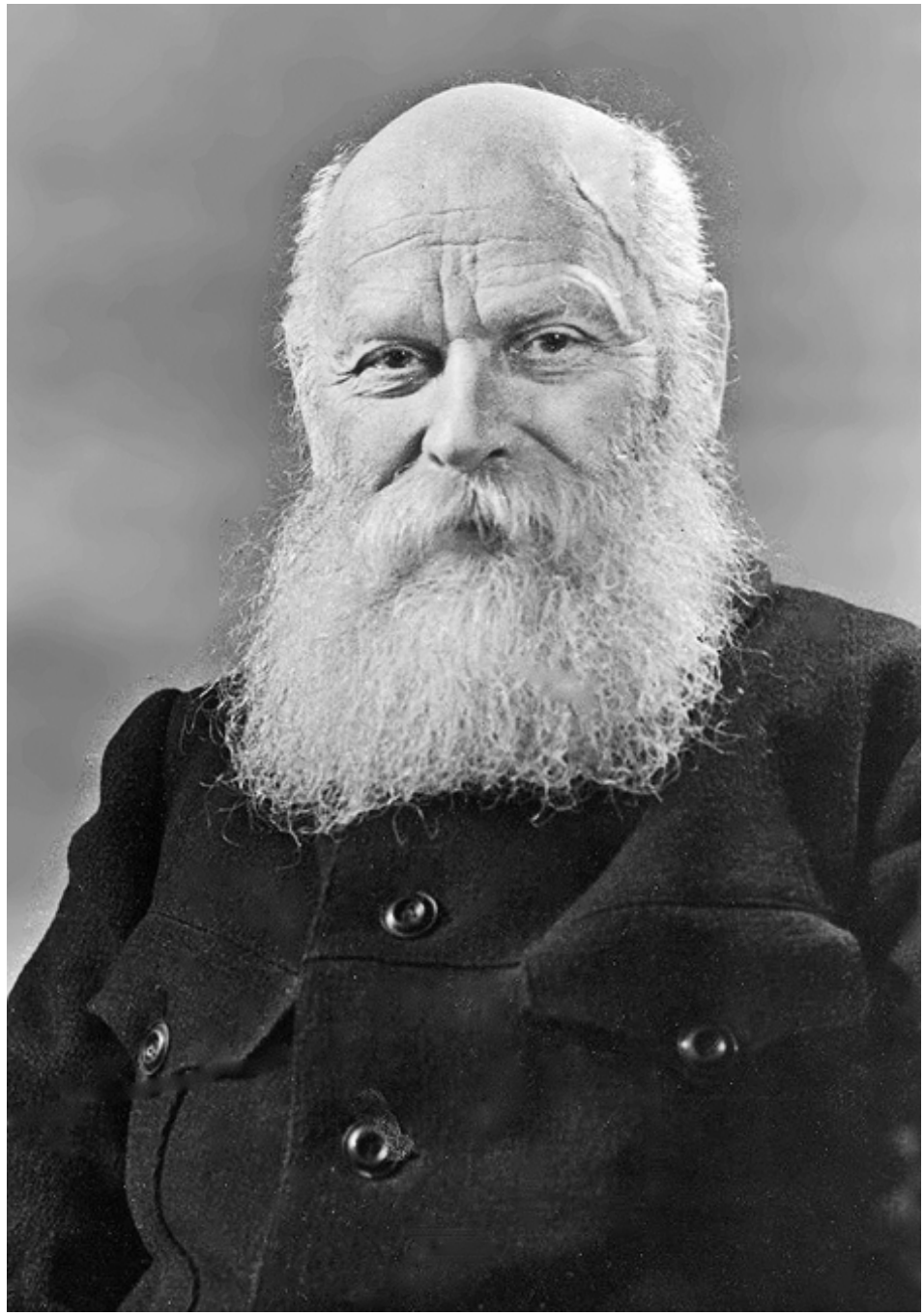
В 2021 году проведение конференции приурочено к знаковой дате – 90-летию Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси. На протяжении своей истории наш институт эффективно развивает и успешно внедряет в производство широкий спектр технологий и оборудования, от литейного производства до инновационных методов обработки материалов, включая востребованные на крупнейших предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации уникальные технологии и оборудование для ионной химико-термической обработки и индукционного нагрева.

Текущий год является символичным и в связи со 140-летием со дня рождения выдающегося российского и советского ученого, стоявшего у истоков отечественного высокочастотного оборудования – Валентина Петровича Вологдина. Главное изобретение Валентина Петровича, которое по настоящее время широко используется, это применение токов высокой частоты для индукционной поверхностной закалки. Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси занимается активным и успешным продвижением и развитием идей Вологдина В.П. Поэтому в 2021 году оргкомитет принял решение провести отдельную секцию «Электротехнологии», на которой ученые и практики смогут обменяться мнениями и обсудить перспективы развития данного направления.

Уверен, что интересные дискуссии на площадке нашей Конференции будут способствовать укреплению интеграционных связей и позволят сделать еще один шаг вперед к повышению эффективности производства и увеличению международного престижа нашей научной мысли.

В.Г. Залесский
Директор, доктор физ.-мат. наук

Посвящается 140-летию со Дня Рождения



Валентин Петрович Вологдин
(1881-1953)

УДК 621.31,62137
ББК 34

ВКЛАД ПРОФЕССОРА В.П. ВОЛОГДИНА В РАЗВИТИЕ РАДИО И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ

В.В. Вологдин

Научно-производственная фирма «ФРЕАЛ и Ко»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

10 (22) марта 2021 года исполняется 140 лет со дня рождения выдающегося ученого, талантливого инженера и изобретателя, профессора, члена-корреспондента АН СССР Валентина Петровича Вологдина. Он сыграл особую роль в развитии российской радиопромышленности и за большой научный и технический вклад был награжден первой золотой медалью А.С. Попова. Он также является основателем советской школы высокочастотной электротермии. Созданные им лаборатория и кафедра электротермических установок в Электротехническом институте (ЛЭТИ), лаборатория высокочастотной техники в АН СССР, а также институт токов высокой частоты – ВНИИТВЧ, впоследствии носящий его имя, в течение многих лет являлись центром развития высокочастотных электротехнологий и подготовки кадров инженеров-высокочастотников.

Ключевые слова: радио, высокочастотный машинный генератор, индукционный нагрев, токи высокой частоты, электротехнология

CONTRIBUTION OF PROFESSOR V.P. VOLOGDIN IN DEVELOPMENT OF RADIO AND ELECTROTECHNOLOGIES

V.V. Vologdin

[1]Scientific and production Company «FREAL Co. Ltd»
Sankt-Petersburg, Russian Federation

March 10 (22), 2021 marks the 140th anniversary of the birth of outstanding scientist, talented engineer and inventor, professor, corresponding member of the USSR Academy of Sciences Valentin Petrovich Vologdin. He played a special role in development of Russian radio industry and for his great scientific and technical contribution he was awarded the first gold medal of A.S. Popov. He is also the founder of Soviet high-frequency technique school. The laboratory and curriculum of high frequency technique founded by him at the Electro technical Institute (LETI), the laboratory at USSR Academy of Sciences, as well as the institute of high-frequency currents - VNIITVCH, later named after him, for many years were the center for development of high-frequency electrotechnologies and training of high-frequency engineers.

Keywords: radio, high-frequency machine generator, induction heating, high frequency currents, elec-trotechnology

E-mail: freal@mail.ru

Первые машины высокой частоты

После окончания Технологического института в 1907 году Валентин Петрович поступил на завод Глебова инженером, конструктором и технологом, где начал разрабатывать электрические машины повышенной частоты для Российского морского ведомства. Первыми генераторами были машины с частотой 1 кГц и мощностью 200 Вт и 2000 Вт для питания искровых радиостанций [1]. В 1915 году инженер Вологдин построил высокочастотный генератор собственной конструкции 20 кГц, 6 кВт и спроектировал машину на 50 кВт.

В 1918 году В.П. Вологдин был приглашен правительством молодой Советской республики на должность «ученого специалиста» в Нижегородскую радиолабораторию (НРЛ), организуемую для развития радиотелеграфного дела и создания крупных радиостанций [2]. В то время вместе с ним работали, ставшие впоследствии выдающимися учеными М.А. Бонч-Бруевич и А.Ф. Шорин.

Рис. 1. Ученые НРЛ, слева направо: П.Я. Бялович, М.А. Бонч-Бруевич, В.К. Леонтьев, П.А. Остряков, А.Ф. Шорин, В.П. Вологдин

Рис. 2. В. Вологдин у статора своей машины 150 кВт (1923 г.)

ВЧ генератор 150 кВт, 15 кГц работал на Октябрьской радиостанции в Москве. Позднее он был использован для проведения опытных работ по индукционной поверхностной закалке. Одновременно с конструированием машинных ВЧ генераторов В.П. Вологдин работал над созданием высоковольтных выпрямителей для ламповых генераторов. В лаборатории М.А. Бонч-Бруевича создавались генераторные лампы на 5 кВт и более мощные. Становилось понятно, что мотор-генераторы с искровыми передатчиками вскоре не смогут конкурировать с ламповыми генераторами.

В НРЛ Валентин Петрович изобрел и построил несколько типов ртутных выпрямителей. Такие выпрямители в течение многих лет использовались для питания ламповых радиостанций.

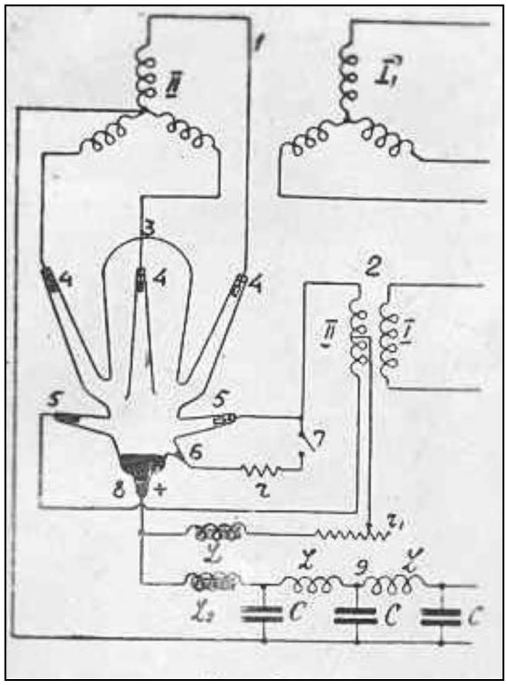


Рис. 3. Схема ртутного выпрямителя

Схема ртутного выпрямителя на напряжение 15 кВ, мощностью 1000 кВт приведена на рис. 3.

Это было большим достижением в радиотехнике того времени. В 1923 году В.П. Вологдин избран профессором Нижегородского университета, а в 1929 году была издана его монография по теории, конструкции и практическому использованию ртутных выпрямителей. Их промышленное производство было начато на заводе «Светлана» в Ленинграде.

Становление Советской радиопромышленности

В 1923 году В.П. Вологдин переходит на пост директора в только что организованном Тресте Заводов Слабых Токов (ТЗСТ) в Ленинграде. Перед ним стояла большая задача восстановления российской радиопромышленности. Он был инициатором создания Центральной радиолаборатории перед которой стояли задачи от проведения фундаментальных исследований до создания новых радиоламп, конденсаторов и других радиокомпонентов. Валентин Петрович установил тесное сотрудничество со многими талантливыми физиками для более глубокого изучения физических явлений в ионных приборах и различных материалах. Он пригласил И.В. Курчатова для изучения явлений в ртутных приборах, а позже для использования сегнето-электриков в конденсаторах и для получения ВЧ колебаний [3]. В 1925 году НРЛ объединилась с ЦРЛ и переехала в Ленинград, став крупнейшим исследовательским центром в СССР. В ней работало много крупных ученых, таких как Л.И. Мандельштам, Н.Д. Папалекси, А.Л. Минц, М.А. Бонч-Бруевич и другие.

В период 1934–1935 годы Вологдин был техническим директором ЦРЛ. Годы работы в ЦРЛ были для Валентина Петровича очень продуктивными – он написал 5 книг, множество статей и получил 45 патентов. Сам Валентин Петрович называл ЦРЛ инкубатором Советской радио науки и промышленности, откуда вышло 14 академиков и 12 член-корреспондентов АН СССР, 100 кандидатов и докторов наук [4].

Технологии индукционного нагрева

Одновременно с работой в ЦРЛ Валентин Петрович преподавал в ЛЭТИ. Он искал новые области применения машинным ВЧ генераторам и скоро индукционный нагрев стал его главной научной целью. В 1935 году он организовал лабораторию Инных Приборов и Высокочастотной Электротехники при ЛЭТИ. Лаборатория была хорошо оборудована мощными мотор-генераторами, идеально подходящими для индукционной плавки.

В этом же году им был получен первый патент на способ индукционной поверхностной закалки, а также на способ питания индукционной бессердечниковой печи.

В лаборатории ЛЭТИ были заложены теоретические основы и разработаны многие технологии индукционного нагрева.

Рис. 4. Среди ближайших сотрудников, слева направо:
И.И. Контор, А.Е. Слухоцкий, В.П. Вологдин, А.А. Фогель

В сотрудничестве с талантливым математиком Г.А. Разоренвым В.П. Вологдин разработал математическую теорию индукционного нагрева. Первая в мире книга по индукционной закалке «Поверхностная закалка индукционным способом» автором которой был В. П. Вологдин вышла в 1939 году.

В начале Великой Отечественной войны по решению Государственного Комитета Обороны ленинградский Кировский завод был эвакуирован на Южный Урал на Челябинский Тракторный завод. Туда же прибыла и лаборатория Вологдина и начались работы по закалке деталей танков токами высокой частоты (ТВЧ).

Внедрение технологии закалки ТВЧ позволило сократить время термообработки деталей с 70 часов до 37 секунд. Только за 1943 год благодаря новому способу закалки ТВЧ завод сэкономил 25 млн. рублей, а страна сэкономила 6 тысяч тонн высоколегированной стали. За годы войны завод выпустил 18000 тяжелых танков КВ и ИС и средних танков Т-34. Это был огромный вклад в дело победы.

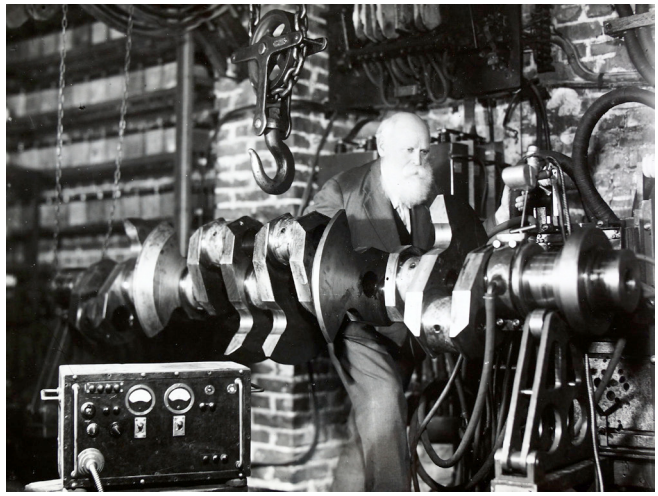


Рис. 5. Закалка коленвала методом ТВЧ

Рис. 6. Сборка танка
на Кировском заводе в Челябинске

За внедрения метода закалки военной техники профессор Вологдин был удостоен ордена Ленина и Сталинской премии и был приглашен на легендарный Парад победы 24 июня 1945 года.

Золотая медаль А.С. Попова была учреждена в 1945 году в честь 50-й годовщины изобретения радио А.С. Поповым как международная награда за выдающийся вклад в области радио. Первая медаль была присуждена В.П. Вологдину.

В послевоенный период промышленность требовала огромных усилий по ее восстановлению на базе новых технологий. Одним из технических центров прикладной науки стал созданный Валентином Петровичем в 1947 году в Ленинграде научно-исследовательский институт промышленного применения токов высокой частоты (ВНИИТВЧ). Области исследований были очень разнообразны:

– индукционный нагрев, пайка, плавка и сварка;
– диэлектрический нагрев;
– литье мощных постоянных магнитов;
– микроволновая техника;
– ВЧ источники питания и другие направления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Профессор Вологдин Валентин Петрович был выдающимся ученым, изобретателем, организатором науки и промышленности.

За большой вклад в науку и технику (радиотехнику, электротехнологии) он был удостоен двух Сталинских премий, награжден орденом Ленина и другими наградами. Он автор 81 патента на изобретения, 7 книг и множества статей и докладов.

Оценка заслуг В.П. Вологдина академиком А.И. Бергом: «... в результате работ Вологдина и его школы выросла новая отрасль промышленности – Высокочастотная промышленная электроника. Это дальнейшее развитие идей А.С. Попова по использованию высокочастотных токов и электромагнитных волн для практических целей».

ЛИТЕРАТУРА

1. Ред. Вологдин В.В. Воспоминания Валентина Петровича Вологдина – Санкт-Петербург: Изд. ООО «НПФ «ФРЕАЛ и Ко». – 2020. – С. 450.
2. Батаков В.Е., Ухин В.А. Говорит город Горький. – Горький: Волгго-Вятское кн. изд-во. – 1978. – С. 150.
3. Nemkov V.S. Role of prof. V.P. Vologdin and his School in Radio and Electrotechnology. Saint Petersburg: IEEE EUROCON. – 2009. – PP. 46–53. (in English).
4. Рогинский В.Ю. Валентин Петрович Вологдин – Ленинград: «Наука». – 1981. – С. 216.

REFERENCES

1. Edited by Vologdin V.V. Memories of Valentin Petrovich Vologdin - St. Petersburg: Ed. "FREAL Co. Ltd.". – 2020. – PP. 450. (in Russian).
2. Batakov V.E., Ukhin V.A. Speaks the city of Gorky. - Gorky: Volga-Vyatka Publishing House. – 1978. – P. 150. (in Russian).
3. Nemkov V.S. Role of prof. V.P. Vologdin and his School in Radio and Electrotechnology. Saint Petersburg: IEEE EUROCON. – 2009. – PP. 46–53. (in English).
4. Roginsky V.Yu. Valentin Petrovich Vologdin - Leningrad: "Science". – 1981. – P. 216. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 26.01.2021 г.

УДК 621.365

ИСТОРИЯ И РАЗВИТИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

[1]В.Б. Демидович, [2]А.И. Михлюк, [2]И.И. Вегера

[1]Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2]Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

История промышленного применения явления нагрева проводящих материалов индуцированными токами насчитывает более 100 лет. Рассмотрены основные этапы развития и становления технологий и оборудования индукционного нагрева, как на территории постсоветского пространства, так и за рубежом. Перечислены основные направления и школы индукционных технологий и их наиболее ярких представителей. Дано краткое описание возникновения и развития индукционного нагрева в Республике Беларусь.

Ключевые слова: электромагнитная индукция, электротехника, индукционный нагрев, промышленные технологии

HISTORY AND DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL INDUCTION HEATING TECHNOLOGIES

[1]V.B. Demidovich, [2]A.I. Mihlyuk, [2]I.I. Vegera

[1]LLC “Russian Technologies of Induction Heating”
Saint Petersburg, Russian Federation
[2]Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

The history of industrial use heating phenomenon induced currents conductive material has more than 100 years. The main stages of induction heating technologies and equipment development and formation, both on the territory of the post-Soviet Union space and abroad, were considered. The main directions and schools of induction technologies and its most prominent representatives are listed. A brief description of the origin and development of induction heating in the Republic of Belarus is given.

Keywords: electromagnetic induction, electrical engineering, induction heating, industrial technology

E-mail: mihlyk@phti.by

Введение

Под термином «индукционный нагрев» (ИН) понимается нагрев проводящих тел за счёт индуцированных в них токов. Базируется это явление на двух фундаментальных законах: закон электромагнитной индукции и закон выделения теплоты в проводящем теле при прохождении через него электрического тока.

Закон электромагнитной индукции был экспериментально открыт Майклом Фарадеем (1791–1867) в 1831 году. Индуцированные токи возникают в проводящем контуре при изменении связанного с ним магнитного поля. Возникновение индуцированных токов в проводящем теле возможно как при взаимном перемещении источника магнитного поля и проводящего тела или только при изменении во времени магнитного поля. Устройство, обеспечивающее связь переменного электромагнитного поля с телом и генерацию вихревых токов, получило название «индуктор».

Математически закон электромагнитной индукции был сформулирован Джеймсом Максвеллом (1831–1879) и позднее доведен до нынешней записи «уравнений Максвелла» Рудольфом Герцем (1857–1894) и О́ливером Хе́висайдом (1850–1925).

В 1840 году Джеймс Джоуль (1818–1889) сформулировал закон, по которому при прохождении тока по проводящему телу выделяется теплота, пропорциональная электрическому сопротивлению и квадрату интенсивности тока. Независимо от него Эмилий Христианович Ленц (1804–1865) открыл этот закон. Поэтому часто он называется закон Джоуля-Ленца.

Закон магнитной индукции открыл широчайшие возможности для создания электромашиностроения, в развитии которого выдающаяся роль сыграли Никола Тесла (1856–1943), Вернер Сименс (1816–1892), Чарльз Штейнмец (1865–1923), Михаи́л О́сипович Доли́во-Добро́льский (1861–1919) и другие.

При разработке генераторов и двигателей, трансформаторов и других электромеханических устройств вихревые токи рассматривались как паразитные и принимались меры для их подавления. Только позже нагрев индуцированным токами стал использоваться для технологических целей нагрева и плавки.

Индукционный нагрев за рубежом

Первоначально индукционный нагрев нашел успешное применение в металлургии при плавке металлов. В 1887 г. Себастьян Ферранти предложил первую конструкцию индукционной печи. Плавка осуществлялась в ванне в виде квадратного кольца, образующего вторичную обмотку трансформатора, питающегося током промышленной частоты. Первую успешно работающую печь для плавки стали, после ряда усовершенствований, построил в Швеции F.A. Kjellin. Но она по-прежнему представляла однофазный трансформатор с одновитковой вторичной обмоткой, где происходило расплавление.

Переход от канальных печей к современным тигельным печам длился с 1900 до 1940 гг. В начале получают развитие канальные печи с закрытым каналом. Увеличение мощности в канальных печах привело к появлению эффекта бурного перемешивания, т.к. сочетания низкой частоты и больших токов содействовало росту электродинамических усилий и появлению пинч эффекта. Эти явления были изучены учеными Франции и США. Решение проблем нашел J. Wyatt, работающий в Ajax Metal Corporation, который в 1915 году предложил заостренный в виде буквы «V» канал, расположенный ниже пода печи. Это сделало возможным борьбу против пинч эффекта за счет гидростатического давления расплава. Надо заметить что печи, предложенные Kjellin, явились базой для последующего усовершенствования канальных печей. Однако,

несмотря на внедрение канальных печей, процесс требовал применения новых по тому времени типов печей. Ими оказались тигельные высокочастотные печи.

В США Эдвин Нортруп (1866–1940), профессор физики Принстонского Университета в 1916 г. спроектировал и запустил в Палмеровской лаборатории первую высокочастотную тигельную печь, получающую питание от искрового генератора 20 КГц. Нортруп публикует работы посвященные решению проблем индукционного нагрева на высоких частотах в 1919–1921 гг., и особенно обращает внимание на бессердечниковые индукционные печи и излагает основы теории и применения метода индукционных нагревательных систем. Следует отметить, что применение искровых генераторов для плавки металла не получило распространения из-за невысокой мощности генераторов.

В Европе первые высокочастотные плавильные системы, снабженные вращающимися машинными генераторами появились в 1925 г. в Институте Кайзера Вильгельма в Дюссельдорфе, Германия (KWI). В 1926 г. появилась первая сталеплавильная тигельная печь на 300 кг, питаемая от машинного генератора 2000 Гц и 150 кВА на сталеплавильном заводе Dorrenberg Company Runderoth. В тридцатых годах признание преимущества применения металлургических печей индукционного типа стало очевидным. Большие работы были развернуты на фирме ASEA в Швеции в США на фирме A.E.C. и Германии в компании Otto Junker и Brown Boveri.

Итак, в середине 30 годов теоретические основы электромагнитных индукционных систем, подкрепленные экспериментами, сформировали основные знания в этой области. Позже увеличиваются размеры плавильных и нагревательных устройств, совершенствуются способы футеровки, увеличивается мощность в единице объема и емкость печей. Усовершенствуются методы расчета печей, которые позволили говорить об индустрии печестроения. Были сформулированы фундаментальные принципы работы, конструирования и эксплуатации.

Дальнейшее развитие индукционной плавки связано с увеличением мощности плавильных печей, применением двух частот для плавки и поддержания расплавленного металла, применением тиристорных преобразователей. Пионерами и основными разработчиками в этой области стали фирмы ASEA (Швеция), A.E.C. (США) и Otto Junker (Германия).

Одновременно с работами по проектированию печей для плавки металла, начиная с 1900 г. проводятся интенсивные исследования в области применения электронагрева для термообработки стали. Актуально в то время стоял вопрос упрочнения автомобильных деталей, в первую очередь коленчатых валов, их упрочнение проводилось термохимическим способом, что часто оказывалось не совсем эффективным. Идея применения электронагрева высказывалась неоднократно, но успеха не имела из-за отсутствия в первую очередь источников тока высокой частоты и необходимой теории. В США интенсивно работал в 1920 г. Эдвин Нортруп над проблемой применения термообработки стальных изделий в машиностроении. В том же 1920 г. он получил патент на использование так называемого фокус – индуктора. Интенсивное развитие автомобилестроения в США и Германии привело к необходимости новых методов упрочнения коленчатых и распределительных валов.

В 30 годы 20 столетия в США (ТОККО) Ohio Crankshaft Corporation сконцентрировало свои усилия на проблеме технологии в.ч. индукционной закалки подшипников и шейки коленчатых валов и его щек.

В настоящее время индукционная термообработка нашла широчайшее применение в промышленности многих стран. Следует отметить успешную работу в этом направлении фирм Германии, США, Чехии, Италии, Испании и др.

История индукционного нагрева в России и СССР

Можно сказать, что электрические цепи и электромагнитные поля в конце XIX в. стали предметом пристального внимания русских инженеров. Особенно большим событием в жизни России явилось изобретение радио А.С. Поповым, это изобретение произошло совершенно независимо от аналогичного предложения Маркони. Вокруг изобретения А.С. Попова образовалась группа ученых энтузиастов, среди них особенно выделялся молодой инженер В.П. Вологдин. Именно использование электромагнитного излучения для передачи информации послужило мощным толчком для прикладных направлений в науке и производстве. Вологдин окончил очень престижный в это время Технологический институт в Петербурге по направлению механические системы, но еще в студенческие годы увлекся электротехникой и даже вместе с профессором Боргманом (автор известных во всем мире учебников по физике) создал в Технологическом институте электротехнологическую лабораторию.

В России уже в 1900 г. были сконструированы линии беспроволочного телеграфа между островами Готланд и Кутсоа в Балтийском море. Создание этой станции позволило эффективно спасти броненосец «Генерал-адмирал Апраксин», а затем ледокол «Ермак» спас финских рыбаков, унесенных на льдине, а радиотелеграф помог разыскать их. Все эти события привели к тому, что В.П. Вологдин получил задание на оснащение русского флота радиопередающими устройствами. Именно в эти годы В.П. Вологдин сконструировал серийный машинный генератор 1000 Гц 2кВт для питания радиостанций флота. Конструкция индукторного генератора с безобмоточным ротором и разнесенными полюсами оказалась самой надежной в этом классе электрических машин. В дальнейшем В.П. Вологдин сосредоточил свои работы в области радиотехники. Он сконструировал серию умножителей частоты, целую серию электромашинных генераторов высокой частоты. К 1913 г. В.П. Вологдин уже запустил производство генераторов с частотой до 20 кГц и мощностью до 10 кВт. Интересно, что работа В.П. Вологдина была высоко оценена известным американским автором электромашинных генераторов Александерсеном, который признал, что генераторы В.П. Вологдина лучше предложенных им. Широкую известность получила деятельность после революции В.П. Вологдина в Нижегородской лаборатории, этой лаборатории был поручен весь цикл работ в области радиопередающих устройств. Дальнейшие работы привели Вологдина к комплексным системам электромашинный генератор – умножитель частоты, что позволило получить частоты до 120 кГц. Будучи энтузиастом электромашинной техники, В.П. Вологдин также внимательно следил за развитием электронных ламп. Расцвет электронной техники привел В.П. Вологдина к работе в области выпрямителей. До сих пор во всех монографиях мира приводится каскадная схема выпрямления В.П. Вологдина. Тем не менее, В.П. Вологдин ищет новые пути применения высоких частот, генерируемых машинными генераторами. В период с 1925–1935 г. В.П. Вологдин проводит активные работы в области индукционных печей для плавки цветных металлов. И когда на главном автомобильном гиганте СССР (ЗИС) встал вопрос о термообработке шеек коленчатого вала и кулачкового распределительного вала Вологдин предложил применить индукционный нагрев.

Исторический прием в 1936 г. В.П. Вологдина у главы тяжелой промышленности г. Орджоникидзе привел к необыкновенному размаху работ в области поверхностной индукционной закалки токами высокой частоты. В 1935 г. деятельность В.П. Вологдина прочно связывается с Электротехническим институтом в Ленинграде. С этих лет в ЛЭТИ возникает школа высокочастотной электротермии, функционирующая до сих пор. Работы в области воздействия высокочастотных электромагнитных полей на металлы и диэлектрики, начиная с середины 30-х годов, распространились на многие

заводы. В первую очередь это были автомобильные, авиационные, судостроительные и военные заводы. Большую роль сыграла монография В.П. Вологдина, вышедшая в 1939 г. «Поверхностная закалка индукционным методом». Заметную роль сыграли заводские лаборатории, в первую очередь лаборатория ЗИЛ (руководитель профессор К.З. Шепеляковский), предложивший использовать специальные сплавы с регламентируемой прокаливаемостью. Была также создана лаборатория ТВЧ на Горьковском автомобильном заводе (инженеры Натанзон и Положинцев), одновременно с вопросами индукционного нагрева занялись профессор Г.И. Бабат (Москва) известный своими обширными изобретениями и М.Г. Лозинский, работавщий в институте Машиноведения АН СССР.

В годы войны 1941–45 гг. расширился круг людей, занимающихся высокочастотной закалкой. Этому способствовало перебазирование ведущих заводов центра СССР на восток и слияние их с уже существующими на этих местах заводами. Ярким примером является работа эвакуированной из Ленинграда лаборатории В.П. Вологдина в Челябинск, где работали коллективы Челябинского тракторного, Кировского заводов. Десятки танков были выпущены только в Челябинске с применением термообработки т.в.ч. деталей танка. Аналогичная картина была на авиационных заводах (Саратов, Ташкент и Омск). В 1943 г. вышло постановление о присуждении престижной Сталинской премии в области науки и техники в СССР. Эта высокая премия была вручена В.П. Вологдину, Г.И. Бабату (1911–1961 гг.), М.Г. Лозинскому (1909–1970 гг.) и инженеру Б.Н. Романову. Необходимо отметить, что и профессор Бабат Г.И. и профессор Лозинский М.Г. явились авторами крупных монографий посвященных теоретическим вопросам индукционного нагрева. Это «Индукционный нагрев и его промышленное применение» Москва 1965 г. автор Бабат Г.И., «Промышленное применение индукционного нагрева» Москва 1957 г. автор Лозинский М.Г., посвященная памяти В.П. Вологдина. Вместе с этим упомянем монографию В.П. Вологдина «Поверхностная индукционная закалка» 1947 г. Рукопись этой книги была во время войны в Минске захвачена фашистскими войсками в 1941 г. и была рассмотрена в управлении Геринга с резолюцией последнего о срочном переводе. После войны лаборатория ТВЧ возвращается в Ленинград в Ленинградский Электротехнический Институт им. В.И. Ульянова (Ленина). Все усилия страны были направлены на возрождении разрушенного войной народного хозяйства.

Рис. 1. Бюст В.П. Вологдина перед зданием ВНИИТВЧ

Именно в эти годы В.П. Вологдин добивается преобразования лаборатории ЛЭТИ в самостоятельный институт. Приказом И.В. Сталина в 1947 г. был открыт всесоюзный научно-исследовательский институт токов высокой частоты (ВНИИТВЧ), носящий после смерти его создателя его имя (рис. 1). В эти же годы В.П. Вологдин получает первым золотую медаль имени А.С. Попова за заслуги в области радиотехники.

Вместе с ним этой награды были удостоены академик Берг А.И академик А.П. Минц профессор Б.А. Введенский. В 1947 г. в ЛЭТИ была создана кафедра высокочастотной техники, выпустившая за все годы своего существова-

ния более 1500 инженеров в области высокочастотной электротермии, 20 докторов и более 150 кандидатов технических наук.

Отдельно следует отметить работы уроженца Беларуси (г. Волковыск) д.т.н. А.Е. Слухоцкого в развитии теории индукционного нагрева. В 1929 г. он поступил в Ленинградский Электротехнический институт (ЛЭТИ), который окончил с отличием в 1935 г. В 1937 г., после двух лет работы инженером-исследователем в НИИ, вернулся в родной ВУЗ и стал работать в лаборатории профессора В.П. Вологдина. После тяжелой блокадной зимы 1941–1942 гг. в марте 1942 г. был эвакуирован по «Дороге жизни» сначала в Ессентуки, затем в Ташкент и, наконец, в Челябинск, где с лета 1941 г. базировалась лаборатория профессора В.П. Вологдина. В Челябинске приступил к работе по высокочастотной закалке танковых деталей. В 1944 г. Александр Евгеньевич Слухоцкий откомандирован в Москву на автозавод им. Лихачева. В том же году награжден орденом Красной Звезды за участие в разработке метода закалки при индукционном нагреве. При первой возможности вернулся в Ленинград и возобновил работу в лаборатории профессора В.П. Вологдина. Начиная с 1945 г. и до конца своей трудовой биографии в 1991 г., Александр Евгеньевич непрерывно вел научную и преподавательскую работу в стенах родного ВУЗа. Защитил кандидатскую (1947 г.) и докторскую (1962 г.) диссертации, с 1953 по 1982 гг. возглавлял кафедру «Электротермические установки (ЭТУ)» ЛЭТИ, стал создателем теории индукционного нагрева. Его монографии «Индукторы для индукционного нагрева» 1974 г. и «Установки индукционного нагрева» 1981 г. являлись настольными книгами для нескольких поколений как для инженеров на производстве, так и для исследователей в НИИ.

Развитие индукционного нагрева в Республике Беларусь

В БССР (сегодня Республика Беларусь) индукционная термообработка стала широко применяться в промышленности со второй половины 20 столетия, когда закладывались основы современного машиностроения республики. Основным направлением в работе стало технологическое – разработка и освоение технологических процессов и оборудования с использованием серийно выпускаемых в то время генераторов.

Первые ламповые и машинные генераторы выпуска 1955–1965 годов появляются в единичных экземплярах на предприятиях республики, причем используются они и до настоящего времени. Начиная с 70-х годов происходит интенсивный рост использования индукционного нагрева, что приводит к увеличению общего количества генераторов (рис. 2).

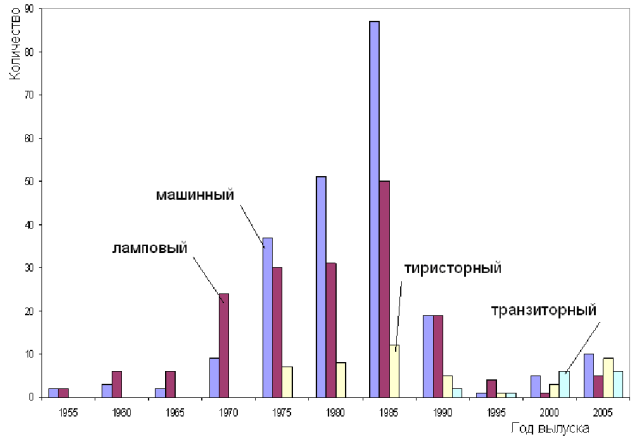


Рис. 2. Количественный состав преобразователей частоты на промышленных предприятиях РБ по годам выпуска

В 80-х годах развитие индукционного и ТВЧ нагрева в Беларуси достигает своего пика, большинство оборудования используемого в настоящий момент на предприятиях выпущено именном в этот период. Следует отметить, что в данный период впервые начинается использование тиристорных преобразователей. Это связано с запуском машинного зала на Борисовском заводе «Автогидроусилитель» укомплектованного тиристорными преобразователями серии ТПЧ производства Estel Elektro (Эстония, г. Таллин). В 90-е годы в связи с кризисом в экономике наблюдается резкое снижение закупок индукционного оборудования, однако следует отметить, что именно в этот период на Беларусский металлургический завод появляются первые транзисторные преобразователи частоты импортного производства.

Начиная с 2005 года прослеживается положительная тенденция по увеличению закупок нового оборудования причем наряду с машинными и ламповыми генераторами активно закупаются тиристорные и транзисторные преобразователи.

Освоение этого вида термической обработки начиналось на флагманах нашей промышленности: Минском тракторном и Минском автомобильном заводах. На Минском тракторном заводе у истоков промышленного освоения ТВЧ стояли Космович Л.С., Баранов В.С., Прицев В.И. Так, на МТЗ создан и внедрен ряд оригинальных станков и технологий обработки деталей при индукционном нагреве. Среди них специализированные станки для непрерывно-последовательной закалки, контурная закалка шестерен с подогревом в печи, последовательная закалка полуосей с импульсно-периодическим охлаждением, пайка масляного радиатора и целый ряд автоматизированных станков для закалки деталей тракторов. В 2000 году на МТЗ эксплуатировались 94 машинных преобразователя общей мощностью 33250 кВт и 31 ламповый генератор общей мощностью 1955 кВт.

На Минском автозаводе лаборатория электронагрева была создана в 1958 году, хотя первые установки ТВЧ были освоены на заводе в конце 40-х годов. Освоение первых станков и закалку деталей выполнили энтузиасты – Михайловский В.И., Андрющенко Н.Ф., Попова М.А., Волчек В.Ф. В 1969 году уже 250 наименований деталей подвергались закалке с индукционного нагрева, а в 1982 году количество деталей, подвергаемых индукционному нагреву на МАЗе, достигло 400, мощность высокочастотного оборудования выросла до 10000 кВт. Были успешно освоены технологии закалки внутренних зубчатых поверхностей, нагрева заготовок малолистовой рессоры, объёмно-поверхностной закалки сталей пониженной прокаливаемости и другие.

Успешные работы велись в этом направлении на промышленных предприятиях республики в Гомеле, Минске, Борисове, Кобрине, Жодине и ряде других городов.

Наряду с промышленностью в области индукционного нагрева активно работают научные организации республики в первую очередь Физико-технический институту Академии наук.

Так в лаборатории термокинетики (организована в 1967 г., в ней работали академики С.А. Астапчик и А.И. Гордиенко, член-корреспондент М.Н. Бодяко) в 1970–1980-х гг. проведены исследования процессов электротермической обработки и термокинетики рекристаллизационных процессов, создана теория фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах при быстром электронагреве. На их основе разработаны новые технологические процессы объемного и поверхностного упрочнения при скоростной электротермической обработке полуфабрикатов и изделий, обеспечивающие повышение механических, технологических и эксплуатационных свойств. Значительный вклад в развитие нового направления внесли к.т.н. А.С. Дымовский, к.т.н. В.В. Ивашко, к.т.н. С.М. Кашулин, к.т.н. В.В. Крылов-Олиференко, д.т.н. А.А. Шипко. В 1986 г. за разработку и промышленное внедрение технологических процессов

скоростного термического упрочнения сталей и сплавов академику С.А. Астапчику в составе коллектива авторов была присуждена Государственная премия СССР. Дальнейшие работы в этой области были связаны с исследованиями структуры, свойств, термокинетики процессов рекристаллизации и разрушения высокопрочных металлических и композиционных материалов для получения материалов с градиентной структурой, включая броневые и металлокордовые материалы. В 1975–1983 гг. совместно с НИИ стали (г. Москва) были разработаны технологические процессы объемного и поверхностного электротермического упрочнения броневых листовых элементов из высокопрочных титановых сплавов для средств индивидуальной защиты. Данная разработка в 1988 году была удостоена Государственной премии БССР.

Дальнейшее развитие электронагрева в институте связано с лаборатории технологий и оборудования индукционного нагрева (к.т.н. И.И. Вегера). Физико-технический институт являлась головной организацией по научно-техническому сопровождению Программы технического переоснащения и модернизации литейных, термических гальванических и других энергоемких производств в Республике Беларусь на 2010–2015 годы, утвержденной Советом Министров Республики Беларусь (в части предприятий, использующих индукционное оборудование). При финансовой поддержке государства в 2013–2015 г. в институте создано современное сертифицированное производство преобразователей и индукционного оборудования для самых различных электро-технологий в промышленности. Начиная с 2014 г. начались поставки оборудования на крупные предприятия Беларуси и России (Минский автомобильный завод, БелАЗ, Могилевлифтмаш, Амкадор, Холдинг САЛЕО, ОАО «Бобруйскагромаш», Минский завод колесных тягачей, Минский подшипниковый завод, УП НИВА и др.).

В настоящее время индукционный нагрев по прежнему занимает значительное место на промышленных предприятиях Республики Беларусь. Чаще всего его применяют при проведении операций штамповки, закалки, плавки и пайки (рис. 3).

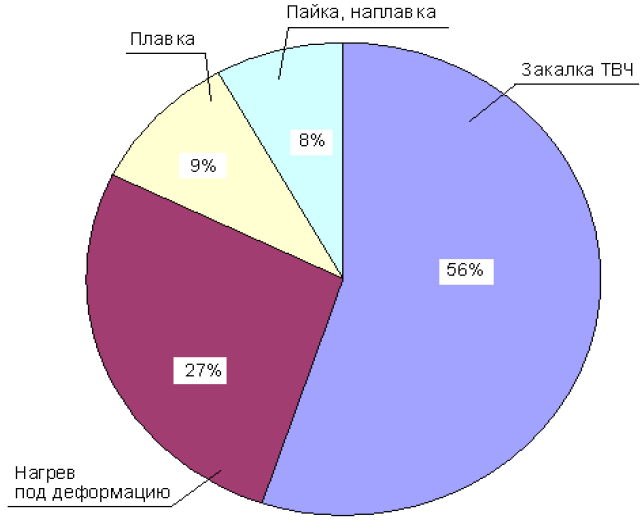


Рис. 3. Процентное соотношение использования индукционного нагрева для различных операций на промышленных предприятиях РБ

Лидерами по использованию индукционного оборудования по прежнему являются крупные предприятия такие как МТЗ, МАЗ, (г. Минск), «Автогидроусилитель» (г. Борисов), ОАО «Белкард» (г. Гродно), ПО «Гомсельмаш (г. Гомель). На данных предприятиях сосредоточена половина промышленного индукционного оборудования РБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Индукционный нагрев как физическое явление за более чем столетнюю историю своего применения прошел несколько стадий развития: от простейших явлений нагрева металла в переменном электромагнитном поле до сложнейших технологических процессов изменения структуры свойств и фазового состояния различных металлов и материалов. В настоящее время это физическое явление реализовано в широкой гамме технологий и разнообразных типах оборудования. Сотни различных фирм и организаций являются разработчиками данных прикладных технологий и оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Muehlbauer A.: History of Induction Heating and Melting. (2008), Vulkan Verlag.
2. Рогинский В.Ю. Валентин Петрович Вологдин – Ленинград: наука. – 1981. – С. 216.
3. Вологдин В. П. Поверхностная индукционная закалка. – М.: Оборонгиз. – 1947.
4. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. – М.: Госэнергоиздат. – 1946.
5. Родигин Н.М. Индукционный нагрев стальных изделий. – М.: Металлургиздат. – 1950.
6. Лозинский М Г. Промышленное применение индукционного нагрева. – М.: Академия наук СССР. – 1958.
7. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия,. – 1974.
8. Установки индукционного нагрева/ А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунер – Л.: Энергоиздат. – 1981.
9. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат. – 1988. – 271 с.
10. Гордиенко А.И., Гурченко П.С., Михлюк А.И., Вегера И.И. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева. г Минск. Изд. Беларуская навука. – 2009.
11. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Компьютерное моделирование устройств индукционного нагрева. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – 160 с.
12. Индукционная термическая обработка в машиностроении: анализ, проблемы, перспективы развития в РБ. Михлюк А.И., Вегера И.И., Индукционный нагрев №1 2014 г. – С. 16–24.
13. Астапчик С.А., Гурченко П.С., Шипко А.А. История и направления развития исследований и технологий индукционного нагрева в Беларуси. г Минск. Изд. Беларуская навука. – 2015.

REFERENCES

1. A. Muehlbauer: History of Induction Heating and Melting. (2008), Vulkan Verlag.
2. Roginskiy V.YU. Valentin Petrovich Vologdin – Leningrad: nauka. – 1981. – P. 216.
3. Vologdin V. P. Poverkhnostnaya induktsionnaya zakalka. – M.: Oborongiz. – 1947.
4. Babat G.I. Induktsionnyy nagrev metallov i yego promyshlennoye primeneniye. – M.: Gosenergoizdat. – 1946.
5. Rodigin N.M. Induktsionnyy nagrev stal'nykh izdeliy. – M.: Metallurgizdat. – 1950.
6. Lozinskiy M.G. Promyshlennoye primeneniye induktsionnogo nagreva. – M.: Akademiya nauk SSSR. – 1958.

7. Slukhotskiy A.Ye., Ryskin S.Ye. Induktory dlya induktsionnogo nagreva. – L.: Energiya. – 1974.
8. Ustanovki induktsionnogo nagreva/ A.Ye. Slukhotskiy, V.S. Nemkov, N.A. Pavlov, A.V. Bamuner – L.: Energoizdat. – 1981.
9. Nemkov V.S., Demidovich V.B. Teoriya i raschet ustroystv induktsionnogo nagreva. – L.: Energoatomizdat. – 1988. – 271 p.
10. Gordiyenko A.I., Gurchenko P.S., Mikhlyuk A.I., Vegera I.I. Obrabotka izdeliy mashinostroyeniya s primeneniyem induktsionnogo nagreva. g Minsk. Izd. Belaruskaya navuka. – 2009.
11. Demidovich V.B., Chmilenko F.V. Komp'yuternoye modelirovaniye ustroystv induktsionnogo nagreva. – SPb.: Izd-vo SPbGETU «LETI». – 2013. 160 p.
12. Induktsionnaya termicheskaya obrabotka v mashinostroyenii: analiz, problemy, perspektivy razvitiya v RB. Mikhlyuk A.I., Vegera I.I., Induktsionnyy nagrev N°1 2014 g. – P. 16–24.
13. Astapchik S.A., Gurchenko P.S., Shipko A.A. Istoriya i napravleniya razvitiya issledovaniy i tekhnologiy induktsionnogo nagreva v Belarusi. g Minsk. Izd. Belaruskaya navuka. – 2015.

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 01.02.2021 г.

УДК 621.365

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА

[1]В.Б. Демидович, [2]А.И. Михлюк, [2]И.И. Вегера

[1]ООО «Русские технологии индукционного нагрева»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2]Физико-технический институт НАН Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

История промышленного применения нагрева проводящих тел в переменном электромагнитном поле насчитывает более 100 лет. Рассмотрены основные этапы развития и становления технологий и оборудования индукционного нагрева за последние 30 лет на территории постсоветского пространства. Описаны требования, предъявляемые к организациям, работающим в области технологий и оборудования индукционного нагрева. Показан опыт «ФТИ НАН Беларуси» в области промышленных индукционных технологий.

Ключевые слова: индукционный нагрев, оборудование и технология индукционной термообработки, генератор высокой частоты, системы управления индукционным оборудованием

STATE AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF INDUCTION HEATING IN THE INDUSTRIAL COMPLEX OF THE CIS

[1]V.B. Demidovich, [2]A.I. Mihlyuk, [2]I.I. Vegera

[1]LLC “Russian Technologies of Induction Heating”,
Saint Petersburg, Russian Federation
[2]Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

The history of industrial application of heating conductive bodies in an alternating electromagnetic field is more than 100 years old. The main development stages and technologies formation and equipment for induction heating over the past 30 years on the territory of the post-Soviet space are considered. The requirements for organizations working in the field of technologies and equipment for induction heating are described. The experience of the State Scientific Institution «PTI NAS of Belarus» in the field of industrial induction technologies is shown.

Keywords: induction heating, equipment and technology of induction heat treatment, high frequency generator, induction equipment control systems

E-mail: mihluyk@gmail.com

Введение

Технологии обработки материалов в переменном электромагнитном поле и оборудование для его осуществления составляют важную и значительную часть технологий и оборудования, которые применяются в настоящее время в промышленном комплексе (рис. 1).

Рис. 1. Диаграмма областей применения токов высокой частоты в современной промышленности

Наличие таких технологий, возможностей их разработки и освоения в промышленном комплексе во многом определяет научный и технический уровень инженерного персонала в государстве.

Состояние и уровень развития индукционного нагрева на момент развала СССР

Можно с уверенностью сказать, что на момент развала Советского союза в 1991 году состояние и уровень индукционного нагрева (ИН) находился на высоком научно-технологическом уровне. Это утверждение основано на следующем:

1. Имелся высокоразвитый теоретический и научно-технический задел в виде выполненных научных исследований, изданных большими тиражами авторитетных монографий, активно действующих научно-исследовательских институтов. Известно,

что в Ленинграде активно работал Всероссийский научно-исследовательский институт токов высокой частоты (ВНИИТВЧ), созданный одним из мировых основателей данного направления в науке и промышленности Вологдиным В.П. [1]. Институт был ведущей в СССР научной организацией в этом направлении, определявшей направления научно-технической политики в области ИН. Регулярно проводились Всесоюзные конференции по применению токов высокой частоты в промышленности и издавались труды ВНИИТВЧ. Вышло несколько изданий Библиотечки высокочастотника-термиста. Имелись и активно развивались другие научные центры, активно работавшие с ИН в таких городах как Москва (ВНИИЭТО), Горький (ныне Нижний Новгород), Свердловск (ныне Екатеринбург), Куйбышеве (Самаре), Минске и др.

2. Работали учебные заведения, где профессорско-преподавательскими коллективами не только велась подготовка специалистов ИН, но и проводились широкие исследования. Это в первую очередь Ленинградский электротехнический институт, кафедра электротермических установок в МЭИ (г. Москва), Уральский Политехнический Институт (г. Свердловск), Самарский Технический Университет, Новосибирский Технический Университет, Красноярский Технический Университет, и др.

Уровень подготовки кадров в вышеуказанных институтах был высокий и позволял выпускать высококвалифицированных специалистов как для научных учреждений, так и для промышленных предприятий: только кафедра высокочастотной техники ЛЭТИ выпустила за годы своего существования более 1500 инженеров в данной области. Там же было подготовлено более 20 докторов и 150 кандидатов технических наук.

При этом особенностями подготовки специалистов в области ИН являлись глубокие теоретические знания как физических основ данного электрофизического явления, так и процессов физики металлов, металлографии и термообработки. Это позволяло им в промышленном секторе успешно осваивать и эксплуатировать технологии и оборудование ИН.

3. На многих ведущих промышленных предприятиях работали специализированные подразделения (лаборатории ТВЧ, отделы электронагрева и др.), которые активно как разрабатывали собственные, так и внедряли известные технологии и ИН оборудование. Технический уровень работавших там специалистов позволял решать самые разнообразные и сложные задачи. Например, разработки в области индукционного нагрева Шепеляковского К.З. на ЗИЛе (г. Москва) или Натанзона на ГАЗе обладали мировой новизной и являлись примерами для других предприятий. В БССР успешно работали Космович Л.Н на МТЗ и Гурчено П.С. на МАЗе. На Куйбышевском металлургическом заводе (КМЗ) начинали свою научную деятельность доктора наук, профессоры Рапопорт Э.Я., Зимин Л.С., Лившиц М.Ю.

4. Успешно работали различные заводы: серийно выпускались закалочные трансформаторы (Армения), машинные, ламповые и тиристорные преобразователи (РФ, Эстония, Украина) согласующие конденсаторы (РФ, Казахстан), высокочастотные приборы и комплектующие. В г. Новозыбкове работал завод по выпуску индукционного промышленного оборудования.

Отличительной особенностью выпускаемого оборудования и комплектующих являлась их универсальность и способность к перенастройке. Это, с одной стороны позволяло (при наличии квалифицированных кадров на местах) продлять сроки эксплуатации и расширять области применения имеющегося оборудования, а с другой стороны эксплуатировать физически и морально устаревшее оборудование. Типичным примером вышесказанного является применение машинных преобразователей частоты, которые до настоящего времени встречаются в промышленности. В то время как бурное развитие силовой электроники на Западе привело в 70-х годах 20-го столетия

к созданию и массовому освоению полупроводниковых (сначала тиристорных, а затем транзисторных) энергоэффективных преобразователей, на промышленных предприятиях СССР машинные преобразователи, благодаря их простоте и надежности, продолжали эксплуатироваться.

5. Со стороны государства постоянно осуществлялась поддержка и поощрение научных исследований и передовых разработок в области ИН. В 1977 году в Москве прошел Всемирный электротехнический конгресс (ВЭЛК).

Вместе с тем, несмотря на значительные успехи специалистов Советского Союза в области ИН, к 90-ым годам прошлого века проявились следующие негативные тенденции, которые можно объяснить некоторой оторванностью и изолированностью в своей работе от специалистов ведущих мировых стран, прежде всего США, ФРГ, Франции и др. – это закрытость границ, ограниченность контактов, отсутствие доступа к актуальной технической информации, что способствовало отставанию:

– в разработке и создании современных полупроводниковых преобразователей частоты и прежде всего транзисторных преобразователей, которые отличались высоким КПД, малыми габаритами и весом, возможностью автоматически менять частоту в широком диапазоне в зависимости от конструкции индуктора и нагрузки;

– в разработке персональных компьютеров и программ моделирования и расчета процессов ИН. Имеющиеся собственные разработки были немногочисленны и требовали высокой квалификации пользователей [2]. Так, например разработанная совместно ВИНИИТВЧ И ЛЭТИ автоматизированная система исследования и проектирования индукционных нагревателей была реализована в конце 1980-х на операционную систему СВМ ЕС ЭВМ и была доступна не всем даже крупным организациям и предприятиям. Это затягивало сроки проектирования, требовало проведения дополнительных экспериментов по выбору режимов и параметров технологических процессов;

– в области разработки и создании современных систем управления и контроля, основанных на базе промышленных контроллеров и компьютеров. Имеющиеся разработки в этой сфере в основном были построены на релейных схемах и были громоздкими и ненадежными.

А также отсутствие опыта работы в условиях рыночной экономики и жесткой конкуренции со стороны других разработчиков и производителей оборудования для промышленных технологий ИН.

Процессы, происходившие с техникой ИН за последние 30 лет

С момента развала Советского Союза в 1991 году ИН прошел сложный и во многом неоднозначный путь, который можно характеризовать следующими особенностями:

– резко сократилось количество квалифицированных специалистов как в научной сфере, так и на промышленных предприятиях, работающих в данной области. Это обусловлено тем, что в научной сфере произошел отток перспективной молодежи, как в другие сферы, так и за рубеж. Кроме того снижение объемов, а зачастую и отсутствие государственной финансовой поддержки науки в области ИН привело к сокращению количества работающих в этом направлении. Типичным примером в данном случае является судьба ВНИИТВЧ, который в настоящее время прекратил свое существование. На промышленных предприятиях финансовые трудности, работа в условиях рыночной экономики вынудили их уменьшить или полностью сократить финансирование собственных специализированных подразделений в области ИН. Проводимая ими техническая политика стала предполагать не опору на собственные или отечественные разработки и специалистов, а на закупки (разовые или по мере технического

перевооружения) готовых разработок у специализированных организаций, зачастую зарубежных. Сокращению количества специалистов в области электротехнологий также способствовало то, что многие ВУЗы, ранее выпускавшие подобных специалистов, сократило их выпуск или вовсе прекратило как из-за конъюнктурных соображений, так и финансовых (невостребованность на рынке);

– открытие границ и разрыв хозяйственных связей между странами СНГ резко расширило если не количество, то поставщиков зарубежного оборудования в области ИН. На многих предприятиях в РФ, Республике Беларусь, Украине появилось различное оборудование и технологии ИН, которые на первый взгляд выгодно отличались от ранее применяемых. В большинстве случаев данное оборудование являлось специализированным и освоение новых технологий на нём или было технически невозможно из-за особенностей конструкции, или требовало привлечения специалистов фирм-поставщиков за дополнительное финансирование. При этом отсутствие собственных специалистов в области ИН зачастую приводило к ошибкам в выборе оборудования и технологии ИН и их эксплуатации. Второй особенностью данного оборудования являлась его низкая ремонтопригодность, так как отсутствовали компетентные собственные специалисты по ремонту и необходимые комплектующие;

– благодаря открытию границ, знакомству с современными западными разработками возникла и стала успешно развиваться российская школа силовой электроники в области ИН на базе разработок и научно-практических исследований Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Это позволило создать конструкцию собственного транзисторного преобразователя ТВЧ, который по своим технико-экономическим показателям не уступал зарубежным;

– на рынке появились программные продукты в области моделирования процессов ИН, которые позволили успешно решать целый ряд практических задач. Это такие программные продукты как IndHeat (Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Компьютерное моделирование устройств индукционного нагрева. Издательство СПбГЭТУ(ЛЭТИ). 2013. 160 с.) и «TermoSim», разработанные совместно БГУИР и МГЭУ им. А.Д. Сахарова;

– были созданы и успешно работают целый ряд фирм и организаций, которые разрабатывают и поставляют в промышленность современные технологии и оборудование ИН. Эти фирмы возникли как на базе ранее существовавших предприятий, так и были вновь созданными. Типичными примерами в этом могут быть фирма ESTEL г. Таллинн, возникшая на базе Таллиннского электротехнического завода. В 2003 году была создана ООО «ВНИИТВЧ-ЭСТЭЛ» (ныне ООО РТИН). Ее цель – комплектная поставка систем ИН. Среди вновь созданных можно отметить ООО «Магнит М», НПП ЭЛСИТ, ООО «Амбит» (г. Томск), ОАО «Интерсэлт» (г. Санкт-Петербург) и др. по производству как транзисторных преобразователей, так и оборудования ИН на их базе. При этом для всех этих вновь создаваемых фирм слабым местом является недостаточная технологическая компетентность.

Таким образом, наряду с рядом негативных явлений в развитии ИН, таких как сокращение специалистов, появление конкуренции на рынке, отставание в области источников питания ИН и систем управления, за последние 30 лет проявились и положительные тенденции, заключающиеся в создании собственной силовой электроники для ИН, создании новых центров ИН.

Создание и развитие ИН в Республике Беларусь

В Республике Беларусь ИН начали применять в промышленности во второй половине XX-го века, когда закладывались основы машиностроения. Освоением индук-

ционного оборудования для поверхностного упрочнения деталей впервые занялись на крупных промышленных предприятиях республики – тракторном и автомобильном заводах. Основным направлением в работе в данные годы являлась разработка технологических процессов с использованием серийно выпускаемых ламповых и машинных генераторов производства СССР [3]. Наряду с промышленностью в области индукционного нагрева активно работала и научная школа Физико-технического института НАН Беларуси, в котором на базе отдела термокинетики проводились исследования по влиянию скоростного нагрева на структуру и свойства металлов и сплавов. В 2008 году в этом институте был выполнен мониторинг промышленных технологий ИН и на его базе выработаны рекомендации для их развития.

Анализ полученных данных показал, что на промышленных предприятиях Республики Беларусь в наличии находится и используется более 1000 различных индукционных установок, которые в 90 % случаев запитаны от физически и морально устаревших машинных и ламповых преобразователей частоты, и только 10 % составляют тиристорные или транзисторные преобразователей частоты с КПД на уровне 95–97 %. Более 95 % используемого индукционного оборудования является разработкой СССР и только 3 % это современное оборудование производства ЕС и других стран.

По видам технологий более 50 % индукционного оборудование используется для поверхностного упрочнения деталей, 30 % – для нагрева под горячее формообразование, и 10 % занимает плавка черных и цветных металлов, пайка и наплавка.

Анализ физического состояния индукционного оборудования на предприятиях республики показал, что около 70 % оборудования имеют 100 % износ, 20 % – износ более 50 % процентов и 10 % – износ менее 50 %.

Анализ используемого индукционного оборудования и его состояния позволил сделать вывод, что основной задачей ближайших лет является модернизация существующего оборудования и создание новых ресурсосберегающих технологических процессов индукционного нагрева [4]. В Республике Беларусь специализированного серийного производства индукционного оборудования не существовало, как не имелось и научной школы в области силовой электроники.

В 2012 году в «ФТИ НАН Беларуси» был создан Научно-исследовательский центр «Индукционных технологий и проблем термической обработки», основными направлениями деятельности которого в области ИН стали:

– исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах;

– моделирование и расчет процессов электромагнитного и температурного влияния на материалы;

– разработка новых энергоэффективных технологий и индукционного оборудования для термообработки, нагрева, пайки и плавки;

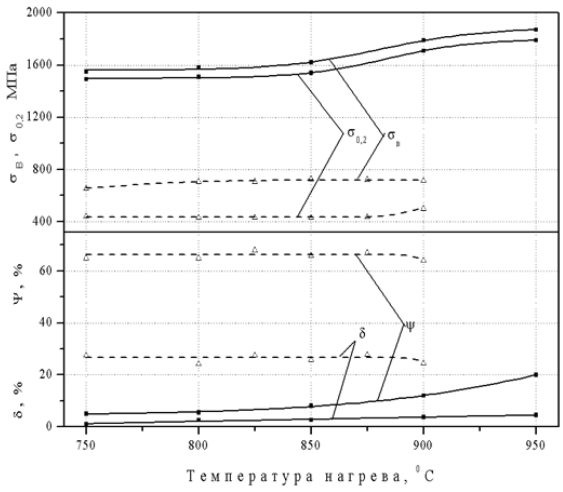
– разработка и изготовление оснастки (индукторов);

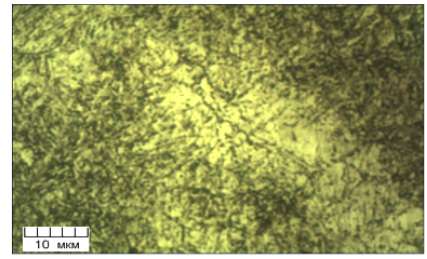
– разработка автоматизированных и роботизированных системы управления индукционным оборудованием;

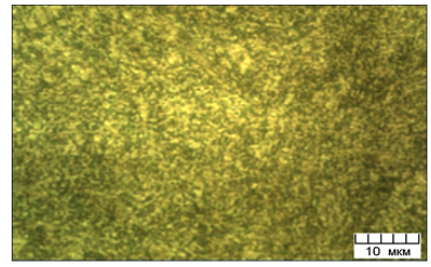
– поставка, ремонт, монтаж и наладка оборудования;

– обучение специалистов, в том числе подготовка кадров высшей квалификации.

В течение короткого времени были созданы базы данных режимов высокоскоростного нагрева под различные виды термообработки (закалку, отпуск, отжиг, нормализацию), управляемого и регулируемого охлаждения, формируемых при этом структур, фазового состава и физико-механических свойств для широкой номенклатуры сталей и чугунов (рис. 2).







Сталь 32Г2 скоростной нагрев $V_н$=50^{0}С/с охлаждение в воде (сплошная линия); охлаждение на воздухе (штриховая линия).

Скоростной нагрев ($V_н$=50^{0}С/с) 900^{0}С, охл. вода, отпуск 2 ч, охл. воздух. а – 450^{0}С; б –625^{0}С.

Темп. нагрева	Охл. среда	Темп. отпуска	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относит. Удлинение/ сужение	Класс прочности по ГОСТ 633-80	Группа Прочности По API 5CT
950	вода	450	1045	1090	16 / 65	Р	Q125
950	вода	500	930	1000	16 / 65	Р	Q125
950	вода	550	745	860	18 / 67	М	P110
950	вода	600	665	770	21 / 71	Л	T95
950	вода	625	630	730	22 / 71	Е	N80
950	вода	650	580	690	23 / 72	К	N80

Рис. 2. Пример результатов индукционной термообработки стали 32Г2

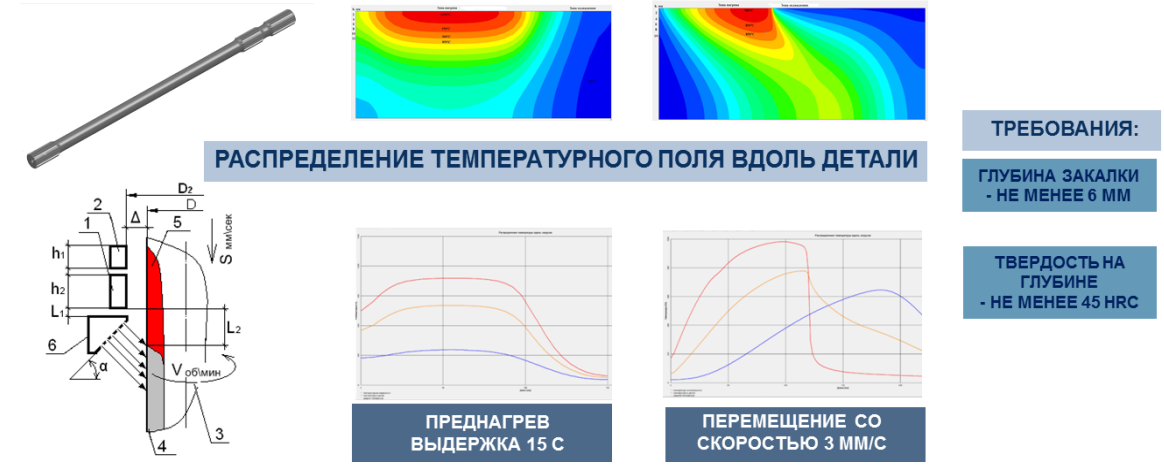
Созданные базы данных позволяют прогнозировать конечные технологические свойства различных деталей машиностроения после индукционной обработки. Для всех групп материалов было установлено, что в условиях скоростного нагрева фазовые и структурные процессы смещаются вверх по температурной кривой, в результате скоротечности термического воздействия формируется мелкодисперсная гетерогенная зёренная структура с градиентным распределением структурных составляющих и содержащихся в них легирующих элементов. Благодаря этим факторам обеспечивается высокий комплекс физико-механических свойств материалов с повышенным сопротивлением износу, удару, циклическим и контактным нагрузкам.

Особенностью технологической подготовки производства деталей, подвергаемых ИН, является необходимость анализа и обоснованности назначения режимов на стадии проектирования. Традиционно это осуществлялось экспериментальными методами, что связано с большими затратами времени и материальных средств. Решением данной задачи является применение методов компьютерного моделирования. Это при минимальном количестве экспериментальных исследований позволяет получить максимальное количество информации о разрабатываемом процессе и свойствах полученных изделий.

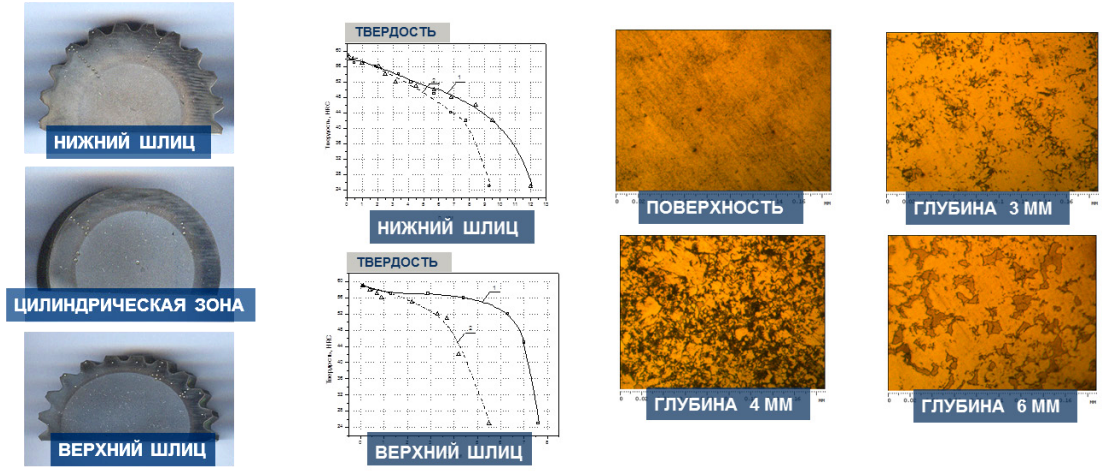
Специалистами «ФТИ НАН Беларуси» были разработаны методики моделирования и расчета распределения электромагнитных полей при индукционном нагреве для операций термической обработки, нагрева металла под деформацию, пайки и плавку.

Установлены закономерности распределения электромагнитных полей различной плотности при ИН поверхностей деталей машиностроения различных типов: цилиндрическая, плоская, внутренние отверстия, внешние поверхности (полусфера, впадина зуба, ручей и т.д.), детали сложной геометрической формы (шлицы, резьба,

зубья, шпоночные пазы, режущие кромки и т.д.). Это позволило установить закономерности распределения температурных полей по глубине нагреваемых поверхностей. Данные закономерности легли в основу расчета и проектирования конструкции рабочей оснастки – индукторов, обеспечивающих формирование упрочненного слоя на поверхности детали строго определенной конфигурации, заложенной конструктором (рис. 3 а, б).



а



б

Рис. 3. Моделирование процесса (а) и проверки результатов моделирования (б) непрерывно последовательной закалки цилиндрической поверхности

Совокупность исследовательских и опытно-конструкторских работ по моделированию процессов, созданию специализированных индукторов и разработке технологий позволила обосновать основные технологические и конструктивные требования к современному комплексу оборудования индукционного нагрева различного типа (рис. 4).

Например, комплексы индукционной закалки должны включает в себя:

– полупроводниковый преобразователь частоты на основе силовых тиристорных или транзисторных модулей с КПД не менее 95 %;

– станок механизации с системой полной автоматизации или роботизации;

– микропроцессорный программируемый блок системы управления и контроля;

– станцию подготовки и охлаждения закалочной жидкости;
– станцию охлаждения элементов оборудования;
– комплект индукторов и технологической оснастки.

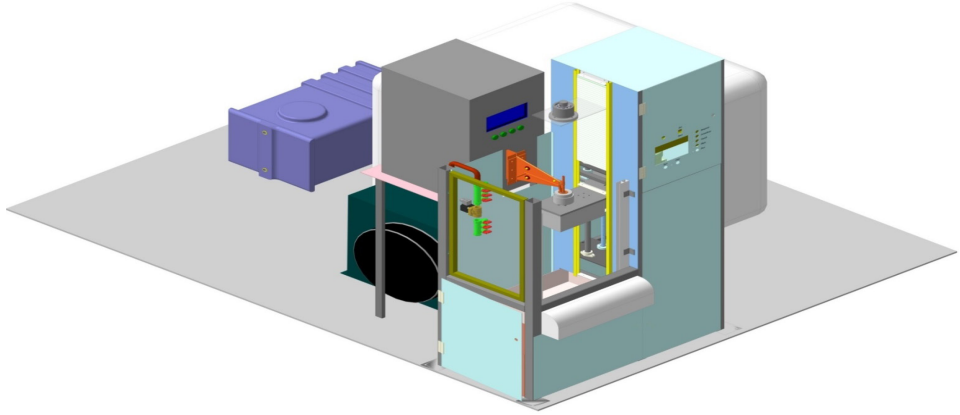


Рис. 4. Автоматизированный комплекс индукционной закалки

При этом для оптимизации затрат на изготовление и эксплуатацию, обеспечение высокой ремонтопригодности должен быть соблюден модульный принцип построения оборудования, когда по каждой из вышеуказанных позиций разработаны типовые ряды конструкций с применением одинаковых и взаимозаменяемых узлов и комплектующих.

При разработке такого оборудования используются следующие технологии V-го технологического уклада: информационно-коммуникационные технологии и разработка программного обеспечения; микроэлектроника и радиоэлектронная промышленность; роботостроение, приборостроение и вычислительная техника.

Для оборудования ИН в «ФТИ НАН Беларуси» были разработаны специализированные системы управления, позволяющие реализовывать основные режимы работы (ручной, автоматический и режим наладки для одновременного и непрерывно-последовательного способов индукционного нагрева). Программные комплексы позволяют управлять и контролировать следующие процессы: перемещение и вращение деталей в широком диапазоне скоростей; нагрев и выдержку деталей при заданной температуре; интенсивность охлаждения с контролем температуры и давления охлаждающей среды. Система управления обладает функцией обратной связи, регулирующей параметры работы оборудования в зависимости от изменения параметров технологии нагрева (температуры детали, температуры, протока и давления охлаждающей среды) и функцией сохранения данных всех параметров для последующего анализа и обработки.

В результате вышеуказанных работ «ФТИ НАН Беларуси» выработаны требования, обеспечивающие успешную научную, производственную и финансовую деятельность организации в области ИН в условиях открытого рынка и конкуренции:

1. Организация (фирма, предприятие), работающее в области ИН, должна иметь в своей структуре две взаимодополняющих составляющие: научную и производственную. Их наличие и взаимосвязь позволяют решать как выпуск и внедрение разработанных и проверенных технологий и оборудования, так и разработку новых, с проведением необходимых исследований и экспериментов. Для выполнения данной задачи необходимо иметь:

• подразделение конструкторов и специалистов в области как проектирования оборудования так и расчета и моделирования процессов индукционного нагрева;

• подразделение, занимающееся разработкой технологий ИН с отработкой и контролем получения требуемых свойств на деталях-представителях;

• производственную базу и специалистов, обладающих компетенциями в области изготовления силовой электроники, систем механизации, оснастки, индукторов, систем ЧПУ, станций охлаждения и подготовки охлаждающей жидкости;

• испытательную лабораторию для контроля технологии и проведения испытаний;

• маркетинговую службу с компетенциями работы на торговых площадках стран СНГ, прежде всего РБ и РФ, для участия в конкурсах и тендерах.

2. Индукционная технология и оборудование как коммерческий продукт являются дорогостоящим и не массовым. Сложно обеспечивать устойчивое финансовое функционирование и развитие предприятия в области ИН при ориентировании его только на один научно-технический продукт. Поэтому вторым условием для успешной работы организации в области ИН должна быть многосторонность его деятельности. Для выполнения данного условия необходимо иметь:

• сервисную службу по гарантийному и пост – гарантийному обслуживанию как собственного оборудования, так и оборудования других производителей;

• производственную базу для оказания услуг по модернизации физически и морально устаревшего индукционного оборудования;

• производственную базу для оказания услуг по термообработке ТВЧ с возможностью отработки и выпуска опытных и промышленных партий для Заказчиков;

3. Для обеспечения притока молодых специалистов и поддержания высокого профессионального уровня персонала необходимо иметь устойчивые связи с учебными заведениями, готовящими специалистов в области материаловедения, машиноведения, систем управления и силовой электроники. Эти связи могут быть реализованы в виде совместных лабораторий, филиалов кафедр, привлечения студентов старших курсов, производственных практик и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние 30 лет индукционный нагрев на территории союзного государства прошел сложный путь от упадка до постепенного возрождения. Причем, возрождение ИН происходило путем как создания новых центров, так и развития на новом этапе традиционных разработчиков. Накопленный опыт работы помог сформулировать требования к оборудованию различных типов ИН, а также условия успешной финансовой и научно-практической деятельности предприятия в области ИН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рогинский В.Ю. Валентин Петрович Вологдин – Ленинград: наука. – 1981. – С. 216.
2. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат. – 1988.
3. Гордиенко А.И., Гурченко П.С., Михлюк А.И., Вегера И.И. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева. г Минск. Изд. Беларуская навука. – 2009.
4. Индукционная термическая обработка в машиностроении: анализ, проблемы, перспективы развития в РБ. Михлюк А.И., Вегера И.И., Индукционный нагрев №1 2014. – С. 16–24.

УДК 621.365.5

ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА В ХОЛОДНОМ ТИГЛЕ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И РЕАЛИЗАЦИИ ДРУГИХ УНИКАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Д.Б. Лопух, А.В. Вавилов, А.П. Мартынов, И.Н. Скриган

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»),
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Настоящая работа посвящена обзору исследований, проводимых в лаборатории индукционной плавки в холодном тигле (Лаборатория ИПХТ) кафедры электротехнологической и преобразовательной техники ЭТПТ Санкт-Петербургского Государственного Электротехнического Университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») совместно с другими организациями. Статья в основном затрагивает развитие электротехнологий варки технических стёкол с разливкой расплава и плавки реакторных оксидных материалов для исследования процессов тяжелых аварий ядерных реакторов, а также вопросы моделирования и автоматизации ИПХТ, направленных на совершенствование данного метода. Описывается применение полученных результатов в различных процессах.

Ключевые слова: холодный тигель, индукционная варка стекол, сливное устройство, численное моделирование, радиоактивные отходы, оксиды, гарнисаж, расплав

INDUCTION MELTING IN A COLD CRUCIBLE TO ENSURE THE SAFETY OF NUCLEAR POWER AND THE IMPLEMENTATION OF THE OTHER UNIQUE TECHNOLOGIES

D.B. Lopukh, A.V. Vavilov, A.P. Martynov, I.N. Skrigan

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»,
Saint Petersburg, Russian Federation

This paper is devoted to the review of research conducted in the laboratory of induction melting in a cold crucible (Laboratory of CCIM) of the Department of electrotechnology and converter engineering (ETCE) of the St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" together with other organizations. The article mainly deals with the development of electrical technologies for melting of technical glasses with casting and melting reactor oxide materials for the study of the processes of severe accidents of nuclear reactors, as well as issues of modeling and automation of CCIM aimed for improving of this method. The application of the obtained results in various processes are described.

Keywords: cold crucible, induction melting of glasses, draining device, numerical simulation, radioactive waste, oxides, skull, melt

E-mail: dblopukh@yandex.ru

Историческая справка и краткое описание метода ИПХТ

В начале 60-х годов были начаты работы по использованию и развитию технологии ИПХТ оксидных материалов в СССР [1]. В конце 60-х годов это привело к созданию технологии производства фианитов [2], которая дала дополнительный импульс развитию метода ИПХТ. В 80-х годах бурно развивается использование метода ИПХТ в решении экологических задач, в первую очередь связанных с остекловыванием радиоактивных отходов (РАО) [3–5], и безопасностью ядерной энергетики [6, 7]. Метод ИПХТ имеет особые преимущества, которые обусловлены сочетанием бесконтактного индукционного метода нагрева расплава и гарнисажными условиями плавки в охлаждаемом металлическом секционированном тигле:

• возможность плавки любых оксидных материалов, кроме чистого диоксида кремния;

• получение особочистых оксидных материалов с чистотой не ниже чистоты исходных компонентов;

• долговременное удержание высокотемпературных химически агрессивных расплавов в холодном тигле с целью синтеза материалов. и непрерывной работы печей.

Для остекловывания радиоактивных отходов важны производные преимущества метода ИПХТ:

• синтез тугоплавких химически стойких стёкол и стеклокристаллических материалов;

• получение гомогенного стекла благодаря перегреву и интенсивному перемешиванию расплава;

• отсутствует тяжелая громоздкая футеровка, имеющая ограниченный срок службы;

• возможность дистанционной замены тигля, имеющего меньшие размеры и массу.

Также метод ИПХТ обеспечивает плавку любых составов кориума ядерных реакторов при длительном удержании расплава в тигле, что позволяет исследовать кинетику взаимодействия расплава с реакторными материалами, прогнозировать развитие тяжелой аварии ядерного реактора и проводить научное обоснование ядерных реакторов нового поколения.

Юрий Борисович Петров

В 2006 году ушел из жизни «Отец русского холодного тигля» профессор Юрий Борисович Петров. Так по-доброму его называли в кругу наших коллег. Всю свою научную жизнь, а это около 45 лет, он посвятил разработке и совершенствованию технологии ИПХТ и добился больших результатов в развитии этого метода в СССР, в России и за рубежом, благодаря своему таланту изобретателя и художника. Коллеги благодарны ему за огромный вклад в развитие и распространение метода ИПХТ. Многие его идеи развиваются и сегодня. Именем профессора Ю.Б. Петрова названа одна из аудиторий на кафедре ЭТПТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», в которой он осуществлял преподавательскую деятельность. На своем жизненном пути Ю.Б. Петров написал три книги [8, 9, 10].

В развитии технологических процессов с использованием метода ИПХТ всё большее значение приобретает математическое

Борис Сергеевич Полеводов

моделирование гидродинамических процессов [11, 12]. Особый интерес вызывает влияние свободной конвекции на распределение температуры в расплавах, получаемых в печах ИПХТ со сливными устройствами [13, 14].

В 2009 году ушел из жизни доцент кафедры ЭТПТ Борис Сергеевич Полеводов. Большую часть своей научной деятельности он посвятил разработке математических моделей индукционного нагрева металлов, плазмы и стёкол. Благодаря его разработкам математическое моделирование электротехнологических систем достигло мирового уровня. В последние годы жизни Б.С. Полеводов активно занимался моделированием индукционной варки стекла в холодных тиглях для разработки установок остекловывания РАО [14, 15]. В настоящее время эти работы развиваются в Лаборатории ИПХТ кафедры ЭТПТ. Его талант преподавателя, душевные качества и профессионализм всегда помогали коллегам и ученикам в научной и учебной деятельности.

Работы по созданию установок ИПХТ для остекловывания РАО в лаборатории ИПХТ были начаты в 1981 году, а плавки кориума проводились с 1989 года. В последствии такие установки были внедрены или развиваются в организациях: ВНИИНМ, г. Москва; ВНИИПИЭТ и РИАН, г. Ленинград (г. Санкт-Петербург); СВЕРДНИИХИММАШ, г. Свердловск (г. Екатеринбург); ПО «МАЯК», г. Озерск; МосНПО «РАДОН», г. Загорск (г. Сергиев-Посад); ЛСК «РАДОН», г. Сосновый Бор Ленинградской области; Научно-исследовательский технологический институт им. А. П. Александрова (НИТИ), г. Сосновый Бор Ленинградской области; Горно-химический комбинат (ГХК), г. Железногорск; ООО НПФ «Сосны», г. Димитровград; концерн Siemens AG, г. Эрланген, Германия; Ядерный Исследовательский Институте (NRI), г. Ржеж, Чехия; Айдахская Национальная Лаборатория (INEEL), г. Айдахо Фолс, США; Сибирский химический ком-бинат (СХК), г. Северск; Комиссариат по ядерной энергии Франции (CEA), г. Кадараш; Королевский технологический институт (KTH), г. Стокгольм, Швеция; Институт Исследования Металлов Китайской Академии Наук (IMR), г. Шэньян, КНР.

В лаборатории ИПХТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» была пересмотрена концепция построения в России установок остекловывания РАО в направлении увеличения производительности и надежности процесса [16]. Согласно этому проведена и в настоящее время идет разработка установок остекловывания высокоактивных отходов (ВАО) [17, 18], которая с каждым годом развивается на площадке АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», г. Санкт-Петербург совместно с ГХК и ООО НПФ «Сосны» г. Димитровград.

Первые работы Лаборатории ИПХТ в направлении ИПХТ кориума были сделаны на площадке ЛСК «РАДОН» совместно с НИТИ [6, 19]. Также лаборатория ИПХТ участвует в создании экспериментальной установки SEMICO-2 для исследования тепло гидродинамических процессов в расплаве кориума в корпусе ядерного реактора на базе KTH [20].

При участии Лаборатории ИПХТ созданы установки в Ганноверском университете Германии; АО «ВНИИХТ», г. Москва; AREVA, г. Эрланген, Германия, установки получения каменной ваты в Сибири, ИПХТ солей в Бразилии и другие. Современные направления и новые результаты исследований индукционной плавки в холодном тигле представлены в работах лаборатории [16, 21–24].

Основные направления деятельности лаборатории ИПХТ

В настоящее время в лаборатории реализованы следующие технологии, а также технические решения и программные средства, которые нашли свое применение в современной промышленности, как на крупных государственных предприятиях, так и в сфере малого бизнеса:

1. Непрерывный и периодический переплав порошковых оксидов с получением блоков:

• переплав оксида алюминия и отходов лейкосапфирового производства с получением блоков корунда, используемых для выращивания монокристаллов лейкосапфира и рубина;

• переплав оксида магния с получением блоков периклаза и их последующее дробление для изготовления высокотемпературной электрической изоляции в электронагревательных устройствах;

• получение слитков ряда оксидных композиций для изготовления футеровки высокотемпературных агрегатов (оксиды иттрия, циркония, кальция и др., каменное литье).

2. Выращивание монокристаллов из оксидных расплавов:

• выращивание монокристаллов стабилизированного диоксида циркония (Фианиты, Ксиоксы) для нужд ювелирной и электронной промышленности;

• выращивание монокристаллов оксида магния для электронной техники.

3. Непрерывные процессы для получения дисперсных оксидных материалов:

• штапельного супертонкого муллитового волокна, позволяющего поднять температуру теплоизолирующего слоя футеровки традиционных печей до 1300–1500 °С;

• штапельного волокна из расплавов горных пород для изготовления дешевой тепловой, звуковой и пожарной изоляции с высокой химической устойчивостью;

• гранул, сфер и фритты из тугоплавких материалов для производства композиционных керамических материалов и насыпной теплоизоляции;

• гранул из порошковых материалов для повышения плотности исходного сырья в установках по выращиванию монокристаллов (например, ниобата лития – $LiNbO_3$).

4. Варка оптических стекол:

• получение оптических стекол с температурой варки более 1700 °С;

• синтез особо чистых стекол для волоконной оптики;

• получение особо чистых стекол для изготовления тугоплавких ситаллов с низким или заданным коэффициентом термического расширения.

5. Отверждение плавлением радиоактивных, опасных и других видов отходов:

• остекловывание жидких и твердых радиоактивных отходов (растворы, зола);

• синтез новых матричных материалов для фиксации радионуклидов (SYNROC, стекла с большим включением радионуклидов и др.);

• переработка опасных отходов медицинской и электротехнической промышленности.

6. Использование расплава как излучателя для оплавления и термообработки тонких слоев теплоизоляции. Тепловой поток с поверхности расплава до 5 МВт/м^2.

7. Переплав отходов легированных сталей, дорогостоящих металлов и их сплавов с индукционным нагревом шлаковой ванны. Шлак имеет температуру выше температуры металла, что интенсифицирует рафинирование металла.

Так же в лаборатории регулярно проводится плавка тугоплавких оксидов и их соединений с целью изучения электрических и теплофизических структурно-чувствительных свойств расплавов при температурах до 3700 °С:

• энтальпии; коэффициента черноты; электропроводности; температур плавления, ликвидуса и солидуса; плотности и поверхностного натяжения;

• жидкофазный синтез новых оксидных соединений;

• физическое моделирование и изучение процессов, протекающих при тяжелых авариях с участием расплава активной зоны ядерного реактора с целью повышения безопасности действующих и создаваемых ядерных реакторов нового поколения. В случае разрушения корпуса реактора и выхода расплава кориума из корпуса должно быть предусмотрено устройство локализации расплава, задача которого состоит в нейтрализации негативных термохимических реакций в расплаве, в его охлаждении и затвердевании без последствий для окружающей среды. С конца 80-х годов совместно с ВНИИПИЭТ, а затем с НИТИ на ЛСК «Радон» были начаты работы по созданию высокочастотных установок для ИПХТ кориума. В настоящее время в лаборатории ИПХТ создан комплекс установок общей мощностью 600 кВА для частот тока 0,066–27,12 МГц, который использован для проведения инновационных исследований в рамках серии европейских проектов CIT, CIRMAT, ENTHALPY, LPP-WP, METCOR-1, 2, 3, MASKA, PRECOS-1, 2, EPICOR, проводимых в основном в рамках проектов Международный научно-технический центр (МНТЦ), и направленных на исследование процессов, происходящих во внутрикорпусных и внекорпусных авариях, а также на разработку устройства локализации расплава. В результате всех проведенных исследований разработано и построено на Тяньваньской АЭС первое в мире устройство локализации расплава под реактором нового поколения, поставленного Россией в Китай [19]. Это устройство представляет собой самый большой в мире холодный тигель с пассивной системой охлаждения, способный принять около 250 тонн урансодержащего расплава кориума;

• извлечение металлов из шламов гальванических ванн и шлаков цветной металлургии.

В последние годы в лаборатории разработаны:

1. Новый способ и устройство донного слива расплава стекла с использованием двухчастотного нагрева, когда основной нагревающий индуктор работает на пониженной частоте, а сливное устройство представляет собой малую печь ИПХТ, и работает на повышенной частоте тока [14].

2. Двухмерные и трехмерные электрогидродинамические (ЭГД) модели ИПХТ в программных пакетах ANSYS и COMSOL для моделирования статических и динамических режимов плавки при одночастотном и двухчастотном нагреве расплавов стекол [12, 14, 18] и имитаторов кориума [7, 20].

3. Инновационная автоматизированная информационно-измерительная система для ИПХТ, включая комплекс программного обеспечения, основанная на волоконно-оптических линиях связи и технологиях National Instruments [16, 23].

4. Установка индукционной плазмы для обработки материалов до температур 10000 °С.

В настоящее время ведется разработка и совершенствование инновационных электротехнологических систем (рис. 1–3):

Рис. 1. Печь ИПХТ диаметром 580 мм [24]

Рис. 2. Установка остекловывания имитаторов ВАО методом ИПХТ [17]

Рис. 3. Инновационная печь с холодным тиглем в виде конуса

1. Новые печи ИПХТ для остекловывания ВАО, которые удовлетворяют требованиям современной российской концепции построения установок остекловывания ВАО [17, 18, 22, 24], работающие на пониженной частоте тока, а также решающих проблему удаления благородных металлов из холодного тигля [25]. Пример такой разработки показан на рис. 3, где изображена печь ИПХТ с холодным тиглем в виде конуса с электромагнитным гарнисажным сливным устройством.

2. Автоматизированная система управления ИПХТ без участия человека, что в первую очередь актуально для процессов остекловывания ВАО.

3. Мощная печь ИПХТ для плавки 500 кг кориума реакторов на быстрых нейтронах в рамках проекта «PLINIUS-2», реализуемого CEA.

Математические модели ИПХТ

Основные цели моделирования ИПХТ состоят в следующем:

• проектирование печей различной конфигурации (цилиндр, прямоугольник, овал, конус);

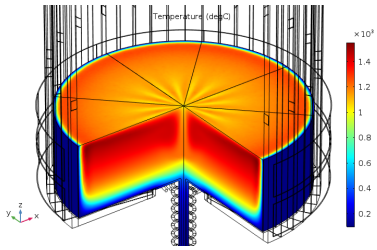
• расчет интегральных параметров плавки (мощность в расплаве и элементах ИПХТ, коэффициент мощности и электрический КПД индуктора, напряжение и ток индуктора и т.д.);

• определение параметров генератора (мощность, частота тока, емкость конденсаторной батареи);

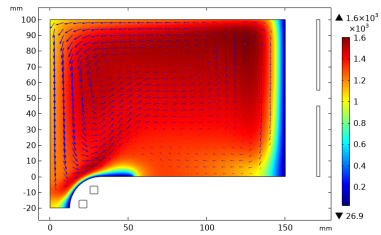
• пространственное регулирование источников тепла в расплаве для изменения конфигурации температурного поля;

• определение и регулирование распределения внутренних источников тепла в элементах печи для повышения энергоэффективности установки и достижения технологических целей;

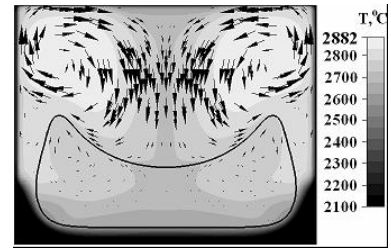
• определение полей температур и скоростей расплава в холодном тигле (рис. 4).



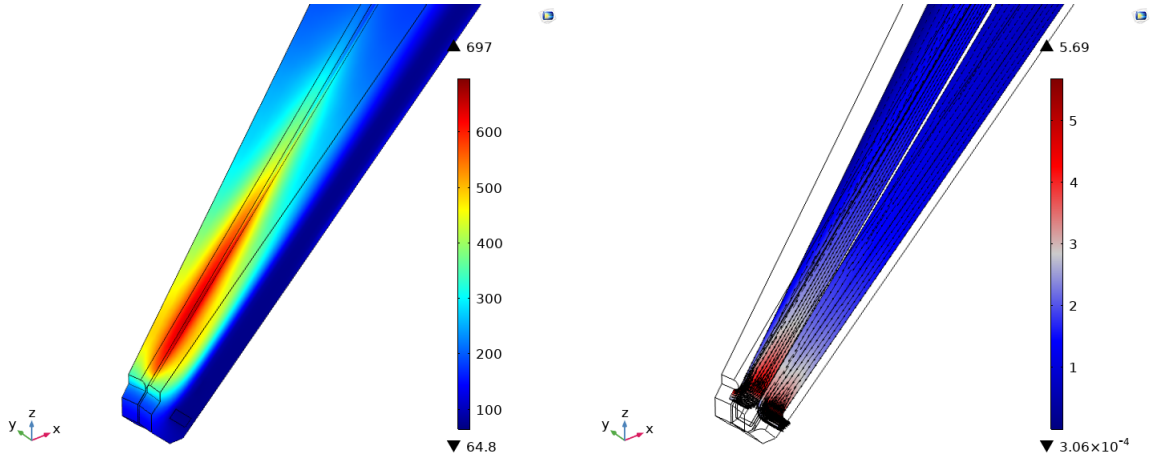
3D ЭГД модель варки стекла с донным сливом расплава через горячее сливное устройство



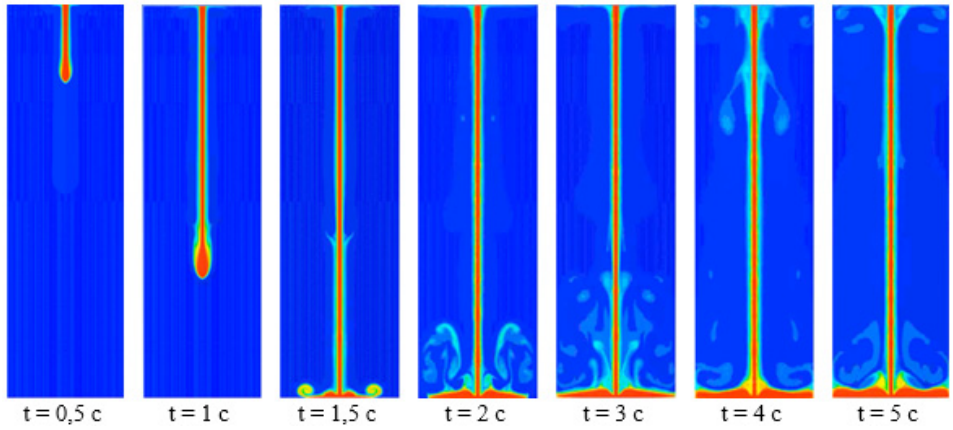
2D ЭГД модель двухчастотного нагрева при сливе расплава через гарнисажное сливное устройство



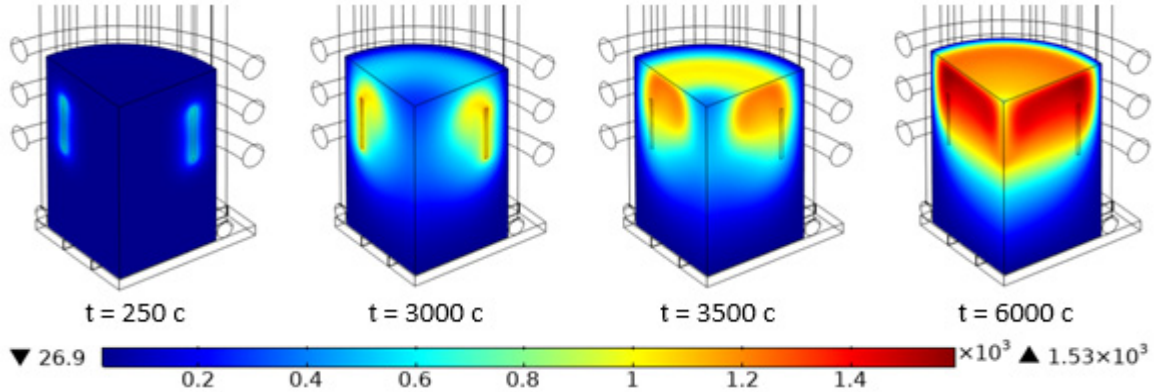
Двухфазная 2D МГД модель ИПХТ кориума-стали [26]



3D электротепловая модель охлаждения элементов печи ИПХТ с определением температурного поля, например, в секциях тигля [оС] (слева) и поля скоростей воды в каналах охлаждения тигля [м/с] (справа)



Двухфазная 2D модель слива расплава стекла из печи ИПХТ



3D ЭГД модель стартового нагрева расплава стекла и стартового материала [оС]

Рис. 4. Примеры решения одно- и двухфазных задач с использованием ЭГД и МГД моделей

Для анализа электромагнитного поля используются 1D, 2D и 3D математические модели, основанные на аналитических методах, магнитных эквивалентных схемах или численных методах анализа (конечных разностей, интегральных уравнений и конечных элементов). Для решения 2D и 3D электрогидродинамических (ЭГД) и магнитогидродинамических (МГД) однофазных и двухфазных задач в стационарном и динамическом режимах применяются программные пакеты ANSYS [12], [14] и COMSOL [20] и модель из работы [26] при одночастотном и двухчастотном нагреве расплавов стекол [12, 14, 18] и кориума [7, 20, 26].

Источники питания для ИПХТ

В настоящее время в качестве источников питания индукционных печей с холодными тиглями используют высокочастотные ламповые генераторы с колебательной мощностью от 10 до 400 кВт и транзисторные генераторы мощностью до 800 кВт.

Транзисторные источники питания являются современными, наиболее перспективными благодаря более высокому электрическому КПД и возможности увеличения мощности, что позволяет на данный момент планомерно вытеснять ламповые генераторы в области частот тока до 500 кГц при уровне мощности до 2000 кВт. В основном такие источники питания применяют при плавке горных пород и различных стекол. Например, в 2015 году транзисторный источник с частотой тока 440 кГц был использован в АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» на опытной установке остекловывания имитаторов ВАО мощностью 240 кВт с холодным тиглем диаметром 630 мм. Данная установка была разработана с активным участием специалистов лаборатории ИПХТ [17].

Автоматизированные системы управления ИПХТ

В настоящее время в Лаборатории ИПХТ продолжаются разработки инновационных автоматизированных систем управления различными процессами, реализуемых с использованием ИПХТ [23]. Данные системы характеризуются повышенной надежностью, отказоустойчивостью, а также способны работать в жестких условиях индукционного нагрева при наличии электромагнитных полей высокой интенсивности с частотами тока до 30 МГц, производя высокоточные измерения всех тепловых и электрических параметров в режиме реального времени плавки. Одной из особенностей можно выделить наличие подсистемы измерения в режиме реального времени плавки

электрических параметров индуктора, таких как действующие значения тока и напряжения индуктора; частота тока индуктора и коэффициент мощности индуктора при напряжениях на индукторе до 10 кВ и токах до нескольких кА в цикле не более 500 мс [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении необходимо отметить, что развитие ИПХТ идет по всем направлениям, представленным в настоящей статье, в рамках отечественных и европейских проектов. Информацию по развитию ИПХТ в научном и учебном направлениях можно получить на сайте лаборатории ИПХТ – www.ccimlab-leti.ru. Кроме того, хотелось бы поблагодарить коллег по университету СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и сотрудников организаций, сотрудничающих с лабораторией ИПХТ, за их вклад в результаты работ, представленных в настоящей статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Ю.Б., Васильев А.С. // Авторское свидетельство N° 185492 от 05.11.1965. Бюллетень изобретений. – 1966. – N°17. – С. 70.
2. Александров В.И. и др. // Получение высокотемпературных материалов методом прямого индукционного плавления в холодном контейнере. // Успехи химии. – 1978. – 157. – Выпуск 3.
3. Индукционная варка тугоплавких стекол в холодных тиглях / Лопух Д.Б., Неженцев В.В., Петров Ю.Б. и др. // Тезисы 9-й Всесоюзной НТ Конференции по применению токов высокой частоты в электротермии. – Ленинград. – 25–27 марта 1981. – С. 75–76.
4. Варка стекла в индукционной печи с холодным тиглем / Неженцев В.В., Петров Ю.Б., Лопух Д.Б. и др. //Электромеханика. – N° 9. – 1984. – С. 64–69.
5. Лопух Д.Б. // Разработка технологии и оборудования для отверждения имитаторов радиоактивных отходов методом индукционной плавки в холодных тиглях. // Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. – ЛЭТИ. – Ленинград. – 1987. – 294 с.
6. Физическое моделирование тяжелых аварий корпусных реакторов и исследование жидкого кориума с использованием индукционной плавки в холодном тигле / Петров Ю.Б., Бешта С.В., Лопух Д.Б. и др. // Сборник трудов 3-й Международной Конференции Ядерного общества СССР. – Санкт-Петербург. – 1992.
7. Лопух Д.Б., Бешта С.В., Мартынов А.П., Вавилов А.В., Скриган И.Н. Индукционная плавка кориума в холодном тигле. Оборудование и применение. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – 172 с.
8. Петров Ю.Б., Индукционная плавка окислов. Ленинград. – Энергоатомиздат. – Ленинградское отделение. – 1983. – 104 с.
9. Петров Ю.Б., Ратников Д.Г. Холодные тигли. Металлургия, Москва. – 1972.
10. Петров Ю.Б., Канаев И.А. Оборудование для индукционной плавки в холодном тигле, Ленинград, Энергоатомиздат. – 1991.
11. Математические модели индукционной плавки в холодном тигле / Б.С. Полеводов // Электричество. – N° 7. – 2002. – С. 43–48.
12. Математическая модель индукционной варки стекла в холодном тигле / Д.Б. Лопух, Б.С. Полеводов, С.И. Чеплюк и др. // Индукционный нагрев. – N° 3 (9). – 2009. – С. 23–29.
13. Современные направления и новые результаты исследований индукционной плавки в холодных тиглях / Д.Б. Лопух // Индукционный нагрев. – N°6. – 2008. – с. 27–37.
14. Roach J.A., Lopukh D.B., Polevodov B.S. et al. Advanced Modeling of Cold Crucible Induction Melting for Process Control and Optimization. WM2008 Conference, February 24–28, 2008, #8359, Phoenix, AZ.

15. Lopukh D.B., Roach J.A., Martynov A.P., Chepluk S.I., Richardson J.G., Vavilov A.V. Development of a Cold Crucible Induction Melter System with an Innovative Electromagnetically Heated Bottom Draining Device for Radioactive Waste Vitrification. Integrated Radioactive Waste Management in Future Fuel Cycles, November, 8–12, 2009, Charleston, South Carolina, USA.
16. Современные инструменты для исследования индукционной плавки в холодном тигле / Лопух Д.Б., Вавилов А.В., Мартынов А.П. и др. // Автоматизация и современные технологии. – N° 11. – 2010. – С. 24–31.
17. Abashkin A., Skrigan I., Ivanov E., Pleshakov A., Lopukh D., Vavilov A., & Martynov A. (2020). Investigation of silver behavior in the glass melt and its effect on the IMCC conditions in an industrial-scale furnace during vitrification of HLLW simulants. MRS Advances, 5(1–2), 83–92. doi:10.1557/adv.2020.146.
18. Лопух Д.Б., Скриган И.Н., Вавилов А.В., Мартынов А.П. Инновационная индукционная печь с холодным тиглем для остекловывания высокоактивных отходов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. – 2018. – Вып. 4(95). – С. 49–61.
19. Концепция локализации расплава кориума на внекорпусной стадии запроектной аварии АЭС с ВВЭР-1000 / И.В. Кухтевич, В.В. Безлепкин, В.Б. Хабенский и др. // Теплоэнергетика», Москва, ООО МАИК «Наука / Интерпериодика». – N° 9. – 2001. – С. 2–8.
20. Lopukh D.B., Skrigan I.N., Vavilov A.V., Martynov A.P., Bechta S.V. and Komlev A.A., "Numerical Simulation of Induction Heating for Molten Pool Heat Transfer Experiments in Slice Geometry," 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok. – 2018. – PP. 1–6, doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602779.
21. Современные направления и новые результаты исследований индукционной плавки в холодном тигле / Лопух Д.Б. // Индукционный нагрев. – N° 6. – 2008. – С. 27–37.
22. Обоснование новой российской концепции построения установки остекловывания радиоактивных отходов методом индукционной плавки в холодных тиглях / Лопух Д.Б. // Вопросы радиационной безопасности. – N° 2. – 2009. – С. 26–32.
23. Исследование электрических характеристик параметров индукционной плавки в холодном тигле / Лопух Д.Б., Вавилов А.В., Мартынов А.П. и др. // Индукционный нагрев. – N°4 (14). – 2010. – С. 30–41.
24. Отработка технологии одностадийного остекловывания методом индукционной плавки в холодном тигле при низкой частоте тока / Крушинов Е.В., Анискевич Ю.Н., Витоль С.А. и др. // Труды Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва. – 21–23 мая 2014 г. – С. 136–137.
25. Пат. 2091875 Российская Федерация, МПК G 21 F 9/16, F 27 B 14/06. Индукционная печь с холодным тиглем для остекловывания ВАО / Лопух Д.Б., Вавилов А. В., Мартынов А.П. и др.; Акционерное общество «Радиевый институт имени В.Г. Хлопина». – N° 2019145192; заявл. 25.12.2019; опубл. 02.12.2020. – 10 с.
26. Smirnov S.A., Bechta S.V., Lopukh D.B. et.al. Direct numerical simulation of molten corium pool inductively heated in the cold crucible. Proceedings of the OECD/NEA MASCA2 Seminar 2007. Cadarache, France. – 11–12 October 2007. – P. 3–8.

REFERENCES

1. Petrov Yu.B., Vasiliev A.S. // Copyright certificate N° 185492 05.11.1965 – 1966. – 1966 – N°17. – P. 70.
2. Alexandrov V.I. et al. // Poluchenie vysokotemperaturnyh materialov metodom pryamogo indukcionnogo plavleniya v holodnom kontejnere [Production of high-temperature materials by direct induction melting in a cold container] //
3. Александров В.И. и др. // Получение высокотемпературных материалов методом

прямого индукционного плавления в холодном контейнере. // Uspekhi himii. – 1978. – 157. – N° 3.
4. Indukcionnaya varka tugoplavkih stekol v holodnyh tiglyah [Induction melting of refractory glasses in cold crucibles] / Lopuh D.B., Nezhencev V.V., Petrov Yu.B. et al. // Tezisy 9-j Vsesoyuznoj NT Konferencii po primeneniyu tokov vysokoj chastoty v elektrotermii. – Leningrad. – 25–27 march 1981. – PP. 75–76.
5. Varka stekla v indukcionnoj pechi s holodnym tiglem [Glass melting in an induction furnace with a cold crucible] / Nezhencev V.V., Petrov Yu.B., Lopuh D.B. i dr. //Elektromekhanika. – N° 9. – 1984. – P. 64–69.
6. Fizicheskoe modelirovanie tyazhelyh avarij korpusnyh reaktorov i issledovanie zhidkogo koriuma s ispol'zovaniem indukcionnoj plavki v holodnom tigle [Physical modeling of severe accidents of hull reactors and the study of liquid corium using induction melting in a cold crucible]/ Petrov Yu.B., Beshta S.V., Lopuh D.B. i dr. // Sbornik trudov 3-j Mezhdunarodnoj Konferencii Yadernogo obshchestva SSSR. – Sankt-Peterburg. – 1992.
7. Lopuh D.B., Beshta S.V., Martynov A.P., Vavilov A.V., Skrigan I.N. Indukcionnaya plavka koriuma v holodnom tigle. Oborudovanie i primenenie [Induction melting of corium in a cold crucible. Equipment and applications]. SPb.: Izd-vo SPbGETU «LETI». – 2019. – 172 p.
8. Petrov Yu.B., Indukcionnaya plavka okislov [Induction melting of oxides]. Leningrad. – Energoatomizdat. – Leningradskoe otdelenie. – 1983. – 104 P.
9. Petrov Yu.B., Ratnikov D.G. Holodnye tigli [Cold crucibles]. Metallurgiya, Moskva. – 1972.
10. Petrov Yu.B., Kanaev I.A. Oborudovanie dlya indukcionnoj plavki v holodnom tigle [Equipment for induction melting in a cold crucible], Leningrad, Energoatomizdat. – 1991.
11. Matematicheskie modeli indukcionnoj plavki v holodnom tigle [Mathematical models of induction melting in a cold crucible] / B. S. Polevodov // Elektrichestvo. – N° 7. – 2002. – PP. 43–48.
12. Matematicheskaya model' indukcionnoj varki stekla v holodnom tigle [Mathematical model of induction glass melting in a cold crucible] / D.B. Lopuh, B.S. Polevodov, S.I. CHeplyuk i dr. // Indukcionnyj nagrev. – N° 3 (9). – 2009. – PP. 23–29.
13. Sovremennye napravleniya i novye rezul'taty issledovanij indukcionnoj plavki v holodnyh tiglyah [Current trends and new research results of induction melting in cold crucibles] / D.B. Lopuh // Indukcionnyj nagrev. – N°6. – 2008. – P. 27–37.
14. Roach J.A., Lopukh D.B., Polevodov B.S. et al. Advanced Modeling of Cold Crucible Induction Melting for Process Control and Optimization. WM2008 Conference, February 24–28, 2008, #8359, Phoenix, AZ.
15. Lopukh D.B., Roach J.A., Martynov A.P., Chepluk S.I., Richardson J.G., Vavilov A.V. Development of a Cold Crucible Induction Melter System with an Innovative Electromagnetically Heated Bottom Draining Device for Radioactive Waste Vitrification. Integrated Radioactive Waste Management in Future Fuel Cycles, November, 8–12, 2009, Charleston, South Carolina, USA.
16. Sovremennye instrumenty dlya issledovaniya indukcionnoj plavki v holodnom tigle [Modern tools for the study of induction melting in a cold crucible] / Lopuh D. B., Vavilov A. V., Martynov A. P. i dr. // Avtomatizaciya i sovremennye tekhnologii. – N° 11. – 2010. – PP. 24–31.
17. Abashkin A., Skrigan I., Ivanov E., Pleshakov A., Lopukh D., Vavilov A., & Martynov A. (2020). Investigation of silver behavior in the glass melt and its effect on the IMCC conditions in an industrial-scale furnace during vitrification of HLLW simulants. MRS Advances, 5(1–2), 83–92. *doi:10.1557/adv.2020.146.*
18. Lopuh D.B., Skrigan I.N., Vavilov A.V., Martynov A.P. Innovacionnaya indukcionnaya pech' s holodnym tiglem dlya osteklovyvaniya vysokoaktivnyh othodov [Innovative cold-crucible induction furnace for vitrification of high-level waste] // Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser. Materialovedenie i novye materialy. – 2018. – V. 4(95). – PP. 49–61.
19. Koncepciya lokalizacii rasplava koriuma na vnekorpusnoj stadii zaproektnoj avarii AES s

VVER-1000 [The concept of localization of the corium melt at the out-of-body stage of the beyond-design accident of a nuclear power plant with VVER-1000] / I.V. Kuhtevich, V.V. Bezlepkin, V.B. Habenskij i dr. // Teploenergetika», Moskva, OOO MAIK «Nauka / Interperiodika». – N° 9. – 2001. – PP. 2–8.
20. Lopukh D.B., Skrigan I.N., Vavilov A.V., Martynov A.P., Bechta S.V. and Komlev A.A., "Numerical Simulation of Induction Heating for Molten Pool Heat Transfer Experiments in Slice Geometry," 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok. – 2018. – PP. 1–6, doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602779.
21. Sovremennye napravleniya i novye rezul'taty issledovanij indukcionnoj plavki v holodnom tigle [Current trends and new research results of induction melting in a cold crucible] / Lopuh D.B. // Indukcionnyj nagrev. – N° 6. – 2008. – PP. 27–37.
22. Obosnovanie novoj rossijskoj koncepcii postroeniya ustanovki osteklovyvaniya radioaktivnyh othodov metodom indukcionnoj plavki v holodnyh tiglyah [Justification of the new Russian concept of building a facility for vitrifying radioactive waste by induction melting in cold crucibles] / Lopuh D.B. // Voprosy radiacionnoj bezopasnosti. – N° 2. – 2009. – PP. 26–32.
23. Issledovanie elektricheskih harakteristik parametrov indukcionnoj plavki v holodnom tigle [Investigation of the electrical characteristics of the parameters of induction melting in a cold crucible] / Lopuh D.B., Vavilov A.V., Martynov A.P. i dr. // Indukcionnyj nagrev. – N°4 (14). – 2010. – PP. 30–41.
24. Otrabotka tekhnologii odnostadijnogo osteklovyvaniya metodom indukcionnoj plavki v holodnom tigle pri nizkoj chastote toka [Development of the technology of single-stage vitrification by induction melting in a cold crucible at a low current frequency] / Krushinov E.V., Aniskevich Yu.N., Vitol' S.A. i dr. // Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii «Bezopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoj energetiki», Moskva. – 21–23 maya 2014. – PP. 136–137.
25. Pat. 2091875 Rossijskaya Federaciya, MPK G 21 F 9/16, F 27 B 14/06. Indukcionnaya pech' s holodnym tiglem dlya osteklovyvaniya VAO [Induction furnace with cold crucible for vitrification of HLW] / Lopuh D.B., Vavilov A. V., Martynov A. P. i dr.; Akcionernoe obshchestvo «Radievyj institut imeni V.G. Hlopina». – N° 2019145192; zayavl. 25.12.2019; opubl. 02.12.2020. – 10 p.
26. Smirnov S.A., Bechta S.V., Lopukh D.B. et.al. Direct numerical simulation of molten corium pool inductively heated in the cold crucible. Proceedings of the OECD/NEA MASCA2 Seminar 2007. Cadarache, France. – 11–12 October 2007. – P 3–8.

Статья поступила в редакцию 26.01.2021 г.

УДК 669.056.017;621.365.53

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОЙ И ТВЧ ОБРАБОТКИ

И.И. Вегера, В.С. Голубев

Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

Исследованы особенности влияния энергетических параметров и технологических факторов на эффективность поверхностной обработки с использованием лазерных и индукционных способов обработки. Отмечено, что использование комплексной технологии на этой основе расширяет возможности создания в упрочняемых изделиях регламентированных поверхностных слоев. Приведены конкретные примеры по применению указанных методов к широкой номенклатуре деталей.

Ключевые слова: лазерная обработка, индукционный нагрев, поверхностный слой, микротвёрдость, упрочненные детали

EXPERIENCE OF APPLICATION OF MODERN METHODS OF SURFACE HARDENING BASED ON LASER AND INDUCTION TREATMENT

I.I. Vegera, V.S. Golubev

Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

The features of influence of power parameters and technological factors are investigational on efficiency of superficial treatment with the use of laser and induction methods of treatment. It is marked that the use of complex technology on this basis extends possibilities of creation in the hardenable wares of the regulated superficial layers. Concrete examples are resulted on application of the indicated methods to the wide nomenclature of details.

Keywords: laser treatment, induction heating, superficial layer, microhardness, work-hardened details

E-mail: gvs_fti@mail.ru

Введение

Современному производству в условиях все возрастающей конкуренции и высоких требований к качеству выпускаемой продукции крайне необходима разработка новых технологий и материалов для комплексного решения задач повышения качества, надежности и ресурса работы машин и механизмов, придания металлическим изделиям регламентированных и специальных свойств, таких как повышенная твердость и прочность, износо- и коррозионная стойкость, термостойкость и т.п. Для этих целей зачастую целесообразно использовать методы лазерного поверхностного модифицирования [1–3] и обработки токами высокой частоты (ТВЧ) [4–6]. В настоящее время как лазерные, так и технологии индукционного нагрева ТВЧ прочно заняли свои передовые позиции на промышленных предприятиях ведущих стран мира. Воздействию ТВЧ присущи высокая скорость нагрева, возможность получения мелкозернистых и равнозернистых структур, обеспечивающих высокие физико-механические свойства, отсутствие окалины и обезуглероживания поверхности. Это дает возможность широко применять скоростной ТВЧ нагрев для упрочнения сложнопрофильных деталей машин путём бездеформационной контурной закалки, непрерывно-последовательной локальной закалки, операций скоростного местного отпуска и отжига, быстрого равномерного по сечению нагрева металлов перед операциями обработки давлением (прокатка, штамповка, выдавливание и т.д.), плавки черных и цветных металлов в индукционных, в том числе и вакуумных печах, пайки и наплавки различного инструмента и оснастки.

В свою очередь, использование технологических лазеров обусловлено следующими качествами сфокусированного лазерного излучения: локальность и бесконтактность воздействия, высокие скорости нагрева и охлаждения, снижение уровня остаточных напряжений, минимальные зоны термического влияния, повышение дисперсности структуры, отсутствие коробления и т.д. С развитием таких методов, как лазерное модифицирование, легирование и наплавка возникают новые перспективные возможности и пути для повышения долговечности и надежности быстроизнашивающихся деталей и всевозможного инструмента. Благодаря данным технологиям удается придавать поверхностным слоям заранее заданные и легко прогнозируемые свойства. В итоге появляется возможность обрабатывать материалы с различными физико-механическими и теплофизическими свойствами методами лазерного воздействия, вводя для упрочнения различные легирующие элементы и материалы для получения покрытий и восстановления деталей, когда невозможно или экономически нецелесообразно это достигать другими способами. Данные методы расширяют область применения простых и недорогих сталей для изготовления деталей и изделий, работающих в тяжелых и экстремальных условиях и в агрессивной среде, сопровождающихся нагревом [1–3, 7, 8]. Наиболее простыми и приемлемыми являются методы лазерной поверхностной обработки с использованием шликерных обмазок. Данные методы обеспечивают экономный расход легирующих компонентов и наплавочных материалов, возможность получения в поверхностном слое большой концентрации легирующих элементов, что легко регулируется толщиной слоя обмазки. Помимо этого, данными методами можно наносить многокомпонентные и многослойные композиции, которые другими способами зачастую нанести невозможно [9]. Необходимо отметить, что большие потенциальные возможности этих способов обработки во многих случаях сложно реализовать на практике. Это является следствием не всегда верного выбора технологических условий и энергетических характеристик лазерного луча, таких как интенсивность и модовый состав излучения, частота импульсов воздействия и т.д. Кроме этого,

сложности правильного выбора легирующих и наплавочных компонентов, связующих материалов, отсутствие достаточной информации, касающейся количественных и качественных показателей составов, достигаемых физико-механических и эксплуатационных свойств до сих пор серьезно сдерживают развитие технологий лазерного модифицирования-легирования- наплавки, как весьма перспективных методов лазерной поверхностной обработки [1–3, 7–11].

На сегодняшний день для изготовления конструктивных элементов машин и механизмов широко используются среднеуглеродистые легированные стали типа 40Х, 40ХН, 50ХН и др. Однако после термообработки в виде закалки и низкого отпуска максимальная их твердость находится в диапазоне 50–56 HRC, что недостаточно для работы, например, в условиях абразивного износа. Повышение твердости и износостойкости конструкционных элементов может быть достигнуто благодаря применению комбинированных методов обработки, включающих индукционную и лазерную обработку [12]. Применение высокочастотного и лазерного нагревов или их сочетание с традиционными технологиями термообработки является наиболее эффективным в целях повышения эксплуатационных свойств изделий, работающих на износ и претерпевающих ударные и циклические нагрузки. Данные методы менее трудоемки, более экономичны, при их применении снижаются энергозатраты и сокращается длительность процесса термообработки, а по качеству упрочнения они зачастую не уступают, а в ряде случаев и могут превосходить процессы печной обработки.

Темпы расширения сферы применения скоростных индукционных методов нагрева сегодня сдерживаются проблемами, связанными с выбором оптимальных режимов термообработки, рациональным конструированием нагревательных и охлаждающих конструкций, сложностью осуществления операции упрочнения деталей с нелинейными поверхностями. Вследствие этого при разработке технологий электротермического упрочнения необходим индивидуальный подбор технологических режимов обработки, расчет и конструирование специальных устройств под каждую деталь. Это возможно реализовать на основании экспериментального изучения особенностей фазовых и структурных превращений в сталях и сплавах при высокоскоростных и комбинированных методах обработки, исследовании их свойств.

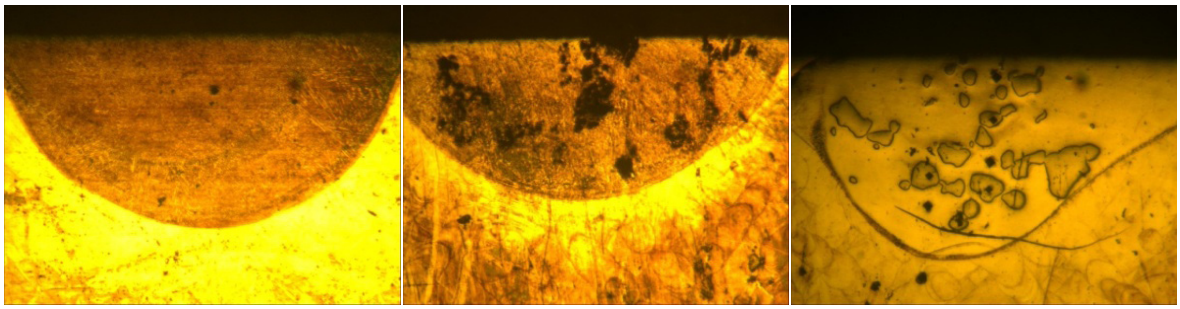
Материалы и методика исследований

Материалами для исследований были выбраны конструкционные стали 40Х, 65Г, а также сталь пониженной прокаливаемости 60ПП и высокопрочная сталь 44, созданная на основе системы Fe-C-Mn-Cr-Ni-Mo. В экспериментах под задачи упрочнения быстроизнашивающихся деталей сельхозтехники использовались как отечественные стали типа 50ХФА, так и импортные стали типа 30MnB5, 42CrMo4, 51CrV4 и др. Термическую обработку сталей проводили в условиях печного и скоростного нагрева. Скоростная термообработка образцов проводилась с применением специальной установки электроконтактного нагрева, позволяющей моделировать скорости нагрева в пределах 1–1000 °С/с и скорости охлаждения в интервале 1–400 °С/с. Охлаждение образцов с закалочных температур со скоростями 1–5 °С/с осуществляли при пропускании тока через образец. Поверхностный нагрев и закалку листовых образцов из стали осуществляли непрерывно-последовательным индукционным методом с использованием установок индукционного нагрева ФТИ 3.148.1, ФТИ 3.148.2 в комплекте с высокочастотными преобразователями в различных диапазонах частот и специальных индукторов, спроектированных и изготовленных в лаборатории скоростных методов термической обработки ФТИ НАН Беларуси.

Поверхностное упрочнение лазерной закалкой проводилось на CO_2-установке непрерывного действия «Комета-2» с выходной мощностью ~1 кВт. Сканирование лазерным лучом по поверхности проводили в диапазоне скоростей 2–30 мм/с. Оптимальный шаг нанесения лазерных «дорожек» составлял ~1–2 мм. Режимы лазерной обработки для образцов подбирались в зависимости от генерируемой мощности лазерного излучения, линейных скоростей сканирования лучом, расстояния между лазерными «дорожками», диаметра лазерного пятна фокусировки. В рамках данных исследований проведено изучение геометрических размеров, структуры и качества поверхностных слоев, получаемых на образцах в результате лазерной обработки модифицирования - легирования - наплавки. В качестве легирующих компонентов использовались порошки вольфрама и различных химических соединений, таких как B_4C, TiC, Cr_3C_2, W_2B_5, Co_3B, $TaSi_2$, TiN и др. На поверхности предварительно формировался слой нанесением на нее шликерным методом вышеуказанных порошков. Толщина слоя порошка составляла ~100–150 мкм. При лазерном модифицировании и наплавке на образцы указанных сталей также шликерным методом наносили порошок износостойкого состава, содержащего карбиды хрома, вольфрама, бориды и другие тугоплавкие соединения. Для наплавки использовались порошки износостойких сплавов на никелевой (ПГ-10Н-01 и Т-Термо 650 (ПГ-10Н-01 + 50 % WC)) и кобальтовой (ПГ-10К-01) основах. Исследования структурных и фазовых превращений проводились с помощью металлографического, электронно-микроскопического и рентгеноструктурного анализов. Испытания физико-механических свойств проводились по стандартным методикам.

Результаты исследований и обсуждение

Лазерное легирование. Оплавление при лазерной обработке поверхностного слоя дает возможность проведения лазерной наплавки, легирования и модифицирования (как промежуточного процесса между легированием и наплавкой) элементами, которые наносятся на поверхность инжекцией порошка в ванну расплава, наводимою лазерным лучом, напылением покрытия или в виде шликерной обмазки. Указанные методы позволяют формировать широкий спектр поверхностных структур, насыщать поверхностные слои изделий простыми и сложными материалами. Процесс лазерного легирования осуществляется за счет конвективного массопереноса в расплавленной ванне металла и диффузионного перераспределения внедренных элементов. При лазерном легировании, в отличие от стандартной химико-термической обработки, можно обеспечивать достаточно высокое насыщение основы легирующими элементами за короткое время на значительную глубину (≤ 1 мм). Введение различных легирующих материалов при лазерной обработке может приводить к существенному изменению эксплуатационных характеристик поверхностного слоя материала (твердость, износостойкость, жаропрочность, контактная прочность и другие). Установлено, что размеры зоны легирования зависят в большой степени от энергетических параметров лазерного излучения, окружающей газовой атмосферы, фокусирующей системы. При оптимальных режимах лазерной обработки вся область поверхностного легирования может быть достаточно однородной, зависящей в своем составе в основном от глубины оплавления и толщины предварительно нанесенного слоя материала (рис. 1 а). В то же время при легировании рядом других порошков и в зависимости от режимов лазерного воздействия в структуре могли наблюдаться нерастворившиеся до конца остаточные включения (рис. 1 б, в). Микротвердость таких включений при этом могла достигать уровня 16000–25000 МПа.



а б в

Рис. 1. Характерные структуры зон поверхностного легирования при использовании различных легирующих порошков: а – $TaSi_2$; б – TiN; в – W

Изменение содержания легирующих элементов при переходе из зоны лазерного расплавления к основному материалу происходит в достаточно узкой области, зачастую почти скачкообразно. Основной причиной выравнивания концентрации элементов при лазерном легировании поверхностного слоя является перемешивание металла в жидкой фазе. Определенную роль при этом играют также термо-диффузионные процессы. Установлено, что при кристаллизации в микроструктуре основными ее элементами являются твердые растворы α- и γ-железа и дисперсные включения упрочняющих фаз, например, в виде карбидов и боридов железа, хрома и др. При этом твердые растворы на основе α- и γ-железа могут быть значительно пересыщены, например, такими элементами внедрения, как углерод и бор.

Следует отметить также, что при лазерном поверхностном легировании упрочняющие избыточные фазы могут иметь свои морфологические особенности. Так, после лазерного оплавления в структуре легированных зон, также как и в наплавленных слоях [13], могут присутствовать линейчатые, глобулярные или звездчатые фрагменты. К примеру, линейчатые фрагменты более характерны для карбидов хрома, а звездчатые дендриты присущи боридам железа, в то время как глобулярные характерны и для карбидов, и боридов железа и хрома. Микротвердость в легированой зоне могла достигать 13000–18000 МПа, при этом в поверхностном слое могли полностью отсутствовать такие дефекты, как трещины и поры. Причем при обработке в инертной атмосфере такая картина была более выраженной.

Применение лазерного излучения является также весьма перспективным в технологии нанесения износостойких покрытий. В этих случаях обеспечивается высокая прочность соединения непосредственно покрытия с основой вследствие частичного ее проплавления и минимального термического воздействия на обрабатываемые детали. Появляется вполне реальная возможность эффективного создания износостойких слоев на рабочих поверхностях деталей, изготовляемых из недефицитных и недорогих марок сталей и сплавов. Помимо этого, использование энергии лазера дает возможность восстанавливать отдельные изношенные места, при необходимости с повышенным комплексом физико-механических свойств поверхности.

Лазерное модифицирование. Протекание процесса модифицирования поверхностного слоя представляет собой особый интерес [14]. По своей сути, этот процесс осуществляется при пограничных режимах протекания процессов наплавки – легирования. Размеры заглубления в основу при этом процессе приблизительно равны величине толщины наращенного слоя. При этом общая толщина упрочняемого слоя составляет порядка 0,2–0,3 мм. Причем размеры предварительно наносимой шликерной порошковой обмазки такого же порядка ~0,2 мм.

С этой целью в экспериментах предварительно нанесенный слой такой шликерной обмазки из порошкового сплава на кобальтовой основе ПГ-10К-01 оплавлялся излучением CO_2–лазера при различных скоростях перемещения лазерного луча. Обработка велась в воздушной атмосфере. Было показано, что с ростом скорости сканирования заглубление в металлическую основу снижается, а наплавляемый материал под действием сил поверхностного натяжения стягивается с краев и таким образом постепенно формируется наплавляемый валик. При этом также постепенно уменьшаются размеры зон термического влияния (ЗТВ) в материале основы. Так, ширина ЗТВ снижалась с ~2,2 мм до ~1,25 мм, а глубина с ~1,0 мм до ~0,5 мм. Наблюдалось также, что под действием давления «паров отдачи» расплав может перемещаться за пределы ЗТВ. При этом при лазерной обработке максимальная интенсивность лазерного факела наблюдалась именно при максимальных энерговкладах, то есть при минимальных скоростях сканирования луча.

Аналогичный эксперимент был проведен с применением порошков на основе никеля ПГ-10Н-01 и Т-Термо 650. Обработка осуществлялась как на воздухе, так и в инертной среде, при подаче в область наплавки аргона. Было обнаружено, что в наплавленном материале могло присутствовать большое количество различных пор, что связывается с парообразованием вследствие взаимодействия частиц карбида вольфрама WC с воздухом и протеканием соответствующих экзотермических реакций. При этом при обработке в инертном аргоне порообразование было менее выражено, чем на воздухе. Было замечено, что с уменьшением скорости движения лазерного луча возрастает как глубина оплавленного слоя, так и его микротвердость. Это свидетельствует о том, что наряду с перемешиванием материала порошка и основы в самом расплаве происходит непосредственно растворение частиц карбида вольфрама, что в свою очередь дополнительно приводит к формированию упрочненного слоя. Необходимо отметить, что в этом случае картина несколько отличается от экспериментов с лазерным оплавлением самофлюсующегося порошка ПГ-10Н-01. Отличия в ходе поведения значений микро-твердости по глубине слоев для различных скоростей обработки также свидетельствуют о том, что определенную роль в случае лазерного воздействия играют коэффициенты поглощения падающего излучения. Это связывается как непосредственно с самим порошковым материалом при нагреве, так и в дальнейшем с началом плавления с изменением отражательной способности поверхности расплава. Относительно порошкового материала Т-Термо 650, представляющего собой механическую смесь самофлюсующегося порошка на никелевой основе и частиц карбида вольфрама, можно предположить, что такой порошок будет иметь заведомо более высокие поглощательные свойства. В последующем при окислении вольфрама будут, по-видимому, возрастать и поглощательные свойства самой поверхности расплава. Все это будет вносить свои специфические особенности в формирование структурно-фазового состояния поверхностных слоев.

Твердость матрицы наплавленных валиков из порошков на Ni-основе с ростом содержания углерода и бора возрастает от ~5200–5700 до ~7900–9300 МПа. С применением электронного микроскопа SEM 515 с приставкой EDAX был проведен элементный анализ по поперечному сечению валиков лазерной наплавки в воздушной и в инертной атмосфере – аргоне. Обнаружено, что при наплавке на воздухе наблюдалась более неоднородная структура. При этом более крупные включения отождествляются в первую очередь с вольфрамом, а затем с углеродом и кремнием. Особенно отчетливо это выражается при осуществлении процесса наплавки в атмосфере аргона. В связи с этим можно предположить, что в порошке с механической смесью Т-Термо 650 помимо непосредственно карбида имеются в наличии и достаточно круп-

ные частицы вольфрама. Как известно, при оплавлении обычного самофлюсующегося порошка с имеющимися в нем добавками кремния и бора происходит их окисление кислородом из окружающего воздуха. При этом легкие оксиды этих элементов всплывают в виде шлака и таким образом защищают расплав от дальнейшего окисления. В то же время при наплавке в инертной среде окисления этих добавок кремния и бора не происходит, и они могут активно взаимодействовать с имеющимися в расплаве частицами W с образованием как силицидов, так и боридов. В этом случае образующиеся при лазерной наплавке в инертной среде слои на основе самофлюсующегося порошка Т-Термо 650 могут обладать комплексом повышенных физико-механических свойств, таких как износо- и коррозионная стойкость, термостойкость и т. д. Необходимо также отметить появление в зоне наплавки железа, что связано с подплавлением материала подложки и с перемешиванием ее с наплавляемым порошком. В то же время концентрация никеля и в наплавленном слое постепенно уменьшается по мере приближения к границе наплавки.

Комплексная обработка. Разработка новых образцов техники, их модернизация вызывает необходимость повышения долговечности и надежности деталей и узлов, работающих в условиях ударных нагрузок и интенсивного износа. Опыт промышленного использования и исследования показали, что широко используемая для этих целей недорогая сталь 65Г не всегда обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики. Существенным недостатком данной стали является ее хрупкость в термически упрочненном состоянии. Снижение твердости и прочности при отпуске сопровождается повышением износа рабочих поверхностей деталей в процессе эксплуатации. Применение вместо стали 65Г сталей с пониженной прокаливаемостью и методов скоростной закалки в ряде случаев способствует решению проблемы оптимального сочетания высокой износостойкости поверхностных слоев и хороших прочностных свойств сердцевины детали. Однако свойства стали типа 60ПП и их стабильность в значительной степени зависят от режимов как нагрева, так и охлаждения с критическими скоростями, что не дает возможности использовать данного типа стали для целого ряда деталей.

Использование стали типа 40Х, отличающейся повышенной вязкостью, позволяет в результате комбинированной обработки повысить сопротивление к ударным нагрузкам по сравнению со сталью 65Г. Однако уровень прочности данной стали уступает импортным аналогам. Повышение физико-механических свойств может достигаться в результате использования комплексно легированных сталей. В связи с этим в настоящем исследовании рассматривается возможность использования среднеуглеродистой стали 44, легированной никелем, хромом, молибденом и ванадием в качестве заменителя упомянутых сталей 65Г, 60ПП и 40Х. Данная сталь достаточно эффективно упрочняется закалкой, обеспечивая при этом высокие пластические, прочностные и ударные характеристиками. В этой связи далее были проведены исследования, касающиеся влияния режимов скоростной термообработки и последующего лазерного нагрева на качество, структуру и механические свойства указанных выше среднеуглеродистых и среднелегированных сталей.

В общем, на основании большого объема экспериментальных данных установлено, что трансформация структуры и свойств той или иной стали зависит от технологических режимов лазерной обработки, исходного состояния основы, степени искаженности кристаллической решетки и стойкости получаемых поверхностных структур к релаксационным процессам. Глубина упрочняемых слоев, в основном, зависит от энергетических параметров процесса лазерного воздействия, плотности мощности излучения, поглощательной способности, а также теплофизических свойств материа-

ла подложки. При этом твердость упрочненных и переходных слоев будет определяться как параметрами процесса, так и химическим составом модифицированных слоев и основы, количественным и качественным составом фаз в слоях, морфологией структурных составляющих, степенью дисперсности фаз и термической устойчивостью мартенсита закалки к процессам разупрочнения. На формирование структурно-фазового состояния оказывают влияние скорости нагрева и охлаждения, коэффициенты теплопроводности, градиент теплоотвода [15].

Что касается стали 65Г, то, исходя из предварительно полученных данных, в исследованиях были использованы следующие режимы термообработки образцов из этой стали: а) скоростной нагрев до температур в интервале 860–900 °С, охлаждение в масле, отпуск при температурах 250, 400 и 550 °С, 2 часа; б) печной нагрев до температуры 820 °С, закалка в масле и отпуск при температурах 250, 400 и 550 °С, 2 часа. После термообработки по первому варианту твердость исследуемых образцов составляла 56, 45 и 36 HRC, а после термообработки по второму варианту – соответственно 56, 47, и 36 HRC. Далее образцы, претерпевшие термическую обработку как с печного, так и скоростного нагрева, подвергались поверхностному упрочнению по методу лазерного модифицирования, а затем изучалась структура и свойства поверхностных слоев, распределение твердости по сечению образцов и работа разрушения.

Перед лазерной обработкой поверхность исследуемых образцов очищалась от окалины, затем шликерным методом на нее наносился слой порошка типа Т-Термо 650 толщиной 0,1–0,2 мм. Режимы лазерной обработки подбирались таким образом, чтобы происходило оплавление нанесенного порошка, а глубина зоны термического влияния была на уровне ~0,3–0,5 мм. После лазерной обработки изучалась структура поверхностного слоя и образцы испытывались на удар, образцы с размерами 10×10×56 мм без надреза разрушались на маятниковом копре.

Микротвердость модифицированного слоя на закаленном и отпущенном при 250 °С образце находилась на уровне 750–950 HV_{50}. На основании данных рентгеноструктурного анализа модифицированный слой представлял собой твердый раствор карбидов вольфрама и хрома в никелевой матрице. Удар на маятниковом копре наносился как со стороны лазерного модифицирования, так и с обратной стороны. В результате анализа экспериментальных данных было установлено, что для образцов, по которым удар наносился по модифицированной стороне, во всем температурном интервале отпуска были характерны высокие значения работы разрушения. А для образцов, закаленных с печного нагрева, после отпуска при 250 °С работа разрушения не превышала 23 Дж. После отпуска при температурах 400 и 550 °С образцы разрушались при энергии удара соответственно 54 и 215 Дж. Когда удар наносился со стороны противоположной модифицированию работа разрушения образцов, подвергнутых отпуску при 250 и 400 °С, составляла на уровне 26–28 Дж. Отпуск при температуре 550 °С приводил к повышению значений работы разрушения до 93 Дж.

Следует отметить, что при скоростном нагреве под закалку и отпуске в диапазоне 250–550 °С твердость во всем температурном интервале повышалась на 1–2 ед. HRC. Вместе с тем существенно повышалась работа разрушения тех образцов, удар по которым наносился со стороны обратной лазерному модифицированию. Так, после отпуска при температуре 250 °С работа разрушения образцов составляла 68 Дж. С ростом температуры отпуска до 400 и 550 °С работа разрушения увеличивалась соответственно до 184 и 280 Дж. Таким образом, выполненные исследования показали существенное преимущество режимов скоростного нагрева под закалку стали 65Г с точки зрения как твердости, так и вязкости разрушения.

Что касается образцов стали 40Х, то в аналогичных экспериментах было выяв-

лено следующее. Так после скоростного нагрева и закалки с температуры 900 °С, затем отпуска при температуре 250 °С, твердость металла в закаленном состоянии снижается с 53 HRC до 49 HRC, а работа разрушения повышается до 170 Дж. Рост температуры отпуска от 350 до 450 °С ведет соответственно к снижению твердости от 44 до 37 HRC. Работа разрушения таких образцов в данном интервале температур изменяется от 230 до 250 Дж. В случае, если удары на маятниковом копре наносились со стороны, противоположной лазерному нагреву, то во всем диапазоне температур отпуска (250–450 °С) работа разрушения составляла 45–80 Дж. При этом значительного различия значений у образцов, закаленных с печного или после скоростного нагрева, не наблюдалось. Отметим также, что образцы, закаленные с печного нагрева, после отпуска в диапазоне 250–450 °С, имели твердость на 1–2 единицы меньше. Было установлено, что снижение твердости в стали 40Х обусловлено формированием достаточно крупного зерна и возрастанием в результате длительного нагрева в печи размера структурных составляющих мартенсита. Анализируя полученные данные можно констатировать, что использование скоростного нагрева позволяет значительно сократить при отпуске время нагрева за счет повышения температуры нагрева на 80–100 °С.

В этой же связи на заключительном этапе настоящего исследования рассматривалась возможность применения среднеуглеродистой стали 44, легированной хромом, никелем, ванадием и молибденом в качестве заменителя сталей 65Г, 60ПП и 40Х. Данная сталь эффективно упрочняется закалкой, обладая при этом высокими прочностными, пластическими и ударными характеристиками. Анализируя полученные данные, было установлено, что при печном нагреве оптимальной температурой является 950–1000 °С, а при скоростном нагреве – 1050–1100 °С. В качестве охлаждающей среды в процессе закалки следует применять масло.

Образцы стали 44, после объемного термического упрочнения, подвергались поверхностной закалке при использовании непрерывного лазерного нагрева. Объемная закалка в масле проводилась после нагрева в течение 30 мин до 980 °С. Закаленные образцы затем отпускались при температуре 200 °С 2 часа, а затем дополнительно подвергались упрочнению посредством поверхностной лазерной закалки без оплавления. После такой комбинированной обработки исследовалась структура и микротвердость поверхностного упрочненного слоя. Как следует из полученных результатов, с повышением глубины закаленного под действием лазера поверхностного слоя от 0,1 до 0,3 мм микротвердость увеличивалась от 600 до 820 HV_{50}. Лазерное поверхностное модифицирование в данном случае проводилось аналогичным способом, причем соответствующий порошок наносился на образцы стали с обезуглероженной стороны. После лазерной обработки в режимах с оплавлением поверхностно-модифицированный слой представлял собой чередование блестящих дорожек шириной до 1,5–2,0 мм. В поперечном сечении шлифов модифицированные слои располагались в виде полукруглых полосок, максимальная толщина которых составляла ~100–150 мкм. Твердость наплавленного слоя с толщиной ~100 мкм составляла ~900–1000 HV_{50}. Микроструктура такого слоя представляла собой твердый раствор с небольшими включениями карбидных частиц. Далее на глубинах 0,1–0,3 мм располагался слой лазерной закалки, при этом твердость закаленного слоя изменялась в соответствии с концентрацией углерода и составляла 650–800 HV_{50}. Микроструктура закаленного слоя была мартенситной. На глубинах 0,3–0,6 мм располагалась зона термического влияния, твердость в которой изменялась в диапазоне 800–500 HV_{50}. Характерной для этой зоны являлась троостосорбитная структура. Далее располагалась структура металла подложки, претерпевшего предварительную объемную термообработку.

Таким образом, в результате выполненных исследований было установлено влияние скоростной термической обработки и последующего лазерного нагрева на структуру и физико-механические свойства среднеуглеродистых сталей типа 65Г, 60ПП, 40Х и стали 44. Показано, что скоростной нагрев дает возможность сформировать слои с оптимальным сочетанием свойств данных сталей с точки зрения как твердости, так и вязкости разрушения. Отмечено, что наилучшим сочетанием свойств с этих позиций обладают стали 60ПП и легированная сталь 44 (рис. 2).

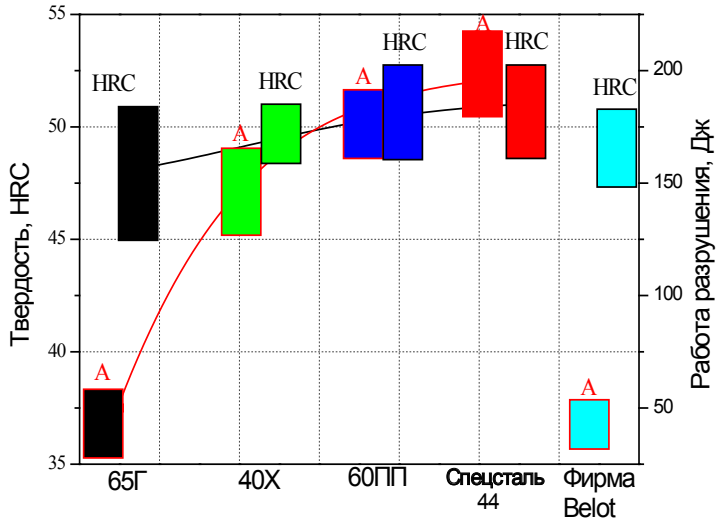


Рис. 2. Твердость и работа разрушения исследованных сталей

Однако по стабильности указанных свойств в зависимости как от режимов термообработки, так и условий охлаждения, сталь 44 превосходит сталь 60ПП. Установлено, что применение лазерного модифицирования или лазерной закалки дает возможность получать на поверхности указанных сталей слои с повышенной твердостью и износостойкостью. Полученные данные по итогам проведенных исследований создают основу для разработки технологических процессов комбинированного упрочнения [16, 17], которое включает в себя объемную закалку, лазерную и индукционную обработку деталей, работающих в условиях как абразивного износа, так и испытывающих ударные и циклические нагрузки. Разработанные технологии могут быть использованы при термической обработке, например, рабочих поверхностей режущих и измельчающих элементов зерноуборочной и кормоуборочной техники отечественного и импортного производства.

Заключение и практическое применение

В настоящее время в ФТИ НАН Беларуси в области индукционной обработки осуществляется разработка новых энергоэффективных технологий индукционного нагрева; моделирование и расчет процессов электромагнитного и температурного влияния на материалы в условиях индукционного нагрева; разработка и изготовления полупроводниковых преобразователей частоты (тиристорных и транзисторных); разработка и изготовления автоматизированных комплексов и установок индукционного нагрева для термообработки, нагрева под деформацию металлов и сплавов, пайки и плавки; разработка и изготовление оснастки (индукторов); разработка автоматизированных и роботизированных систем управления индукционным оборудованием;

сертификация, ремонт, монтаж и наладка оборудования индукционного нагрева; обучение специалистов, в том числе и подготовка кадров высшей квалификации. Сегодня институтом выполняется поставка оборудования на крупные предприятия Беларуси и России (Минский автомобильный завод, БелАЗ, Могилевлифтмаш, Амкодор, Холдинг САЛЕО, ОАО «Бобруйскагромаш», Минский завод колесных тягачей, Минский подшипниковый завод, УП НИВА и др.).

В институте также накоплен большой опыт по использованию технологий лазерного и комплексного модифицирования применительно к рабочим поверхностям ряда сменных и быстроизнашивающихся деталей рабочих органов сельхозмашин [18]. Плодотворное сотрудничество осуществлялось со специалистами ПО «Гомсельмаш» [16], ОАО «Бобруйскагромаш», ОАО «Минский РАС» и др. Лазерная технология модифицирования была апробирована для различного типа ножей и дисков. По результатам исследований были предложены марки сталей и материалы покрытий для изготовления ножей типа: измельчителей кормоуборочных комбайнов, кукурузных жаток, дообрезки ботвы свеклоуборочных комбайнов, раздатчиков-смесителей кормов, измельчителей рулонных кормов, ротационных косилок, дисков сеялок и борон, работающих в отличающихся производственных условиях с целью повышения уровня эксплуатационных характеристик.

На основе проведенных мероприятий были отработаны опытные технологические процессы лазерного упрочнения рабочих поверхностей указанных деталей. На рис. 3 приведены примеры некоторых деталей, подвергнутых лазерной обработке.

а б в

Рис. 3. Сменные быстроизнашивающиеся детали сельхозтехники, рабочие поверхности которых подвергнуты лазерному модифицированию:
а – диск бороны; б – нож кукурузной жатки ПКК-02;
в – нож кормоуборочного комбайна «JAGUAR 840»

Оптимизация таких процессов проводилась по следующим основным направлениям: подготовка рабочей поверхности деталей, скоростные режимы и технологические схемы лазерного модифицирования, режимы термической закалки и последующего отпуска деталей, режимы охлаждения конкретных деталей в процессе лазерной обработки. Для ряда опытных деталей осуществлены предварительные испытания, а для ножей кормо-уборочных комбайнов «JOHN DEERE», «JAGUAR 840», ротационных косилок КРН-2.1, дообрезки ботвы свеклоуборочного комбайна КСН-6, сегментных ножей кукурузных жаток ПКК-02 и «CHAMPION 360» проведены приемочные полевые испытания.

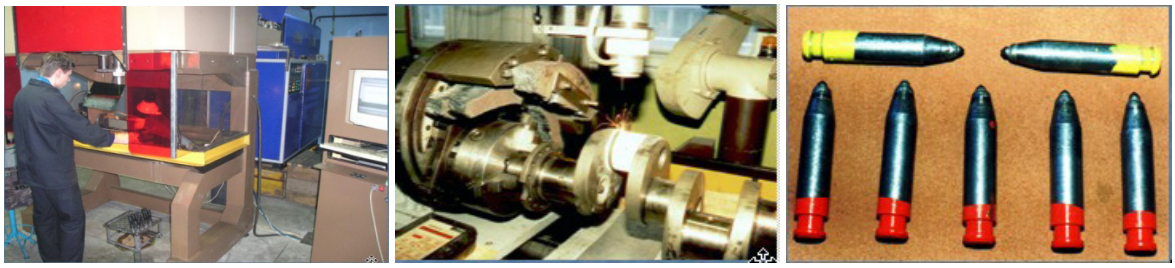
В конечном итоге было установлено, что ресурс работы упрочненных по разработанным технологиям ножей комбайна «JOHN DEERE», «JAGUAR 840», кукурузной жатки «CHAMPION 360» и ротационных косилок на наших полях может не уступать лучшим зарубежным аналогам, например, европейских фирм «Lund», «Kemper», «Krone» и др. При этом ресурс работы подвергнутых лазерной обработке ножей ротационных

косилок был в 2–3 раза выше, чем у выпускаемых серийно предприятиями нашей республики. На этом основании был сделан вывод, что организация выпуска упрочненных деталей по линии импортозамещения позволит получить значительный экономический эффект.

Сегодня лазерная технология упрочнения достаточно успешно применяется в производстве ПО «Гомсельмаш» при изготовлении измельчающих ножей для кормоуборочных комбайнов типа КВК-800 и др. В ФТИ НАН Беларуси для организаций, которые занимаются поставкой запчастей к сельскохозяйственной технике, периодически также ведутся работы по лазерному упрочнению рабочих поверхностей некоторых типов ножей. В институте продолжаются также исследования по дальнейшему развитию лазерных технологий модифицирования, намечены перспективные пути по совместной лазерной и ТВЧ обработке рабочих поверхностей многих других быстроизнашивающихся деталей.

В институте также созданы и внедрены в производство и другие высокоэффективные технологические процессы повышения ресурса работы ответственных деталей авиакосмической, автомобильной техники и др. Так, метод лазерной наплавки был внедрен в производстве минского авиаремонтного завода N° 407 ГА для восстановления деталей широкой номенклатуры. Технология лазерной наплавки прошла апробацию для штамповой и литейной оснастки на БелОМО, завода «Термопласт», ЗАО «Атлант», для восстановления рабочих поверхностей ряда деталей энергетического оборудования ТЭЦ и ГРЭС (г. Осиповичи, г. Новолукомль) и др. Переданная в свое время для применения технология лазерного упрочнения ряда деталей возвращаемого космического аппарата «Буран» позволила повысить их ресурс работы на два порядка.

Было также показано, что лазерное упрочнение рабочих кромок режущего и холодновысадочного инструмента, элементов прессоштамповой оснастки позволяет, как правило, повысить их износостойкость в 3–5 и более раз (КЗТШ, ОАО «Мотовело» и др.). Был разработан процесс легирования рабочих гравюр ковочных штампов из стали 5ХНМ, ресурс которых при этом возрастает в 3–4 раза. Показано, что метод лазерного легирования дает возможность получать на сталях и титановых сплавах слои с твердостью до ~ 68–70 HRC, а на алюминиевых сплавах – слои с твердостью до ~ 25–30 HRC. Установлено, что лазерная технология может быть эффективна для таких деталей, как резцы горнопроходческих машин (ПО «Беларуськалий») (рис. 4 в) и др.



а б в

Рис. 4. Лазерная поверхностная обработка деталей: а – участок лазерного упрочнения быстроизнашивающихся деталей гидроусилителя руля; б – процесс лазерной наплавки изношенных поверхностей коленвала дизель-локомотива; в – резцы горнопроходческих комбайнов с упрочненными рабочими поверхностями

Были также разработаны и внедрены в производство технологии и оборудование для лазерного упрочнения ряда быстроизнашивающихся деталей рулевого механизма

автомобилей. На заводе «Автогидроусилитель» (г. Борисов) создан современный участок лазерного упрочнения (рис. 4 а) с объемом выпуска упрочненных деталей до 150 тыс. в год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров ; под ред. А.Г. Григорьянца. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана.– 2006. – 664 с., ил.
2. Астапчик С.А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С.А. Астапчик, В.С. Голубев, А.Г. Маклаков. – Минск : Белорусская наука, 2008. – 252 с.
3. Астапчик С.А. Лазерные технологии: возможности и перспективы обработки деталей и инструмента / С.А. Астапчик, В.С. Голубев, А.Г. Маклаков // Тяжелое машиностроение. – 2004. – N° 2. – С. 33–37.
4. Гордиенко А.И. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева / А.И. Гордиенко, П.С. Гурченко, А.И. Михлюк, И.И. Вегера. – Минск : Белорусская наука. – 2009. – 287 с.
5. Михлюк А.И., Вегера И.И., Вишневский В.Ч. Индукционная закалка внутренних поверхностей в машиностроении: обзор, анализ, решения // Индукционный нагрев.– 2015. – N°28.– С. 44–49.
6. Вегера И.И. Исследование и разработка скоростных методов термообработки высокопрочных сталей и создание на их основе функционально-градиентных материалов // Перспективные материалы и технологии / Под общей редакцией В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ». – 2008. – С. 253–287.
7. Девойно О.Г. Технология формирования износостойких поверхностей лазерным легированием / О.Г. Девойно. – Минск : Технопринт. – 2001. – 180 с.
8. Бернацкий А. В. Лазерное поверхностное легирование стальных изделий (Обзор) / А. В. Бернацкий //Автоматическая сварка. – 2013. – N°. 12. – С. 3 – 10.
9. Калашникова М.С. Повышение служебных свойств поверхности конструкционных низкоуглеродистых сталей методом лазерного легирования: автореф. дис. канд. техн. наук / М.С. Калашникова. – Екатеринбург: Перм. гос. техн. ун-т. – 2003. – 16 с.
10. Чудина О.В. Комбинированные технологии поверхностного упрочнения конструкционных сталей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / О.В. Чудина. – М.: Моск. гос. автомобил.-дорож. ин-т. – 2003. – 46 с.
11. Брежнев А.А. Формирование модифицированных упрочненных слоев на сталях методами комплексного поверхностного легирования. Автореферат диссертации: – М., 2012.
12. Ивашко В.В., Голубев В.С., Вегера И.И. Разработка технологии упрочнения режущих элементов кормоуборочной техники с применением скоростного нагрева // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы межд. науч.–техн. конф., Минск, 27–29 марта 2006 г. / Физико-технический институт НАН Беларуси.– Минск: УП «Экоперспектива».– 2006.– С. 95–105.
13. Тарасова Т.В. Особенности формирования структуры наплавленных слоев при лазер-ной обработке / Т.В. Тарасова, С.Д. Кузьмин, В.С. Голубев // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2014. — N° 9. — С. 26–30.
14. Голубев В.С., Вегера И.И., Чернашеюс О. Особенности структуры и качества поверхностных слоев материалов при их лазерной обработке с изменением химического состава. В сб. трудов XXVI межд. н.-т. конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», Севастополь. – 2019. – с . 84–87.
15. Гуринович В.И, Голубев В.С., Соловей Н.Ф. Структурные изменения

в среднелегированных сталях при лазерной закалке и модифицировании поверхности. Вестник БарГУ, сер. Технические науки. – 2014. – В. 2. – С. 40–45.
16. Пат. 2696 BY, МПК A01D 34/01. Нож для кормоуборочных машин / Ивашко В.В., Голубев В.С., Дюжев С.А., Соловей Н.Ф., Вегера И.И., Дервоед В.А.; заявитель и патентообладатель ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси» – N° U 20050650; Заявл. 26.10.2005; Опубл. 01.02.2006 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2006. – N° 1(48).
17. Пат BY N° 4597, МПК A01D 34/01. Нож для кормоуборочных машин / Ивашко В.В., Вегера И.И., Голубев В.С.; заявитель и патентообладатель ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси» – N° U 20080072; Заявл. 05.02.2008.; Опубл. 15.05.2008 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2008.
18. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И.Н. Шило, Г.Ф. Бетеня, Л.А. Маринич, В.С. Голубев – Минск: БГАТУ. – 2010. – 320 с.

REFERENCES

1. Grigor'yanc A.G. Technological processes of laser treatment / A.G. Grigor'yanc, A.N. Shiganov, A.I. Misyurov; under red. A.G. Grigor'yanca. – Moscow : MGTU the name of N. Bauman. – 2006. – P. 664.
2. Astapchik S.A. Laser technologies are in an engineer and metal-workingness / S.A. Astapchik, V.S. Golubev, A.G. Maklakov. – Minsk : Byelorussian science. – 2008. – 252 p.
3. Astapchik S.A. Lazer technologies: possibilities and prospects of treatment of details and instrument / S.A. Astapchik, V.S. Golubev, A.G. Maklakov // Heavy engineering. – 2004. – N° 2. – P. 33–37.
4. Gordienko A.I. Treatment of wares of engineer with the use of induction treatment/ A.I. Gordienko, A.I. Gurchenko, A.I. Mikhlyuk, I.I. Vegera – Minsk : Byelorussian science. – 2009. – P. 287.
5. Mikhlyuk A.I., Vegera I.I., Vishnevskiy V.Ch. The induction tempering of internal surfaces in an engineer: review, analysis, the decisions of // The Induction heating. – 2015. – N° 28.– P. 44–49.
6. Vegera I.I. Research and development of high-speed methods of heat treatment of high-strength steels and the creation of functional-gradient materials on their basis // Advanced materials and technologies / Edited by V.V. Klubovich. – Vitebsk: Publishing house of the educational establishment "VSTU". – 2008. – P. 253–287.
7. Devoyno O.G. Technology of forming of wearproof surfaces the laser alloying / O.G. Devoyno. – Minsk : Tekhnoprint. – 2001. – P. 180.
8. Bernackiy A.V. Laser superficial alloying of steelworks (Review)/ A.V. Bernackiy // Avtomaticheskaya welding. – 2013. – N° 12. – P. 3–10.
9. Kalashnikova M.S. Increase of official properties of surface construction low-carbon the steel method of the laser alloying: avtoref. dis. kand. tekhn. sciences/ M.S. Kalashnikova. – Ekaterinburg: Permas. gos. tekhn. inst. – 2003. – P. 16.
10. Chudina O.V. Combined technologies of the superficial work-hardening of construction steel: avtoref. dis. d-r tekhn. sciences / O.V. Chudina. – Moscow: Mosc. state avtomobil. inst. – 2003. – P. 46.
11. Brezhnev A.A. Forming of the modified work-hardened layers on the steels by methods of the complex superficial alloying. Abstract of thesis of dissertation.: – Moscow. – 2012.
12. Ivashko V.V., Golubev V.S., Vegera I.I. Development of technology of work-hardening of cuttings elements of kormouborochnoy technique with the use of the speed heating // The modern methods and technologies of creation and treatment of materials: materials of

international scient.-pract. konf., Minsk, on March, 27–29, 2006 / Physico-Technical Institute of the Academy of Sciences of Belarus– Minsk: UP «Ekoperspektiva». – 2006.– P. 95–105.
13. Tarasova, T.V. Features of forming of structure of naplavlennykh layers at laser treatment / T.V. Tarasova, S.D. Kuz'min, V.S. Golubev // Consolidating technologies and coverages. – 2014. – N° 9. – P. 26–30.
14. Golubev V.S., Vegera I.I., Chernasheyus O. Features of structure and quality of superficial layers of materials at their laser treatment with the change of chemical composition. In collec. labours of XXVI international scient.-techn. conference «Engineer and technosphere of XXI age», Sevastopol. – 2019. – P. 84–87.
15. Gurinovich V.I, Golubev V.S., Solovey N.F. Structural changes in medium-alloy steels at the laser tempering and retrofitting of surface. Announcer BARGU, «Engineerings sciences». 2014. – V.2. – P. 40–45.
16. Pat. 2696 BY, MPK A01D 34/01. Knife for kormouborochnykh machines / Ivashko V.V., Golubev V.S., Dyuzhev. S.A., Solovey N.F., Vegera I.I., Dervoed V.A.; declarant and patentoobladatel' BEND the «Physico-Technical Institute of the Academy of Sciences of Belarus» – N° U 20050650; Declared 26.10.2005; Published 01.02.2006 // Official bulletin / State patent department of Belarus. – 2006. – N° 1(48).
17. Pat. 4597 BY, MPK A01D 34/01. Knife for kormouborochnykh machines / Ivashko V.V., Vegera I.I., Golubev V.S.; declarant and patentoobladatel' BEND the «Physico-Technical Institute of the Academy of Sciences of Belarus» – N° U 20080072; Declared 05.02.2008.; Published 15.05.2008 // Official bulletin / State patent department of Belarus. – 2008.
18. Increase of capacity of details of workings organs of agricultural mashin/ I.N. Shilo, G.F. Betenya, L.A. Marinich, V.S. Golubev. – Minsk: BGATU. – 2010. – P. 320.

Статья поступила в редакцию 01.02.2021 г.

УДК 537.622.4:621.318.1

СПЕЦИАЛЬНЫЕ МАГНИТЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРАКТИКА ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

[1]А.К. Вечер, [1]Г.А. Говор, [1]О.Ф. Демиденко, [2]И.И. Вегера, [2]А.В. Зизико

[1]Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,
[2]Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

Исследованы основные типы магнитных материалов, применяемых при индукционном нагреве, определены наиболее перспективные из них. Выполнен комплекс исследований свойств, позволивший разработать технологии нагрева и получить необходимый равномерный контурный нагрев цилиндрических отверстий, плоских и фасонных поверхностей.

Ключевые слова: магнитомягкий композиционный материал, микропорошок железа, оксидное изоляционное покрытие, магнитные свойства, удельное электросопротивление, электромагнитные потери

SPECIAL MAGNETIC MATERIALS AND EXPERIENCE OF USING THEM FOR HIGHFREQUENCY INDUCTION HEATING

[1]A.K. Vetcher, [1]G.A. Govor, [1]O.F. Demidenko, [2]I.I. Vegera, [2]A.V. Zizika

[1]Scientific and Practical Materials Research Center
of the National Academy of Sciences of Belarus,
[2]Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

The main types of magnetic materials used in induction heating have been investigated, and the most promising of them have been identified. A set of studies of properties was carried out, which made it possible to correctly develop the heating technology and obtain the necessary uniform contour heating of cylindrical holes, flat and shaped surfaces.

Keywords: soft magnetic composite material, iron micropowder, oxide insulating coating, magnetic properties, electrical resistivity, electromagnetic losses

Введение

Индукционный нагрев поверхностей, осуществляемый внешним электромагнитным полем индуктора с точки зрения расчетов, моделирования и практической реализации значительно сложнее нагрева любых поверхностей внутренним полем. Из-за кольцевого эффекта и эффекта близости, при индукционном нагреве внешним полем снижается магнитный поток, величина магнитной индукции, а вследствие и плотность тока в зоне нагрева. Что в свою очередь уменьшает удельную мощность, передаваемую в деталь.

Для нагрева детали внешним полем в конструкции индуктора применяются магнитопроводы, с целью компенсации кольцевого эффекта и «выдавливания» магнитного поля на поверхность детали. Магнитопровод – тело, обладающее большой магнитной проницаемостью, которое применяют в практике индукционного нагрева для перераспределения магнитных полей индуктирующего провода. В качестве магнитопровода применяются магнитомягкие материалы. К ним относятся в первую очередь электротехнические железо, трансформаторные стали, ферриты различного состава (Mn–Zn, Ni–Zn), аморфные металлы (Co, Fe), пермаллои, нанокристаллические механические сплавы. Главной характеристикой таких материалов является магнитная индукция насыщения. Данная величина характеризует «энергоемкость» материала, т.е. при бесконечном росте напряженности магнитного поля, значение магнитной индукции в магнитопроводе не превысит величину, определяемую свойствами материала.

Если поместить медный проводник прямоугольного сечения с переменным током в паз магнитопровода, то магнитный поток будет стремиться пройти по пути меньшего сопротивления, т.е. по магнитопроводу, где выше магнитная проницаемость. Соответственно ЭДС самоиндукции и сопротивление тока будет больше на участках проводника, прилегающих ко дну паза магнитопровода. На участках, лежащих на поверхности неохваченной магнитопроводом, ЭДС самоиндукции и сопротивление тока меньше. Следовательно, произойдет перераспределение плотности тока по сечению проводника, и ток будет стремиться протекать по стороне проводника, не контактирующей с магнитопроводом.

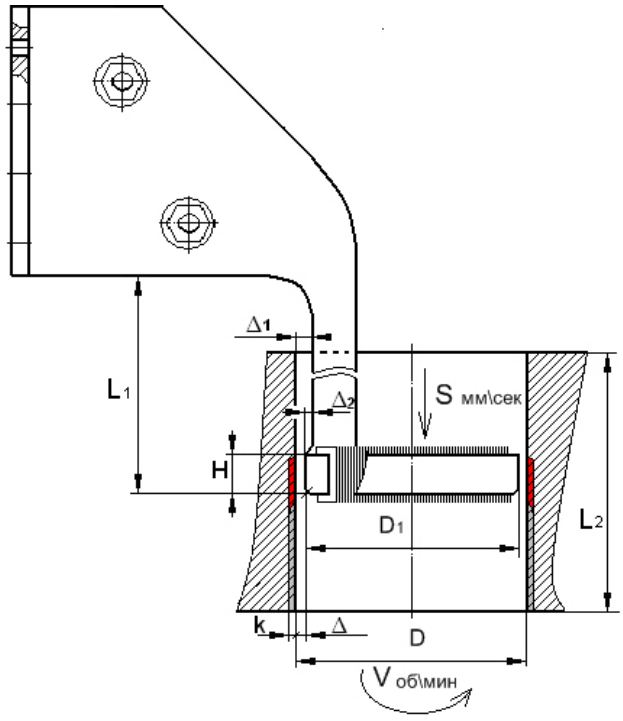


Рис. 1. Одновитковой индуктор со спрейером и магнитопроводом для закалки внутренних цилиндрических отверстий

Таким образом, создание вокруг проводника разомкнутой магнитной цепи (магнитопровода) приводит к перераспределению тока по сечению проводника. В индукционном витке, свернутом в виде кольца, можно заставить ток протекать не по внутренней, а по внешней стороне витка, надев на него П-образный магнитопровод, открытой стороной обращенный к внешней части витка (рис. 1).

Индукторы с магнитопроводом в настоящее время находят применения не только для нагрева внутренних отверстий, но и для плоских, зубчатых и фасонных поверхностей, поверхностей сложной геометрической формы. Однако применение индукторов и технологий поверхностного упрочнения с применением нагрева внешним электромагнитным полем сдерживается проблемами разработки материалов для магнитопроводов и индукторов оптимальной конструкции, позволяющих создавать равномерное температурное поле на поверхности обрабатываемой детали. Так как именно от равномерности поля зависит конфигурация, глубина и твердость получаемого упрочненного слоя.

В связи с этим разработка и производство магнитных материалов с низкими потерями энергии при перемагничивании на сегодняшний день является одной из актуальных проблем промышленности. Несмотря на то, что исследования и разработка таких материалов ведутся еще с начала прошлого века, изучение механизма намагничивания–перемагничивания и повышения качества этих материалов является актуальным и сейчас [1–5]. Это связано с тем, что магнитные материалы широко используются в различных электротехнических устройствах (генераторах, двигателях, измерительных установках, катушках индуктивности и др.).

По составу, свойствам и назначению различают три группы магнитных материалов [1]:

– магнитомягкие материалы (МММ);

– магнитотвердые материалы (МТМ);

– материалы специального назначения (МСН).

Основой для деления материалов на магнитомягкие и магнитотвердые является значение коэрцитивной силы H_c. Для МММ H_c = (0,4–800) А/м, а для МТМ – (4–800) кА/м.

Материалы специального назначения выделены в отдельную группу в связи с их особыми свойствами и областями применения. К ним относятся ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), ферриты СВЧ, магнитострикционные и термомагнитные материалы.

МММ представляют собой весьма широкий набор материалов как по составу и свойствам, так и по назначению. Обобщенная классификационная схема представлена на рис. 2 [3].

Рис. 2. Классификация магнитомягких материалов

МММ удовлетворяют требованиям, согласно которым материал должен [4]:

– без потерь, легко намагничиваться и размагничиваться, обладать узкой петлей гистерезиса, т.е. малой H_c и большими $\mu_{нач}$ и μ_{max};

– иметь высокую индукцию насыщения B_s, т.е. обеспечивать прохождение максимального магнитного потока через единичное сечение магнитопровода, что уменьшает его габариты и вес;

– обеспечивать малые потери при работе в переменных полях, что снижает температуру нагрева изделия, габариты и вес, повышает КПД и рабочую индукцию;

– удовлетворять дополнительным требованиям, связанным с механическими свойствами, стабильностью во времени и при разных температурах, низкой стоимостью.

Наиболее широко применяемыми магнитомягкими материалами являются технически чистое железо, листовая электротехническая сталь, сплавы Fe-Ni с различным содержанием Ni, называемые пермаллоями, сплавы Fe-Si-A1, называемые альсиферами. К магнитомягким материалам относится технически чистое, электротехническое и карбонильное железо [6–10]. Наиболее применимой является низкоуглеродистая сталь – разновидность технически чистого железа. На основе карбонильного железа прессованием изготавливают ВЧ магнитные сердечники.

У чистого железа малое удельное объемное сопротивление ρ_v, поэтому оно применяется редко. Электролитическое железо также редко применяется ввиду высокой стоимости [6].

Кремнистые стали представляют собой твердый раствор кремния в железе. Введение Si производят с целью повышения ρ_v. При этом возрастает μ и уменьшается H_c. Увеличение процентного содержания Si снижает механические свойства материала, поэтому обычно его доля не превышает 5 %.

На основе кремнистых сталей изготавливают электротехнические стали различных марок, подразделяемых по содержанию Si, по способу изготовления, магнитным и электрическим свойствам. Они обладают высокой индукцией, малыми значениями H_c и потерями на гистерезис, поэтому их широко применяют для изготовления статоров и роторов электрических машин, сердечников силовых трансформаторов, магнитопроводов различных аппаратов и устройств [7]. Магнитопроводы из электротехнических сталей марок 2412, 3411, 3413, 3425 и д. р. широко используются для индукторов, работающих на частотах до 8 кГц. Основными свойствами влияющими на долговечность магнитопровода являются наличие термостойкого электроизоляционного покрытия с сопротивлением пробою 8 Ом/см^2 и сохранение свойств при высоких температурах 800–1000 °С. Для недопущения перегрева магнитопровода в конструкции индукторов обязательно предусматривают его принудительное интенсивное охлаждение.

Низкокоэрцитивные сплавы – пермаллои – являются сплавами Fe и Ni с легирующими добавками хрома, кобальта, кремния, меди, марганца, которые изменяют количественные и качественные характеристики материала, а именно повышают ρ_v и μ_{max}, улучшают механические свойства и температурную стабильность. Значительный интерес представляет сплав супермаллой, обладающий высокими магнитными свойствами в слабых полях [8].

Пермаллои выпускают в виде лент, прутков и подвергают специальной термообработке для получения и стабилизации необходимых магнитных свойств. Основные области их применения – это измерительные приборы, сердечники малогабаритных силовых и импульсных трансформаторов и дросселей, магнитные экраны, магнитные усилители и бесконтактные реле, катушки индуктивности и т.д.

Недостатками пермаллоев являются высокая чувствительность к механическим воздействиям, низкое значение ρ_v и зависимость магнитной проницаемости от частоты [9, 10]. Поэтому на повышенных частотах предпочтительнее низконикелевые пермаллои.

Алъсиферы – тройные сплавы Al-Si-Fe, обладающие хорошими магнитными свойствами. Однако они отличаются высокой хрупкостью, твердостью и теряют свойства при механической обработке. Поэтому детали из них изготавливают литьем. Альсиферы используют в виде порошков для изготовления ВЧ сердечников методом прессования [11].

Магнитопроводы из пермаллоевых и альсиферовых лент вырубленные в виде П-образных пластин широко используются для индукторов, работающих на частотах в диапазоне 10–66 кГц. Основными фактором влияющими на долговечность данных магнитопроводов является обязательное принудительное интенсивное охлаждение.

Ферриты (оксиферы) представляют собой системы из оксидов железа и оксидов двухвалентных, а иногда и одновалентных металлов. Общая формула ферритов $MeO{\cdot}Fe_2O_3$, где Ме – символ двухвалентного металла. Обладая достаточно высокими магнитными свойствами, ферриты имеют высокое значение удельного сопротивления, поскольку это смесь оксидов. Поэтому они имеют малые потери и широко применяются на повышенных и высоких частотах.

Процентный состав оксидов играет существенную роль в получении необходимых магнитных свойств [12–14]. По сути своей ферриты представляют собой магнитную керамику и технологический процесс их изготовления весьма схож с процессом получения керамики.

Основными операциями при изготовлении ферритов являются:

– приготовление шихты (смеси) по весовым компонентам; первый помол для получения однородной массы; предварительный обжиг при температуре меньшей, чем при окончательном обжиге;

– второй помол для улучшения степени однородности массы;

– прессование, выдавливание стержней, трубок, а также литье под давлением для изготовления мелких деталей с использованием пластификаторов;

– окончательный отжиг при температуре 1100–1400 °С в окислительной среде чтобы избежать восстановления оксидов металлов.

Из-за сложности технологического процесса получение заданных свойств и их воспроизводимость требуют, как правило, изготовления предварительной партии, по которой корректируется состав смеси и сам техпроцесс [15].

По свойствам и применению ферриты делятся на:

– магнитомягкие низкочастотные ферриты с $f_{гр}$ = 0,2–20 МГц и высокочастотные с $f_{гр}$ = 20–300 МГц;

– магнитотвердые ферриты;

– ферриты с ППГ;

– ферриты СВЧ.

Чем выше начальная магнитная проницаемость, тем ниже граничная частота $f_{гр}$. На низких частотах потери на гистерезис и вихревые токи малы и $tg\ \delta$ определяется в основном диэлектрическими потерями оксидов. На высоких частотах потери определяются всеми составляющими потерь, однако, основной вклад вносят потери в диэлектрике.

Магнитомягкие ферриты применяются для изготовления сердечников трансформаторов, катушек индуктивности, фильтров, магнитных антенн и отклоняющих систем телевизоров, статоров и роторов ВЧ микродвигателей и т. д.

Магнитопроводы из ферритов вырезаются на специальных станках с охлаждением СОЖ либо прессуются сразу в специальный размер. Они используются для индукторов работающих на частотах в диапазоне 10–150 кГц. Основными фактором влияющими на долговечность данных магнитопроводов является жесткая их фиксация на индуцирующем токопроводе так как ферриты подвержены хрупкому разрушению из-за ударов и вибрации в магнитном поле, кроме того следует отметить что ферриты имеют достаточно низкую стойкость к хрупкому разрушению при постоянных теплосменах «нагрев-охлаждение», а это основное условие работы при индукционной закалке.

Для разработки и создания нового поколения высокоэффективных электротехнических изделий необходимо использовать совершенно новый класс магнитомягких материалов с улучшенными характеристиками [18]. Такие материалы должны соответствовать целому комплексу требований: высокие значения индукции насыщения, низкие электромагнитные потери, требуемая механическая прочность, термостабильность и устойчивость к резким теплосменам, хорошая обрабатываемость резаньем, точением, фрезерованием и низкая стоимость. Для снижения массогабаритных характеристик устройства (индуктора) должны быть способны работать на высоких частотах вплоть до 250 кГц.

Таким требованиям удовлетворяют только композиционные материалы на основе металлических порошков с изолирующими покрытиями. Такие материалы с необходимым набором эксплуатационных характеристик в последнее время активно разрабатываются и исследуются в ведущих научных центрах мира. Рациональный выбор методик получения композитов открывает дополнительные возможности их практического применения. Для этого при синтезе важно обеспечить контролируемый химический состав и структуру компонентов, что в свою очередь гарантирует требуемые физические и функциональные свойства.

Параметры технически чистого железа в основном удовлетворяют требованиям к магнитомягким материалам для изготовления новых электротехнических устройств, но при этом у них очень высокие электромагнитные потери, и как следствие низкий к.п.д., особенно при работе в переменных полях на высоких частотах. Чтобы обеспечить снижение потерь, необходимо нанести изолирующие слои на отдельные частицы железа. Проводится обработка порошка, далее из него методом прессования изготавливаются готовые сердечники и магнитопроводы. Конечные свойства полученных материалов зависят от типов исходных порошков и способов их обработки.

В ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» разработана специальная методика нанесения изолирующих покрытий на частицы металлов и последующего изготовления из него композиционных магнитопроводов. Далее приводятся сравнительные исследования широко применяемого материала Ferrotron 559H и специального магнитомягкого материала на основе железного порошка ABC100.30.

Методом рентгенофазового анализа в Cu*K*α-излучении при комнатной температуре проведено исследование кристаллической структуры сплава Ferrotron 559H и порошка SMC на основе ABC100.30. Установлено, что все образцы имеют кубическую ОЦК-структуру α-Fe пространственной группы Im-3m. Наблюдаемые дифракционные пики соответствуют отражениям от (110), (200), (211) и (220) плоскостей α-Fe. Диффузный пик в диапазоне углов 15–35° (рис. 3) связан с присутствием неупорядоченного раствора Fe+FeF. В случае порошка SMC на основе ABC100.30 (рис. 4 а) диффузный пик связан с неупорядоченным раствором $Fe+P_2O_5$. На рентгенограмме SMC материала после спекания при 600 °C в течение 1 часа (рис. 4 б) такого пика не наблюдается.

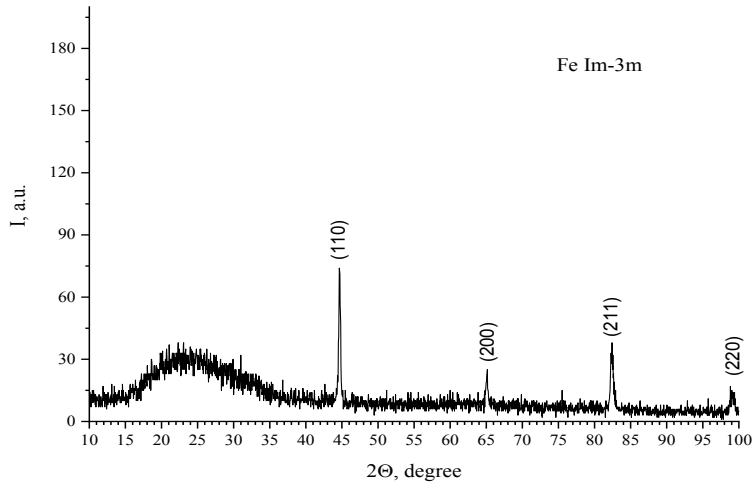


Рис. 3. Рентгенограмма Ferrotron 559H

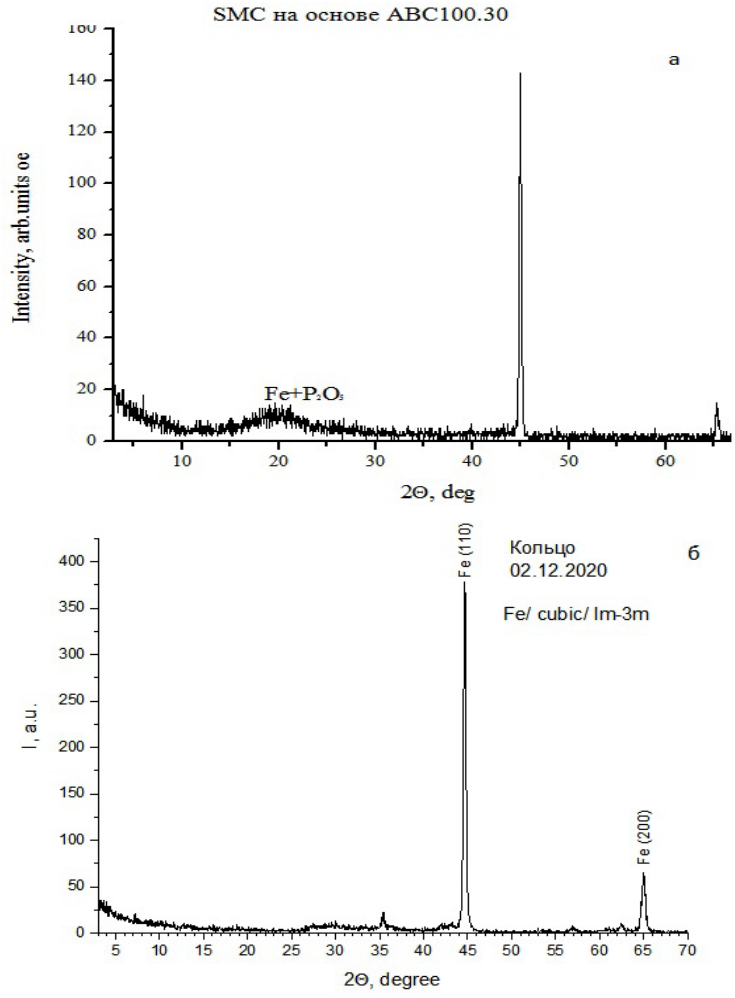
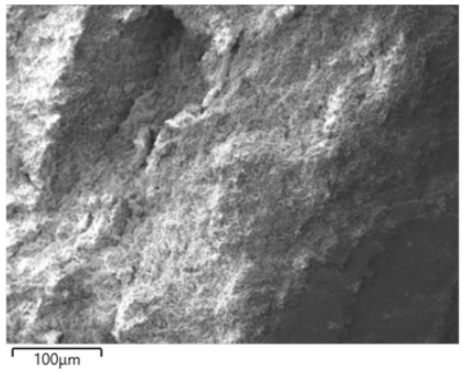


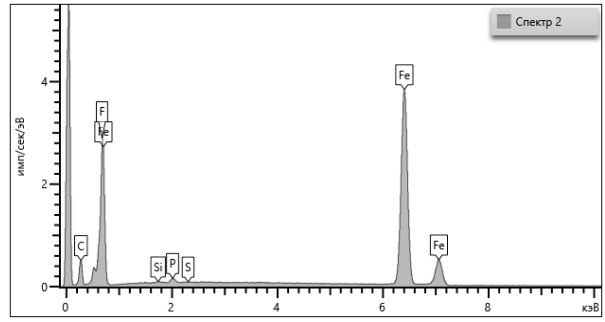
Рис. 4. Рентгенограмма порошка SMC на основе ABC100.30 до спекания (а) и после спекания при 600 °C в течение 1 часа (б)

На рис. 5–11 и табл. 1 приведены результаты сравнительных испытаний магнитомягкого материала SMC на основе железного порошка ABC100.30, разработанного в ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» и материала Fenotron 553H, который широко используется при производстве магнитопроводов в индукторах.

Как показали результаты испытаний по основным магнитным параметрам и потерям на перемагничивание материал SMC на основе железного порошка ABC100.30 не уступает, а по многим параметрам и превосходит Fenotron 553H.

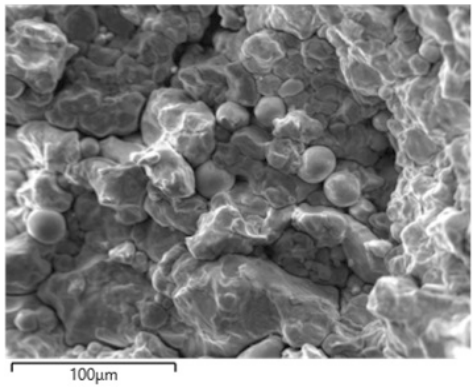
В связи с этим на основе данного порошка были изготовлены магнитопроводы различной формы для индукторов, работающих в диапазоне высоких частот 20–100 кГц при токовых нагрузках на генераторах частоты до 4000 А и мощности до 200 кВт.

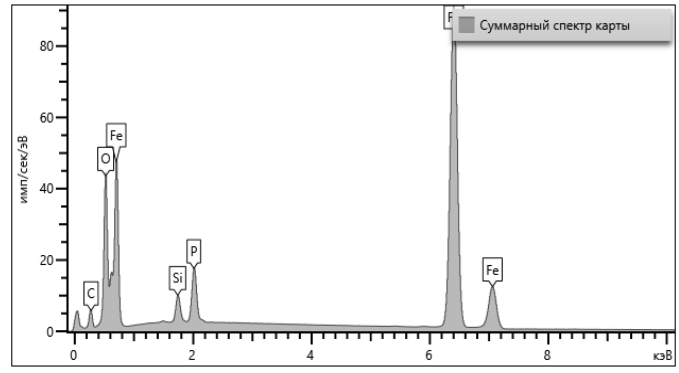




Спектр 2								
Элемент	Тип линии	Условная концентрация	Отношение k	Вес, %	Сигма вес, %	Метка эталона	Предустановленный эталон	Дата калибровки эталона
C	K-серия	4,83	0,04827	15,33	0,35	C Vit	Да	
F	K-серия	45,59	0,08951	11,09	0,17	CaF_2	Да	
Si	K-серия	0,09	0,00073	0,09	0,03	SiO_2	Да	
P	K-серия	0,72	0,00403	0,43	0,04	GaP	Да	
S	K-серия	0,03	0,00022	0,02	0,03	FeS_2	Да	
Fe	K-серия	99,71	0,99712	73,04	0,34	Fe	Да	
Всего:				100,00				

Рис. 5. Данные по микроскопическому исследованию поверхности материала Ferrotron 559H





Суммарный спектр карты					
Элемент	Тип линии	Условная концен-трация	Вес, %	Сигма вес, %	Атом., %
C	K-серия	2,49	7,83	0,06	21,50
O	K-серия	31,47	14,60	0,04	30,10
Si	K-серия	1,93	1,67	0,01	1,96
P	K-серия	6,50	3,41	0,01	3,63
Fe	K-серия	113,98	72,49	0,06	42,81
Всего:			100,00		100,00

Рис. 6. Данные по микроскопическому исследованию SMC материала на основе ABC100.30

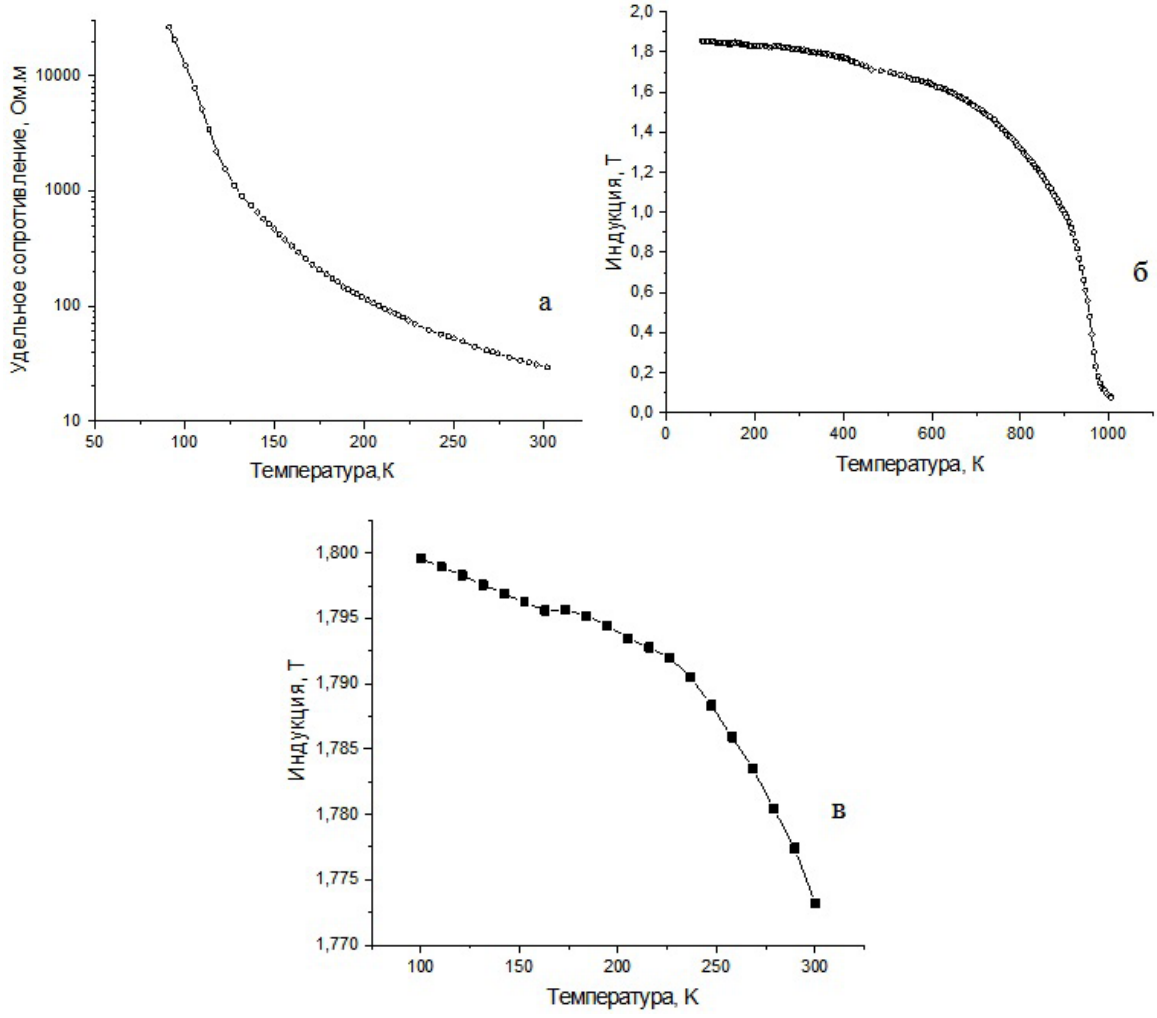


Рис. 7. Температурная зависимость магнитной индукции SMC материала на основе ABC100.30:
а – в нулевом магнитном поле; б – в поле 800 кА/м;
в – в области низких температур и в магнитном поле 5600 кА/м

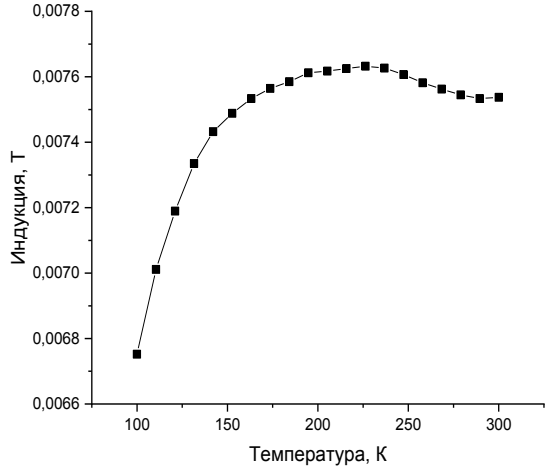


Рис. 8. Температурная зависимость магнитной индукции SMC материала на основе ABC100.30 в области низких температур и в магнитном поле 800 А/м

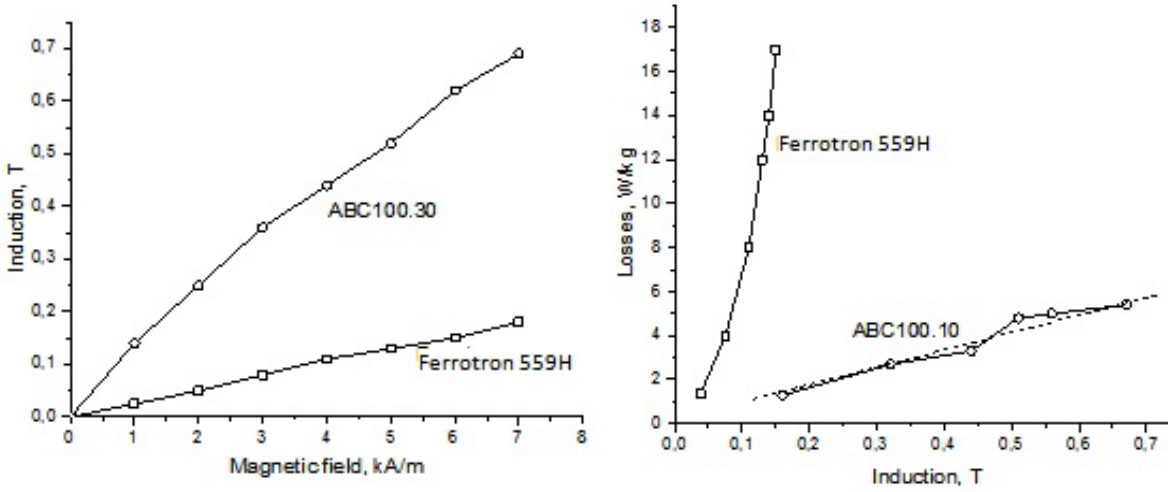


Рис. 9. Кривые намагничивания и потерь на частоте 1 кГц материала Ferrotron 559H и SMC на основе ABC100.30 в магнитных полях до 10 кА/м

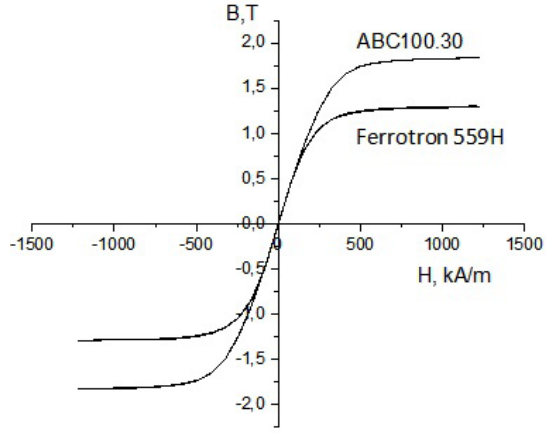


Рис. 10. Кривые намагничивания материала Ferrotron 559H и SMC на основе железного порошка ABC100.30 в сильных магнитных полях

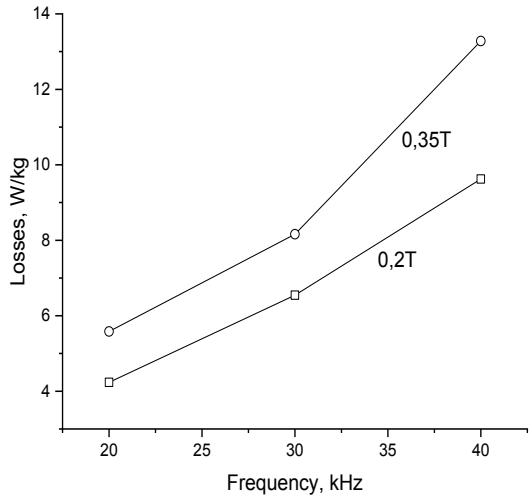


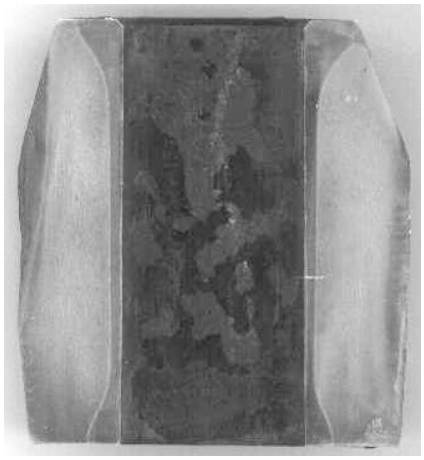
Рис. 11. Потери SMC на основе ABC100.30 изоляция 300 < 0,1 [10(7/300 HP + 5Sil)] × 6 + 5V в зависимости от частоты при значениях индукции 0,2 и 0,35 Тесла

Табл. 1

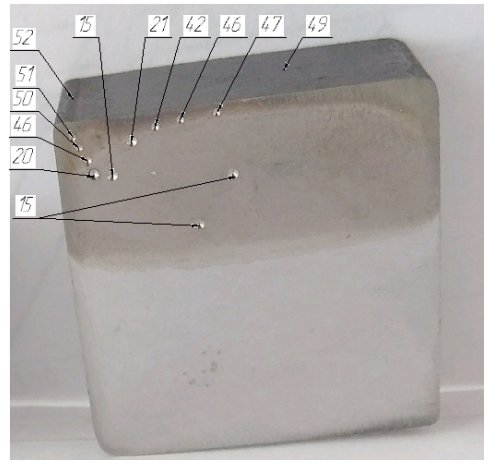
Сравнительные данные Ferrotron 559H и SMC на основе железного порошка ABC100.30

Основные параметры:	Ferrotron 559H	SMC
Индукция насыщения, Т	1,25	1,8
Магнитная проницаемость, отн. ед.	5–6	50–60
Предельное магнитное поле, кА/м	300	400
Удельное сопротивление, Ом·см	100	50–100
Коэрцитивная сила, А/м	1000	50–60

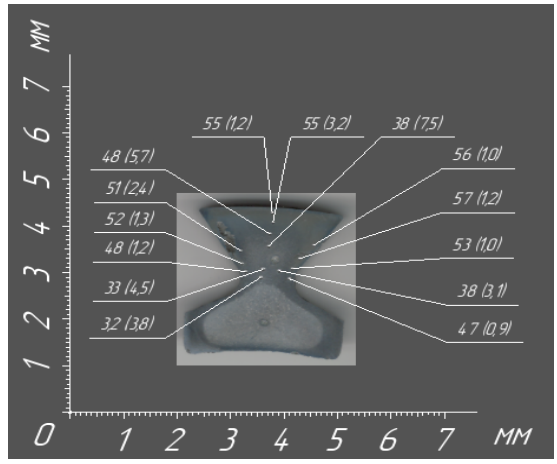
С применением специальных индукторов с магнитопроводом проведена обработка внешним электромагнитным полем внутренних отверстий, плоских и фасонных поверхностей. В результате ТВЧ обработки на деталях получены равномерные по глубине слои с высокой твердостью (рис. 12)



а



б



в

Рис. 12. Макроструктура упрочненного слоя различных деталей после обработки внешним электромагнитным полем: а – внутреннее отверстие, б – плоская поверхность, в – фасонная поверхность

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что композиционные магнитомягкие материалы на основе железного порошка ABC100.30 со специальными покрытиями могут эффективно использоваться при производстве магнитопроводов различной конфигурации в индукторах, предназначенных для поверхностной обработки деталей внешним электромагнитным полем. Термообработка внутренних отверстий, плоских и фигурных поверхностей индукторами с магнитопроводами из композиционных магнитомягких материалов показала, что на поверхности деталей удается сформировать равномерный по глубине закаленный слой с высокой твердостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shokrollahi H. Soft magnetic composite materials (SMCs) / H. Shokrollahi, K. Janghorban // J. Mater. Process. Technol. – 2007. – Vol. 189. – P. 1–12.
2. Development of soft magnetic composites for low-loss applications / I.P. Gilbert [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2002. – Vol. 242/245. – P. 232–234.
3. Snelling, E.C. Soft Ferrites: Properties and Applications / E.C. Snelling // Mendham, NJ : PSMA. – 2005. – 385 p.
4. Magnetic properties of Fe-based soft magnetic composite with insulation coating by resin bonded Ni-Zn ferrite nanofibres / Z. Birčáková [et al.] // J. of Mag. and Mag. Mater. – 2019. – Vol. 485. – P. 1–7.
5. Soft magnetic composite particles of reduced iron coated with poly(p-xylylene) via chemical vapor deposition polymerization / P. Hongting [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2010. – Vol. 361. – N° 1–3. – P. 62–65.
6. Iron-borosilicate soft magnetic composites: The correlation between processing parameters and magnetic properties for high frequency applications / T. Gheiratmand [et al.] // J. of Mag. and Mag. Mat. – 2017. – Vol. 429. – P. 241–250.
7. Миницкий А.В. Основные тенденции развития порошковых магнитомягких материа-

лов / А.В. Миницкий, Н.В. Миницкая, О.В. Власова // Процессы механической обрабоки в машиностроении. – 2010. – Вып. 9. – С. 3–16.
8. Leary A.M. Soft Magnetic Materials in High-Frequency, High-Power Conversion Applica-tions / A.M. Leary, P.R. Ohodnicki, M.E. McHenry // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. – 2012. – Vol. 64. – P. 772–781.
9. Hilzinger R. Magnetic materials : fundamentals, products, properties, applications / R. Hilzinger, W. Rodewald // Hanau : Vacuumschmelze. – 2013. – 608 p.
10. Multidisciplinary Design Analysis and Optimization of a PM Transverse Flux Machine With Soft Magnetic Composite Core / L. Gang [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. – 2015. – Vol. 51. – N° 11. – P. 1–4.
11. Chih-Wen C. Magnetism and Metallurgy of Soft Magnetic Materials / C. Chih-Wen // Ed. Courier Corporation. – 2013. – 592 p.
12. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии : 2-е изд. / А.И. Гусев. – М.: Физматлит. – 2007. – 416 с.
13. Nanomaterials and nanotechnologies: methods of analysis and control / I.V. Gmoshinski [et al.] // Russian Chemical Reviews. – 2013. – Vol. 82. – N° 1. – P. 48–76.
14 Фиш Г.Э. Магнитомягкие материалы / Г.Э. Фиш // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. – 1990. – Т. 78. – N° 6. – С. 60–86.
15. Способ изготовления композиционного магнитомягкого материала / Г.А. Говор, В.И. Митюк, А.В. Тамонов : Патент RU 2465669 C1. – 2012. – Опубл. 2012.10.27.
16. Gheiratmand T. Finemet nanocrystalline soft magnetic alloy: Investigation of glass forming ability, crystallization mechanism, production techniques, magnetic softness and the effect of replacing the main constituents by other elements / T. Gheiratmand, H.R. Madaah Hosseini // J. of Mag. and Mag. Mater. – 2016. – Vol. 408. – P. 177–192.
17. Исследование влияния условий синтеза на магнитные характеристики композиционных материалов на основе порошков железа / А.К. Вечер, Г.А. Говор, К.И. Янушкевич, У.Т. Бердиев, Ф.Ф. Хасанов // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65. – N° 1. – С. 17–24.
18. Vetcher A. Iron powders with insulating layers: structure and magnetic properties / A. Vetcher, K. Yanushkevich // Material science «Nonequilibrium phase transformations» : Proceedings of V International scientific conference, Varna, Bulgaria, 09-12 September 2019. – Varna. – 2019. – P. 27–29.

REFERENCES

1. Shokrollahi H. Soft magnetic composite materials (SMCs) / H. Shokrollahi, K. Janghorban // J. Mater. Process. Technol. – 2007. – Vol. 189. – P. 1–12.
2. Development of soft magnetic composites for low-loss applications / I.P. Gilbert [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2002. – Vol. 242/245. – P. 232–234.
3. Snelling E.C. Soft Ferrites: Properties and Applications / E.C. Snelling // Mendham, NJ : PSMA. – 2005. – 385 p.
4. Magnetic properties of Fe-based soft magnetic composite with insulation coating by resin bonded Ni-Zn ferrite nanofibres / Z. Birčáková [et al.] // J. of Mag. and Mag. Mater. – 2019. – Vol. 485. – P. 1–7.
5. Soft magnetic composite particles of reduced iron coated with poly(p-xylylene) via chemical vapor deposition polymerization / P. Hongting [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2010. – Vol. 361. – N° 1–3. – P. 62–65.
6. Iron-borosilicate soft magnetic composites: The correlation between processing parameters

and magnetic properties for high frequency applications / T. Gheiratmand [et al.] // J. of Mag. and Mag. Mat. – 2017. – Vol. 429. – P. 241–250.
7. Minickij A.V. Osnovnye tendencii razvitija poroshkovyh magnitomjagkih materialov [Main trends in the development of soft magnetic powder materials] / A.V. Minickij, N.V. Minickaja, O.V. Vlasova // Processy mehanicheskoj obraboki v mashinostroenii. – 2010. – V. 9. – P. 3–16. (in Russian)
8. Leary A.M. Soft Magnetic Materials in High-Frequency, High-Power Conversion Applica-tions / A.M. Leary, P.R. Ohodnicki, M.E. McHenry // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. – 2012. – Vol. 64. – P. 772–781.
9. Hilzinger R. Magnetic materials : fundamentals, products, properties, applications / R. Hilzinger, W. Rodewald // Hanau : Vacuumschmelze. – 2013. – 608 p.
10. Multidisciplinary Design Analysis and Optimization of a PM Transverse Flux Machine With Soft Magnetic Composite Core / L. Gang [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. – 2015. – Vol. 51. – N° 11. – P. 1–4.
11. Chih-Wen C. Magnetism and Metallurgy of Soft Magnetic Materials / C. Chih-Wen // Ed. Courier Corporation. – 2013. – 592 p.
12. Gusev A.I. Nanomaterialy, nanostruktury, nanotehnologii [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology]: 2-e izd. / A.I. Gusev. – M.: Fizmatlit. – 2007. – 416 p. (in Russian)
13. Nanomaterials and nanotechnologies: methods of analysis and control / I.V. Gmoshinski [et al.] // Russian Chemical Reviews. – 2013. – Vol. 82. – N° 1. – P. 48–76.
14. Fish G.E. Magnitomjagkie materialy / G.E. Fish // Trudy instituta inzhenerov po jelektrotehnike i radiojelektronike [Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers]. – 1990. – T. 78. – N° 6. – P. 60–86. (in Russian)
15. Sposob izgotovlenija kompozicionnogo magnitomjagkogo materiala [Method of manufacturing a composite soft magnetic material] / G.A. Govor, V.I. Mitjuk, A.V. Tamonov : Patent RU 2465669 C1. – 2012. – Publ. 2012.10.27. (in Russian)
16. Gheiratmand T. Finemet nanocrystalline soft magnetic alloy: Investigation of glass forming ability, crystallization mechanism, production techniques, magnetic softness and the effect of replacing the main constituents by other elements / T. Gheiratmand, H.R. Madaah Hosseini // J. of Mag. and Mag. Mater. – 2016. – Vol. 408. – P. 177–192.
17. Issledovanie vlijanija uslovij sinteza na magnitnye harakteristiki kompozicionnyh materialov na osnove poroshkov zheleza [Study of the effect of synthesis conditions on the magnetic characteristics of composite materials based on iron powders] / A.K. Vecher, G.A. Govor, K.I. Janushkevich, U.T. Berdiev, F.F. Hasanov // Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tjehn. navuk. – 2020. – T. 65. – N° 1. – P. 17–24. (in Russian).
18. Vetcher A. Iron powders with insulating layers: structure and magnetic properties / A. Vetcher, K. Yanushkevich // Material science «Nonequilibrium phase transformations» : Proceedings of V International scientific conference, Varna, Bulgaria, 09-12 September 2019. – Varna, 2019. – P. 27–29.

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 03.02.2021 г.

УДК 621.31

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ В РАСПЛАВЕ ПРИ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ С СИСТЕМОЙ ПИТАНИЯ ИМПУЛЬСНЫМИ ТОКАМИ

[1, 2]Э.Р. Винтер, [1, 2]В.Н. Тимофеев

[1]Сибирский федеральный университет,
[2]ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики»,
г. Красноярск, Российская Федерация

Актуальной задачей при производстве многокомпонентных сплавов является разработка и исследование режимов магнитогидродинамического (МГД) перемешивания, которые позволяют достичь новых технологических эффектов, например, таких как гомогенизация микронеоднородностей. Одним из перспективных способов обеспечения таких условий перемешивания является применение несинусоидального периодического тока заданной формы. В статье представлены результаты численного моделирования электромагнитного перемешивателя с несинусоидальным источником питания. Проведен анализ поведения электромагнитных сил при различных параметрах источника питания. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с характеристиками электромагнитного перемешивателя с синусоидальной системой питания.

Ключевые слова: перемешивание жидких металлов, электромагнитное перемешивание, импульсное магнитное поле, импульсная магнитная сила

IN-MELT ELECTROMAGNETIC FORCES AT MHD-STIRRING WITH PULSED CURRENT SUPPLY

[1, 2]E.R. Vinter, [1, 2]V.N. Timofeev

[1]Siberian federal university,
[2]LLC «RPC Magnetic hydrodynamics»,
Krasnoyarsk, Russian Federation

The crucial task in production of multi-component alloys is a development and study of EM stirring conditions which make it possible to achieve new process effects such as microinhomogeneous homogenization. One of the advanced ways to provide such stirring conditions is the supply of the non-sine periodic current of the given waveform to inductor coils. The paper presents the results of numerical simulation of a magnetohydrodynamic stirrer with non-sinusoidal power supply. The analysis of the behavior of electromagnetic forces

at various power supply parameters is carried out. A comparative analysis of the obtained results with the characteristics of the EM stirrer with a sinusoidal power supply system is carried out.

Keywords: stirring of liquid metals, electromagnetic stirring, pulsed magnetic field, pulsed magnetic force

E-mail: evinter@sfu-kras.ru

Введение

В настоящее время область применения металлургической продукции интенсивно расширяется. В частности, это касается продукции из алюминиевых сплавов, которые сегодня находят широкое применение в авиастроительной области, в области аддитивных технологий и в других сферах. Вместе с тем одним из наиболее эффективных способов повышения эффективности металлургического оборудования является применение МГД устройств [1]. Так в современном металлургическом производстве широко распространенной технологией является МГД перемешивание жидкого металла в ванне печи. Использование МГД перемешивателей позволяет автоматизировать процесс гомогенизации, сократить время приготовления и уменьшить расход энергии на производство качественных сплавов [2, 3].

В области приготовления многокомпонентных сплавов актуальной задачей является разработка и исследование режимов МГД-перемешивания расплава, при которых можно достичь новых технологических эффектов, таких как гомогенизация на уровне микронеоднородностей, МГД-резонанс [4], резонанс свободной поверхности [5]. Одним из перспективных способов организации таких режимов перемешивания является питание обмотки индуктора несинусоидальным периодическим током заданной формы.

В настоящее время проведен ряд исследований по эффективности применения несинусоидальных импульсных электромагнитных полей в установках для перемешивания жидкого металла. В общем, установки МГД-перемешивания с несинусоидальным питанием можно разделить на две группы. К первой группе относятся установки, в которых форма питающего тока представляет собой последовательные импульсы синусоидального тока, модулируемые частотой значительно ниже основной. Такой способ питания применяется для установок с промышленной частотой питания. Ко второй группе относятся установки, в которых форма питающего тока представляет собой несинусоидальную периодическую функцию заданной формы. Форма питающего тока может представлять собой однополярные прямоугольные импульсы, знакопеременные прямоугольные импульсы или треугольные импульсы. Такой способ питания применяется в установках перемешивания низкой частоты (0,5–5,0 Гц).

Для установок МГД-перемешивания различной конфигурации, относящихся кпервой группе, был проведен ряд численных и экспериментальных исследований [4–6]. В данных работах было показано определенное преимущество применения в качестве питания последовательных модулированных импульсов синусоидального тока. В работе [4] показано, что такой способ питания позволяет добиться так называемого МГД-резонанса, что приводит к интенсификации тепломассопереноса в расплаве.

Для установок МГД-перемешивания с питающим несинусоидальным периодическим током заданной формы были проведены теоретические исследования электромагнитных и гидродинамических процессов для некоторых простых систем [7, 8]. В работе [9] показано, что при питании индуктора МГД-перемешивателя несинусоидальным током, приближая форму тока к меандру при постоянной амплитуде возможно

добиться увеличения интегральной электромагнитной силы, действующей на расплав. Однако, очевидно, что это также приведет и к повышению активных потерь в обмотке, так как фактически увеличится действующее значение тока, потребляемого из сети. В работе [10] проведены численные исследования распределения электромагнитных сил в расплаве питании индуктора несинусоидальным периодическим напряжением прямоугольной формы с различным коэффициентом заполнения.

Однако при таком способе питания форму кривой тока возможно регулировать, изменяя только параметры обмотки (количество витков, геометрию, активное сопротивление), что является труднореализуемой задачей. Вместе с тем в настоящее время современные источники тока позволяют генерировать выходной ток различной формы [11], благодаря чему появляется возможность управлять силовым воздействием на расплав.

В данной работе проводится численное исследование пространственных и частотно временных распределений электромагнитных сил в расплаве при воздействии на него магнитным полем, которое создается индуктором МГД перемешивателя с системой питания несинусоидальными токами заданной формы.

Постановка задачи

Уравнения электромагнитного поля и граничные условия

Для исследований взят вариант двухфазного МГД-перемешивателя производства ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» с перекрещивающейся обмоткой [12].

При построении математической модели приняты следующие допущения:

1. Задача решается в двухмерной постановке.
2. Физические свойства областей принимаем постоянными и независимыми от температуры.
3. Секции катушек моделируются без дискретизации на отдельные витки.
4. Магнитная проницаемость магнитопровода принимается постоянной, на основании свойств выбранного материала.
5. При решении электромагнитной задачи пренебрегаем движением частиц расплава.

С учетом принятых допущений уравнение векторного магнитного потенциала для расчетной области запишется следующим образом [13, 14]:

$$\Delta A = \mu\gamma \frac{\partial A}{\partial t},$$

где A – векторный магнитный потенциал; μ – абсолютная магнитная проницаемость; γ – удельная электрическая проводимость; t – время.

На границах расчетной применяется условие Дирихле для нормальной составляющей векторного потенциала и условие Неймана для тангенциальной составляющей:

$$A_n = 0; \quad \frac{\partial A_\tau}{\partial n} = 0.$$

Настройки вычислительной процедуры

В качестве источника нагрузки задается значение результирующей МДС в каждой секции обмотки. Форма МДС в катушках представляет собой трапецеидальную знакопеременную функцию, параметры которой задаются временем нарастания и спада t_{front}, и временем, в течение которого значение МДС остается постоянным t_{const}. Форма кривой МДС зависит от безразмерного параметра $\hat{\tau} = \frac{2t_{front}}{T}$, который харак-

теризует время нарастания тока до амплитудного значения. Условно назовем данную величину параметром формы. Таким образом параметры кривой МДС определяются следующим образом $f_{front} = \frac{\hat{\tau} T}{2}$, $t_{const} = \frac{T}{2} - t_{front}$.

Следовательно, при $\hat{\tau} \to 0$ форма МДС представляет собой двухполярные прямоугольные импульсы, а при $\hat{\tau} \to 1$ – треугольные импульсы. Для корректного сравнения амплитудное значение МДС изменяется в зависимости от величины $\hat{\tau}$, так чтобы действующее значение оставалось постоянным

$$I_m n_{sec} = \frac{I_{\tilde{m}} n_{sec}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{3}{3-2\hat{\tau}}},$$

где $I_{\tilde{m}}$ – базисная амплитуда тока; n_{sec} – количество витков в секции обмотки; I_m – амплитуда питающего несинусоидального тока.

На рис. 1 показаны графики мгновенных значений тока в проводнике обмотки I_m для различных значений параметра формы.

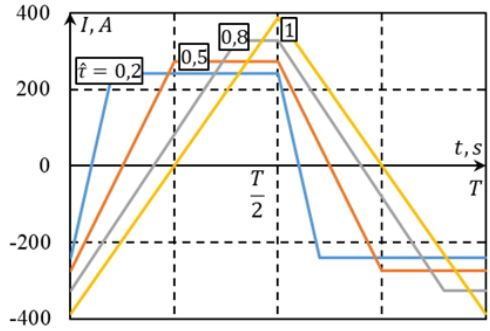


Рис. 1. Графики мгновенных значений тока в проводниках обмотки при различных значениях параметра формы

Эскиз расчетной области с основными геометрическими и физическими параметрами, а также сетка конечных элементов представлены на рис. 2. Расчетная область включает расплав 1, магнитопровод 2, двухфазную обмотку 3 и окружающее воздушное пространство 4. Процедура построения сетки конечных элементов осуществляется автоматически средствами Maxwell на основе адаптивных алгоритмов [15]. Основные геометрические и энергетические параметры математической модели представлены в табл. 1. Другие геометрические размеры находятся в параметрической зависимости от основных. Так, например, высота зубца вычисляется автоматически с учетом количества секций обмотки и зазора между секциями.

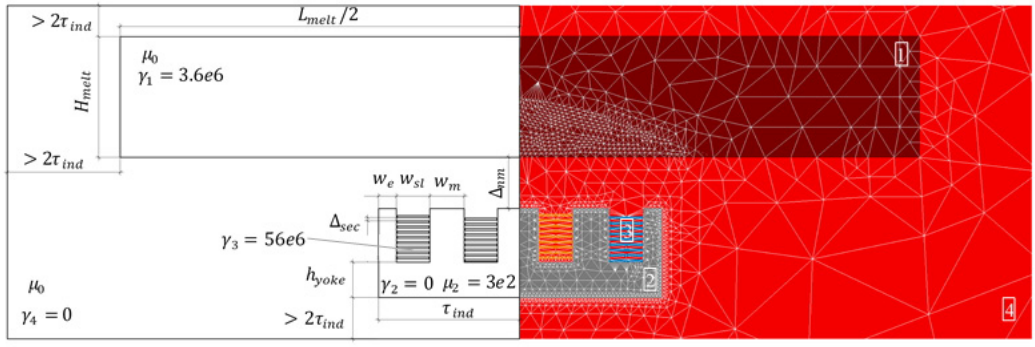


Рис. 2. Геометрия расчетной области и сетка конечных элементов. Проводимость γ указана в [S/m]

Табл. 1

Основные параметры модели

Геометрические параметры [м]	
Полюсное деление, τ_{ind}	1,1
Немагнитный зазор, Δ_{nm}	0,4
Высота расплава, H_{melt}	0,95
Длина расплава, L_{melt}	6,2
Высота ярма магнитопровода, $h_{yokв}$	0,275
Ширина крайнего зубца, $W_в$	0,278
Ширина среднего зубца, W_m	0,419
Зазор между секциями обмотки, Δ_{sec}	0,022
Энергетические параметры	
Частота, [Hz]	0,5; 1; 1,5
Базисная величина тока в проводнике, [A]	224
Фазовый сдвиг, [deg]	90

Результаты и обсуждение

Интегральные параметры

При исследовании характеристик МГД-перемешивателей интерес представляет главным образом тангенциальная компонента электромагнитной силы, которая отвечает за тепломассоперенос в объеме печи. Для сравнительной оценки влияния формы питающего тока на электромагнитное усилие целесообразно взять за базисное значение величину силы в случае питания обмотки индуктора синусоидальным током $F_{x,y}^{sin}$.

На рис. 3 показана зависимость относительной интегральной электромагнитной силы от параметра формы. Таким образом видно, что, варьируя форму питающего тока от трапеции до треугольника при сохранении действующего значения, интегральное значение тангенциальной компоненты силы будет всегда меньше, чем для случая питания индуктора синусоидальным током. При этом для всех рассмотренных частот наблюдается экстремум в области $\hat{\tau} \approx$ 0,6–0,7. Данный факт можно объяснить тем, что при данной величине параметра формы гармонический состав наиболее соответствует синусоидальной функции. При этом, чем более резкие фронты имеет форма тока, тем ниже тангенциальная компонента электромагнитной силы.

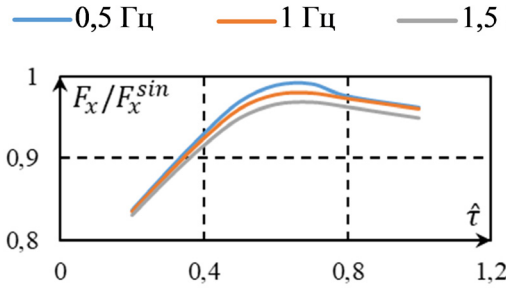


Рис. 3. Зависимость относительной тангенциальной электромагнитной силы от коэффициента формы

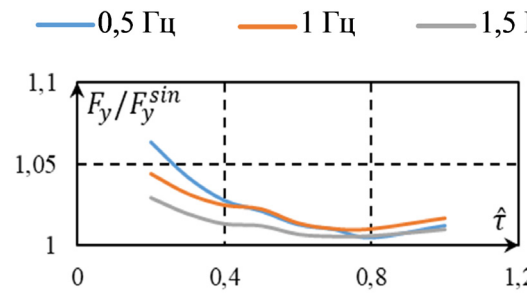


Рис. 4. Зависимость относительной нормальной электромагнитной силы от коэффициента формы

В тоже время, интегральное значение нормальной компоненты электромагнитной силы незначительно выше, по сравнению со случаем питания индуктора синусоидальным током во всем диапазоне $\hat{\tau}$ (рис. 4). Так на частоте 0,5 Гц возможно обеспечить прирост интегральной нормальной электромагнитной силы на 5–7 процентов при питании индуктора током трапецеидальной формы по сравнению с системой питания синусоидальными токами. Однако нормальная составляющая сила не оказывает существенного влияния на транзитный тепломассоперенос в объеме печи. В работе [16] показано, что нормальная составляющая обеспечивает только локальный массообмен в вертикальном направлении, при общем снижении количества движения в ванне. С другой стороны, такой эффект может быть полезным при установке индуктора МГД-перемешивателя на боковой стенке печи.

При этом следует отметить, что при изменении параметров питания изменяется и величина потребляемой мощности, которая расходуется на нагрев обмоток и подогрев металла. На рис. 5 показана зависимость отношения, тангенциальной электромагнитной силы к активной мощности, расходуемой на нагрев обмотки и расплава. В целом приращение силы к мощности меняется незначительно в исследуемом диапазоне $\hat{\tau}$. Стоит отметить лишь, что при приближении тока к прямоугольной форме прирост мощности, расходуемой на нагрев, становится более существенным, чем прирост тангенциальной электромагнитной силы.

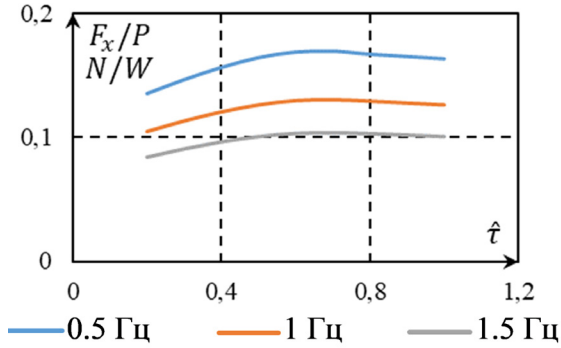


Рис. 5. Зависимость отношения тангенциальной электромагнитной силы к активной мощности, расходуемой на нагрев от параметра формы

Пространственное и временное распределение электромагнитах сил

Следует отметить, что при питании индуктора несинусоидальным периодическим током нарушается структура бегущего магнитного поля, вследствие чего пространственно-временное распределение электромагнитных сил в расплаве заметно отличается от случая распределения сил при синусоидальном питании. Рис. 6 иллюстрирует векторное распределение электромагнитных сил в расплаве в различные моменты времени при разных параметрах питания индуктора (Здесь T – период колебаний питающего тока). В случае питания индуктора системой синусоидальных токов «волна» электромагнитного усилия плавно двигается вдоль длины расплава в направлении движения магнитного поля. В случае питания индуктора системой несинусоидальных токов пространственно-временное распределение электромагнитных сил является неупорядоченным, и характеризуется резким изменением направления в различных точках расплава. Помимо этого, следует отметить возникновение в средней части индуктора нормальной составляющей электромагнитной силы отрицательного направления (направление вектора к индуктору) значительной величины. Данный характер изменения электромагнитной силы может пагубно влиять на целостность огнеупорной футеровки.

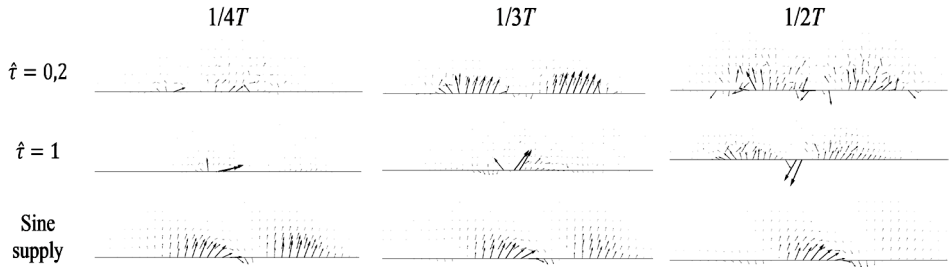


Рис. 6. Векторное распределение электромагнитных сил в расплаве в различные моменты времени для разных параметров питания индуктора

Такое пространственно-временное распределение электромагнитных сил в расплаве в целом будет негативно влиять на скорости потока металла и транзитный массоперенос, а, следовательно, и на механический КПД. С другой стороны, данный характер изменения открывает возможность создания виброударных усилий в расплаве, что как было описано выше, тоже несет в себе технологические преимущества во время приготовления многокомпонентных сплавов.

Известно, что при питании МГД перемешивателя системой синусоидальных токов, электромагнитная сила в любой точке расплава изменяется во времени также синусоидально. В работе [4] было показано, что импульсы электромагнитной силы позволяют интенсифицировать процессы тепломассопереноса в расплаве, за счет увеличения кинетической энергии пульсаций. В случае низкочастотных синусоидальных колебаний электромагнитной силы возникают периодические колебания скорости металла, которые интенсифицируют устранение микронеоднородностей за счет дополнительного локального ускорения и возрастания турбулентной вязкости, связанной с диффузией компонентов. Тем не менее питание индуктора низкочастотным синусоидальным током не обеспечивает резкого характера изменения электромагнитной силы в расплаве, а амплитуда колебаний при этом остается постоянной независимо от параметров питания. Таким образом представляет интерес получение такого характера изменения электромагнитной силы чтобы обеспечивалось ударное механическое воздействие на расплав, с целью устранения микронеоднородностей.

Для анализа характера изменения электромагнитной силы было взято две точки в донной части расплава (рис. 7), точка 1 – средняя точка относительно геометрической симметрии индуктора (средняя зона), точка 2 – точка в области крайнего зубца индуктора (краевая зона).

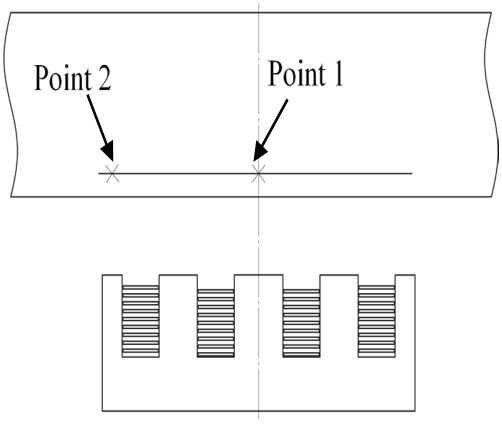


Рис. 7. Точки исследования характера электро-магнитных сил в расплаве

На рис. 8 показаны мгновенные значения тангенциальной компоненты электромагнитной силы в точках 1 и 2 для различных значений параметра формы. Видно, что в краевой зоне тангенциальная электромагнитная сила колеблется относительно нулевого значения, что говорит о том, что ее средняя за период величина в данной зоне близка к нулю, и более того может иметь обратное направление относительно движения магнитного поля. Данный характер тангенциальной компоненты силы в краевой зоне объясняется проявлением продольного краевого эффекта [17].

В центральной зоне тангенциальная компонента электромагнитной силы колеблется относительно некоторого среднего значения в положительной области. При этом, при величине параметра формы $\tau \approx 0{,}4$–$0{,}8$ характер мгновенного значения электромагнитной силы близок к синусоидальному. При $\tau = 0{,}2$ и $\tau = 1$ обеспечивается наиболее резкий характер изменения силы, причем, когда форма питающего тока треугольная, форма мгновенного значения тангенциальной электромагнитной силы также имеет выраженную треугольную форму.

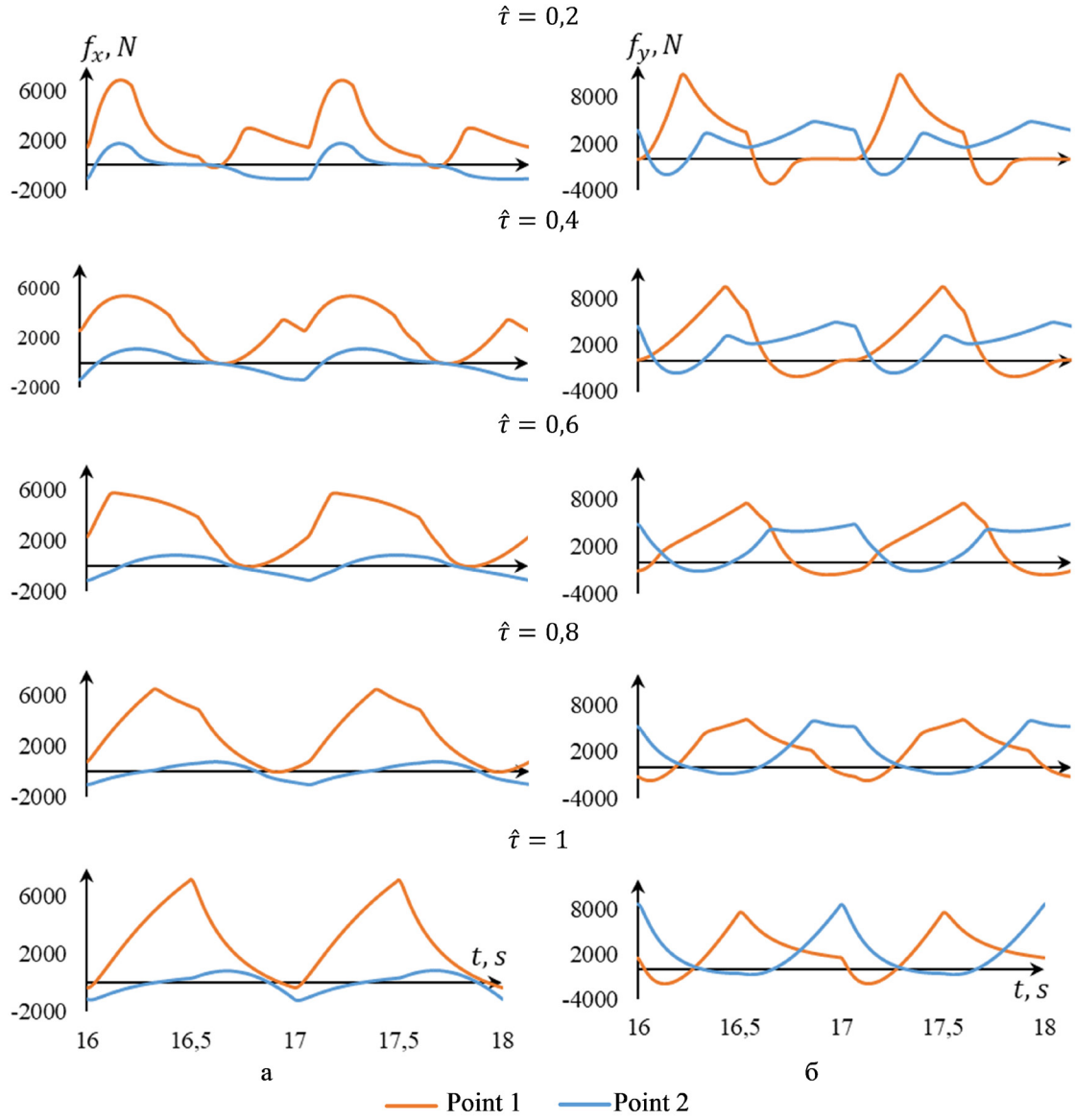


Рис. 8. График мгновенного значения танценциальной (а) и нормальной (б) электромагнитной силы в центральной зоне

На рис. 8 представлены мгновенные значения нормальной компоненты электромагнитной силы в точках 1 и 2 для различных значений параметра τ. В центральной зоне наиболее резкий характер изменения нормальной силы обеспечивается при τ = 0,2.

Также помимо характера изменения электромагнитной силы во времени, для создания ударного силового воздействия с целью осуществления эффективной гомогенизации и устранения микронеоднородностей важна величина амплитудных колебаний силы. Величину амплитудных колебаний электромагнитной силы можно оценить с помощью коэффициента амплитуды, который представляет собой отношение амплитудного значения к среднеквадратичному

$$K_a = \frac{F_m}{F^{rms}};\ F^{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N} \frac{F_n^2}{N}}$$

где F_m – амплитудное значение электромагнитной силы; F^{rms} – среднеквадратичное значение электромагнитной силы; F_n – мгновенное значение электромагнитной силы для n-го временного шага; N – количество временных шагов за период.

В данном случае рассмотрим функцию изменения электромагнитной силы без учета среднего значения. Известно, что в таком случае для синусоидальной функции $K_a^{sin} \approx 1{,}41$. На рис. 9 представлены графики зависимостей коэффициента амплитуды от параметра формы в точках центральной и краевой зон. Видно что для всех рассмотреных частот питающего несинусоидального тока зависимость коэффициента амплитуды от коэффициента формы является схожим, и более того частота незначительным образом влияет на величину коэффициента амплитуды.

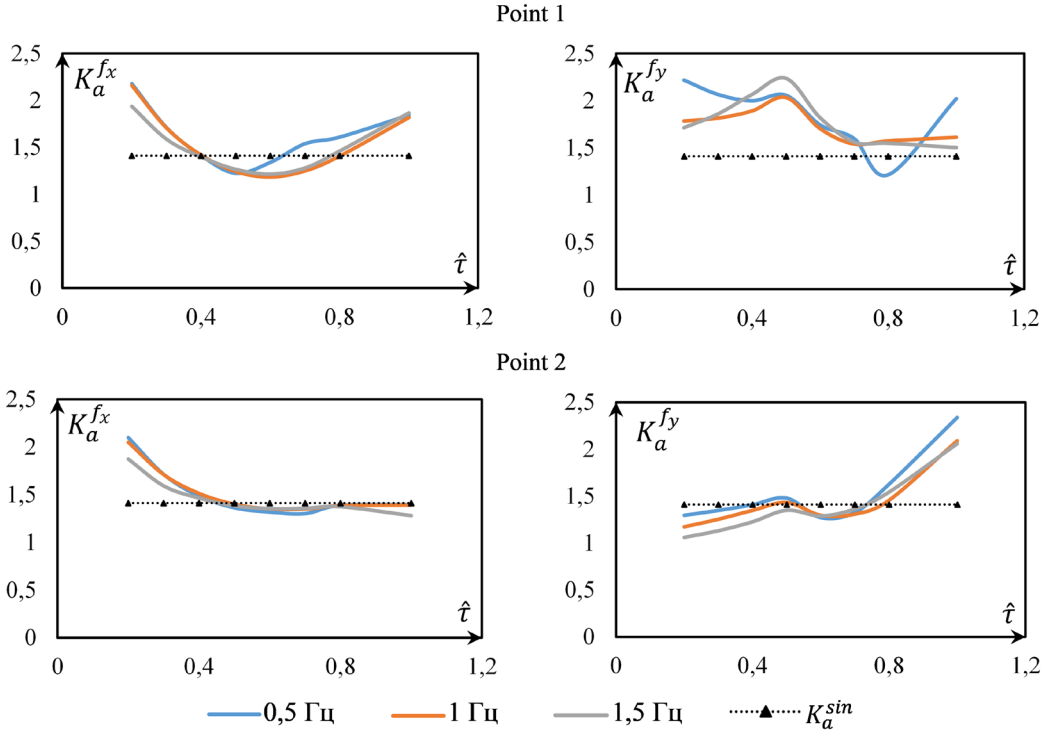


Рис. 9. Зависимость коэффициента амплитуды для электромагнитной силы от коэффициента формы при различных частотах питающего тока

В центральной зоне наибольшая амплитуда колебаний тангенциальной компоненты электромагнитной силы обеспечивается для значений τ < 0,4 и τ > 0,8, то есть фактически при форме питащего тока, который имеет либо практически прямуголь-

ную форму, либо треугольную форму. Также примечательно, что в диапазоне между этими значениями величина амплитудных колебаний тангенциальной компоненты силы может быть ниже, чем для случая питания синусоидальным током. Напротив, наибольшая амплитуда колебаний нормальной компоненты силы в центральной зоне обеспечивается при $\tau \approx 0{,}4–0{,}5$.

В точке 2 зависимости коэффициента амплиутды для тангенциальной и нормальной составляющей электромагнитной силы не имеют максимума. Величина амплитудных колебаний тангенциальной компоненты в данной зоне возрастает по мере приближения формы тока к меандру. Для нормальной компоненты, напротив, амплитуда колебаний увеличивается по мере приближения формы питающего тока к треугольнику.

Как видно из графиков на рис. 9 величина амлитудных колебаний электромагнитной силы в различных точках расплава неодинакова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была проведена оценка влияния формы питающего тока индуктора МГД перемешивателя на характер электрмоагнитных сил в расплаве. Из полученных результатов можно сделать несколько основных выводов:

1. Когда форма питающего тока имеет треугольную, либо прямоугольную форму интегральное значение тангенциальной силы в расплаве снижается, по сравнению со значением силы для случая питания индуктора синусоидальным током.

2. Максимальное интегральное значение тангенциальной составляющей электромагнитной силы обеспечивается при питании индуктора током трапецеидальной формы у которого время нарастания и спада амплитуды t_{front} равно примерно четверти периода.

3. При несинусоидальном токе заданной формы следует ожидать снижения транзитного массопереноса в объеме расплава, а следовательно и снижения механического КПД. Однако неупорядоченное пространственно-временное распределение электромагнитных сил открывает возможность виброударного воздействия на расплав, что может нести в себе технологические преимущества при устранении микронеоднородностей.

4. Наиболее резкий характер изменения и наибольшая амплитуда колебаний электромагнитной силы обеспечивается в случае когда питающий тока имеет либо треугольную форму, либо трапецеидальную форму с минимальным временем нарастания и спада амплитудного значения, т. е. при $t_{front} \to 0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бааке Э. МГД технологии в металлургии. Интенсивный курс Специализация IV. Баке Э., Барглик Д., Лупи С., Никаноров А., Павлов Е., Павлов С., Первухин М., Тимофеев В., Тимофеев С., Хацаюк М., Якович А. СПб. – Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – 250 с.
2. Fdhila R, Sand U and Eriksson JE, et al. 2016. A stirring history. ABB Review;3:45–48.
3. Timofeev V and Khatsayuk M. 2016. Theoretical design fundamentals for mhd stirrers for molten metals //Magnetohydrodynamics (0024-998X). – Vol. 52. – N°. 4.
4. Musaeva D, Ilin V and Baake E, et al. 2015 Numerical Simulation of the Melt Flow in an Induction Crucible Furnace Driven by a Lorentz Force Pulsed at Low Frequency. Magnetohydrodynamics.
5. Eckert S, Nikrityuk P and Rabiger D, et al. 2008 Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part I. Flow field in a liquid metal column. Metall Mater Trans B.
6. Wang X. et al. 2009. A periodically reversed flow driven by a modulated traveling magnetic

field: Part I. Experiments with GaInSn //Metallurgical and Materials Transactions B. – Vol. 40. – N°. 1. – P. 82.
7. Ma X, Yang Y and Wang B. 2009. Effect of pulsed magnetic field on superalloy melt // International Journal of Heat and Mass Transfer. – Vol. 52. – N°. 23–24. – P. 5285-5292.
8. Guo-Jun C, Yong-Jie Z and Yuan-Sheng Y. 2013. Modelling the unsteady melt flow under a pulsed magnetic field //Chinese Physics B. – Vol. 22. – N°. 12. – P. 124703.
9. Тимофеев В.Н., Лыбзиков Г.Ф., Хацаюк М.Ю., Еремин М.А., Тимофеев С.П. 2015. Магнитогидродинамические перемешиватели жидких металлов с несинусоидальными токами. Техника и Технологии. Журнал Сибирского федерального университета. – С. 166–177.
10. Jia, Yonghui, et al. "Numerical study on action of HMF, PMF, DHMF, and DPMF on molten metal during electromagnetic casting." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 103.1-4 (2019): 201–217.
11. Пат. РФ N° 2680715 – Источник питания для индуктора / Г. Ф. Лыбзиков, В. Н. Тимофеев. – Опубл. 26.02.2019.
12. Электронный ресурс: https://www.npcmgd.com/
13. Landau L.D., Lifshitz E.M. The classical theory of fields. – Vol. 2. – 2013. – 402 p.
14. Landau L.D., Bell J.S., Kearsley M.J., Pitaevskii L.P., Lifshitz E.M., & Sykes J.B. 2013. Electrodynamics of continuous media. Vol. 8. – 2013. – 475 p.
15. Ansys Maxwell 15.0 User's Guide 3D.
16. Timofeev V.N., Vinter E.R., Khatsayuk M.Y., Fomin A.V., & Shakhoval N.S. (2019, June). Analysis of the Process of Energy Transformation in Magnetohydrodynamic Stirrer of Liquid Metals with Nonsinusoidal Current. In 2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) (pp. 735–741). IEEE.
17. Yamamura S., Ito H., Ishulawa Y. Theories of the linear, induction motor and compensated linear induction motor //IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1972. – N°. 4. – C. 1700–1710.

REFERENCES

1. Baake E., Barglik D., Lupi S., Nikanorov A., Pavlov E., Pavlov S., Pervukhin M., Timofeev S., Khatsayuk M., Yakovich A. MGD tekhnologii v metallurgii. Intensivnyi kurs. Spetsializatsiya IV. [MHD technologies in metallurgy. Intensive course. Specialization IV]. St. Petersburg Publ., – 2013. – 250 p.
2. Fdhila R, Sand U and Eriksson JE, et al. 2016. A stirring history. ABB Review.;3:45–48.
3. Timofeev V and Khatsayuk M. 2016. Theoretical design fundamentals for mhd stirrers for molten metals // Magnetohydrodynamics (0024-998X). – Vol. 52. – N°. 4.
4. Musaeva D, Ilin V and Baake E, et al. 2015 Numerical Simulation of the Melt Flow in an Induction Crucible Furnace Driven by a Lorentz Force Pulsed at Low Frequency. Magnetohydrodynamics.
5. Eckert S, Nikrityuk P and Rabiger D, et al. 2008 Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part I. Flow field in a liquid metal column. Metall Mater Trans B.
6. Wang X. et al. 2009. A periodically reversed flow driven by a modulated traveling magnetic field: Part I. Experiments with GaInSn //Metallurgical and Materials Transactions B. – Vol. 40. – N°. 1. – P. 82.
7. Ma X, Yang Y and Wang B. 2009. Effect of pulsed magnetic field on superalloy melt // International Journal of Heat and Mass Transfer. – Vol. 52. – N°. 23-24. – P. 5285–5292.
8. Guo-Jun C, Yong-Jie Z and Yuan-Sheng Y. 2013. Modelling the unsteady melt flow under a pulsed magnetic field //Chinese Physics B. – Vol. 22. – N°. 12. – p. 124703.
9. Timofeev V.N., Lybzikov G.F., Khatsayuk M.Y., Eremin M.A., Timofeev S.P. Magnitogidrodinamicheskie peremeshivateli zhidkikh metallov s nesinusoidal'nimi tokami. [Magnetohydrody-

namic stirrer liquid metal with a non-sinusoidal currents. Engineering & Technologies. – PP. 166–177.
10. Jia, Yonghui, et al. "Numerical study on action of HMF, PMF, DHMF, and DPMF on molten metal during electromagnetic casting." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 103.1-4 (2019): 201–217.
11. Patent RF N° 2680715 – Istochnik pitaniya dlya induktora/ G. F. Lybzikov, V. N. Timofeev. [Power supply for inductor] – Publ. 26.02.2019.
12. Web site: https://www.npcmgd.com/
13. Landau L.D., Lifshitz E.M. The classical theory of fields. – Vol. 2. – 2013. – 402 p.
14. Landau L.D., Bell J.S., Kearsley M.J., Pitaevskii L.P., Lifshitz E.M., & Sykes J.B. Electrodynamics of continuous media. – Vol. 8. – 2013. – 475 p.
15. Ansys Maxwell 15.0 User's Guide 3D
16. Timofeev V.N., Vinter E.R., Khatsayuk M.Y., Fomin A.V., & Shakhoval N.S. (2019, June). Analysis of the Process of Energy Transformation in Magnetohydrodynamic Stirrer of Liquid Metals with Nonsinusoidal Current. In 2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) (pp. 735-741). IEEE.
17. Yamamura S., Ito H., Ishulawa Y. Theories of the linear, induction motor and compensated linear induction motor //IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1972. – N°. 4. – P. 1700–1710.

Статья потупила в редакцию 25.01.2021 г.

УДК 621.365.53

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УСКОРЕННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Э.В. Гайлевич, А.В. Полысаев, В.Е. Ходюш, Д.С. Алейников

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

Исследованы основные типы проблем получения заготовок высокого качества на кузнечном производстве. Проведен комплекс расчетов и моделирование распределения электромагнитных и температурных полей при обычном и ускоренном нагреве, позволивший определить оптимальные условия нагрева заготовок.

Ключевые слова: индукционный нагрев, индуктор, кузнечный индукционный нагреватель, распределение температуры, электромагнитное поле

APPLICATION OF ACCELERATED INDUCTION HEATING TECHNOLOGY DURING THE MODERNIZATION OF THE HEATING EQUIPMENT

E.V. Gajlevich, A.V. Polysaev, V.E. Hodjush, D.S. Alejnikov

Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

The main types of problems of obtaining high-quality blanks in forging are investigated. A set of calculations and modeling of the distribution of electromagnetic and temperature fields during conventional and accelerated heating has been carried out, which made it possible to determine the optimal conditions for heating the workpieces.

Keywords: induction heating, inductor, forging induction heater, temperature distribution, electromagnetic field

В настоящее время перед промышленностью остро стоит проблема выпуска качественной и конкурентоспособной продукции. Требования качества в полной мере относятся и к процессам нагрева металлов под последующую деформацию, которые играют важную роль в обеспечении необходимых требований к получаемым поковкам.

Поэтому разработка энергоэффективных технологических процессов и оборудования с целью получения высокого качества поковок является актуальной задачей.

На сегодняшний день в кузнечных производствах для нагрева заготовок используется различное оборудование, это, прежде всего, проходные газовые или электропечи. Основными недостатками их являются: большое потребление природного газа или электроэнергии; низкое качество заготовок (окисление, угар металла, обезуглероживание поверхности) за счет длительной выдержки; низкая степень механизации; низкий КПД нагрева и расход энергоресурсов на разогрев печи; большие финансовые затраты на ремонт и обслуживание (замена футеровки, замена нагревателей или горелок, и т.д.). Современное развитие кузнечных производств последние годы ориентируется на замену печного оборудования на более энергоэффективные и производительные технологические процессы, к которым в полной мере относятся скоростные методы нагрева такие, как индукционный, высокочастотный, лазерный, плазменный нагрев и др. [1–4].

Применение индукционного нагрева для заготовок взамен газового имеет ряд преимуществ: высокий КПД использования энергоресурсов (КПД работы современного полупроводникового генератора 0,95–0,97; оперативность выхода на рабочий режим работы (время нагрева заготовки до 1150–1250 °С в индукторе составляет десятки секунд, в газовой печи 0,5–2 часа, компактность индукционных установок. Данное оборудование позволяет встраивать его в линию кузнечно-прессового оборудования; обеспечивает высокую производительность операций нагрева; уменьшение на поверхности заготовок окалины, исключение обезуглероженного слоя.

Несмотря на то, что основным преимуществом индукционного нагрева является энергоэффективность и высокий КПД нагрева по сравнению с печными методами, проблема его использования в кузнечных цехах сохраняется. Основные проблемные вопросы связаны с разработкой и проектирование индукторов для нагрева каждого типоразмера заготовок, особенно остро данная проблема стоим в кузнечных производствах обладающих широкой номенклатурой поковок и низкой серийность. В связи с этим снижается производительность из-за частых переналадок, необходимо нести затраты на изготовление и содержание большого парка индукторов. Так же существует проблема наладки большой номенклатуры индукторов с преобразователями частоты и блоком контуров. Не всегда одни и те же индукторы работают с различными преобразователями. Не менее остро стоит задача разработки технологии нагрева и управление ее параметрами (температура, темп нагрева и т. д.). Зачастую данные параметры подвержены влиянию человеческого фактора, что в последствие, отражается на качестве поковок.

Для решения вышеперечисленных проблем будет разработана энергоэффективная технология и многофункциональный комплекс оборудования для индукционного нагрева заготовок в кузнечном производстве, которое обладает номенклатурой около 1000 видов поковок, при низкой годовой серийности от нескольких десятков и сотен до нескольких тысяч поковок. Многофункциональный комплекс оборудования, который планируется укомплектовать специальными индукторами, позволяющими нагревать заготовки, объединенные в типовые группы, и таким образом, будет в несколько раз сокращена номенклатура индукторов.

Для нагрева такой широкой номенклатуры индукторы будут типовые и смогут работать на любой линии, индукторы будут обладать специальными системами быстрого съема и установки. Для запитывания индукторов разработана серия преобразователей частоты, позволяющая работать с широкой номенклатурой индукторов в режиме автоподстройки и определения нагрузки по первому импульсу. Система управления данных источников питания имеет возможность хранения в памяти большого количества настроек и не требуют постоянной переналадки. В разрабатываемом комплексе

будет впервые применена система промышленного интернета, которая заключается в том, что все источники и их нагрузки объединены в локальную сеть с возможностью выхода в сеть интернет. Так же все параметры работы в реальный момент времени отображаются на специальном сайте в сети, это позволяет контролировать и вносить при необходимости корректировки в работу оборудования технологом, или разработчиком. В случае выхода из строя или ошибки в сеть выкладываются все осциллограммы и причины выхода из строя, данная информация помогает оперативно реагировать на экстренные ситуации и устранять поломки, с минимальным простоем в производственном процессе.

В соответствии с техническим заданием спроектированы следующие типовые кузнечные индукционные нагреватели (рис. 1).

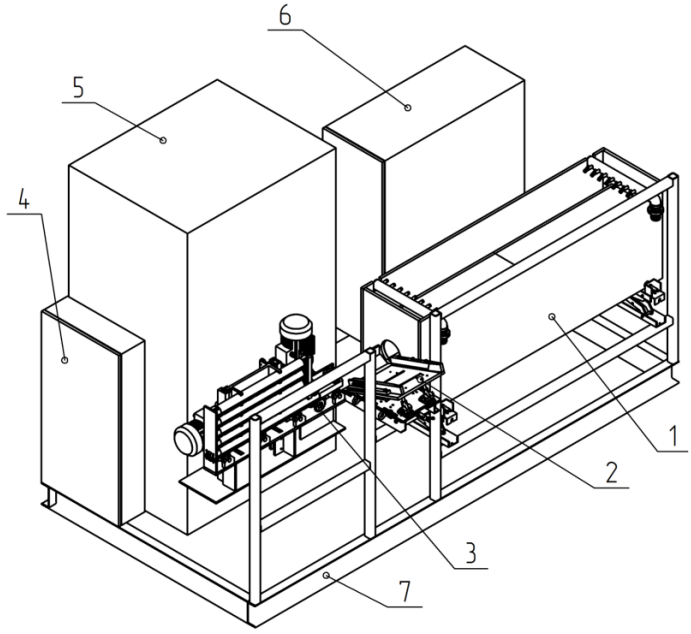


Рис. 1. Кузнечный индукционный нагреватель для КГШП 1600 и КГШП 2500:
1 – индуктор; 2 – лоток; 3 – толкатель; 4 – шкаф управления;
5 – станция охлаждения; 6 – частотный преобразователь; 7 – установочный блок

Для каждого индуктора и группы заготовок проведен комплекс расчетов с моделированием распределения электромагнитных полей по поверхности и построены оптимальные распределения температурных полей по глубине детали, позволяющие получить градиент по температуре не более 100 °С. Для моделирования использовался программный комплекс UNIVERSAL 2D [5].

Одной из основных задач при проектировании является достижение заданной или максимальной производительности при минимальных габаритах комплекса. С возможностью его монтажа как единого технологического узла взамен печного нагревателя или индукционного нагревателя с машинным преобразователем.

Общий вид индукционного нагревателя средней частоты для нагрева мерных заготовок (рис. 2). Заготовки 1 из бункера 2 с толкателем 4 поступают на исходную позицию перед входом в индуктор 3. Перемещаемый с помощью привода толкатель с поддерживающими роликами 5 вводит холодную заготовку в индуктор, продвигая одновременно на один шаг весь находящийся в индукторе ряд заготовок. Последняя нагретая заготовка выходит из индуктора, поступая на разгрузочный лоток. Нагрев

заготовок до конечной температуры в нагревателях полунепрерывного действия осуществляют по мере их продвижения в индукторе с шагом, равным длине заготовки. При введении в индуктор очередной холодной заготовки, уже нагретая до заданной температуры заготовка, выталкивается из индуктора.

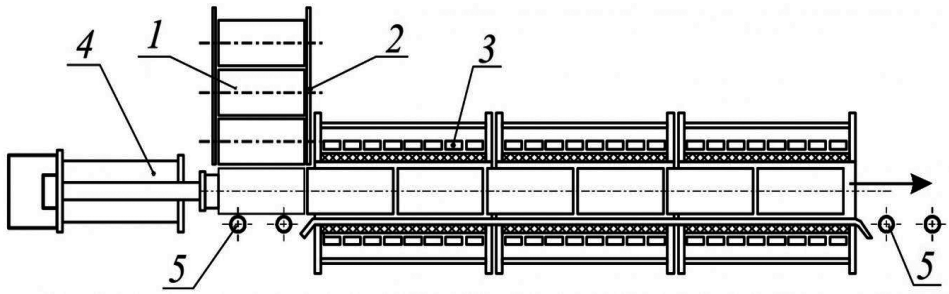


Рис. 2. Индукционный нагреватель для нагрева мерных заготовок

Для увеличения производительности нагревателя внедряют метод ускоренного индукционного нагрева. Для обеспечения режима, индуктор должен иметь переменный шаг навивки. Практически шаг намотки меняется ступенчато. Число ступеней не превышает четырех, и часто ограничивается двумя-тремя. Температура поверхности загрузки поднимается до конечного значения в течение 10–30 % общего времени и далее почти не меняется. При этом желательно, чтобы на каждом участке размещалось целое число заготовок.

Как при проектировании новых, так и при модернизации существующих установок стараются унифицировать конструкцию нагревательных секций сохранения одинаковое число и шаг витков. Реализовать режим ускоренного нагрева при этом можно изменив схему подключения секций к преобразователю частоты. Вторая и третья секция соединяются параллельно и последовательно с первой, (рис. 3) с соответствующим изменением параметров согласования.

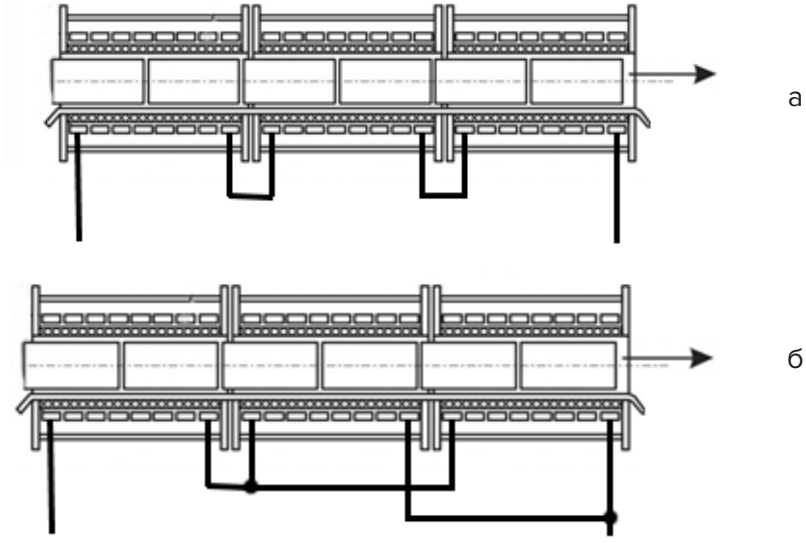


Рис. 3. Соединение секций кузнечного индукционного нагревателя:
а – обычный режим нагрева, б – ускоренный режим нагрева

Произведено сравнение энергетических показателей комплекса из преобразователя частоты и индуктора при работе на разных режимах нагрева.

В табл. 1 приведены результаты расчета максимальной производительности для наиболее габаритных заготовок. Дальнейшее увеличение подводимой мощности приводит к перегреву поверхности заготовок и увеличению перепада температуры по сечению заготовки на момент ее поступления в пресс.

Табл. 1

Расчет нагрева габаритных заготовок

Частота	Гц	2400	2400
Длина индуктора	мм	2000	2000
Диаметр индуктора	мм	160	160
Диаметр заготовки	мм	120	120
Длинна заготовки	мм	180	180
Количество заготовок в индукторе	шт	11	11
Мощность	кВт	540	660
Темп нагрева	с	30	25
Температура макс.	°С	1300	1250
Неравномерность температуры(индуктор)	°С	300	200
Неравномерность температуры через 20 сек (пресс)	°С	100	70
Производительность	т·ч	1,91	2,29
Энергозатраты (индуктор, без учета КПД блока согласования и преобразователя)	кВт·ч/т	283	288

Распределение температуры заготовок по длине по мере продвижения по индуктору и по сечению заготовки на выходе из индуктора для обычного режима нагрева (рис. 4, 5, 6) и для ускоренного режима нагрева (рис 7, 8, 9).

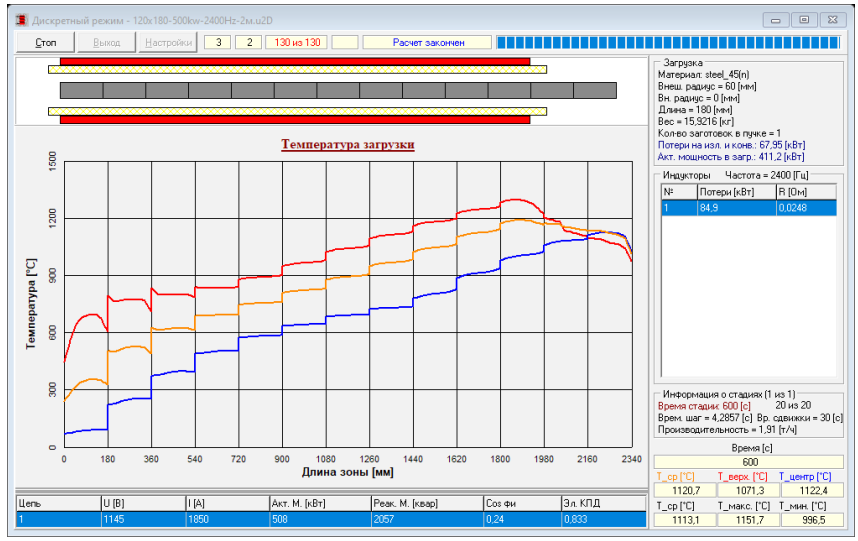


Рис. 4. Нагрев заготовок диаметром 120 мм в обычном режиме

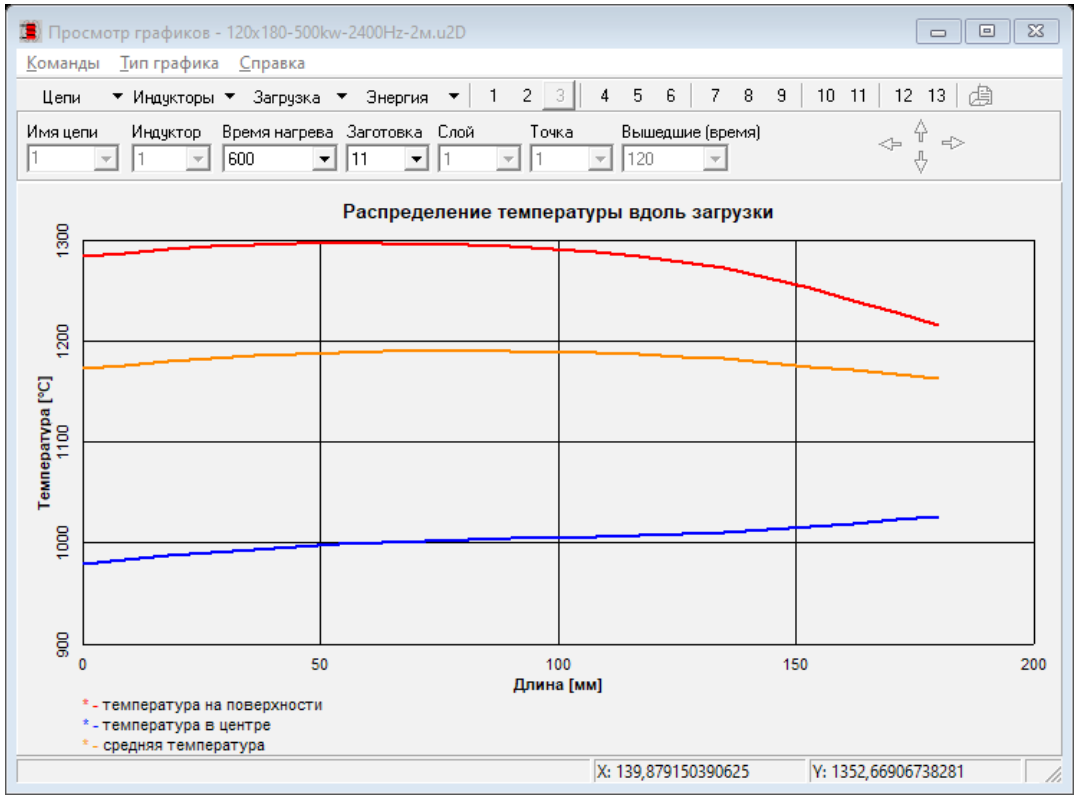


Рис. 5. Распределение температуры в заготовке на выходе из индуктора

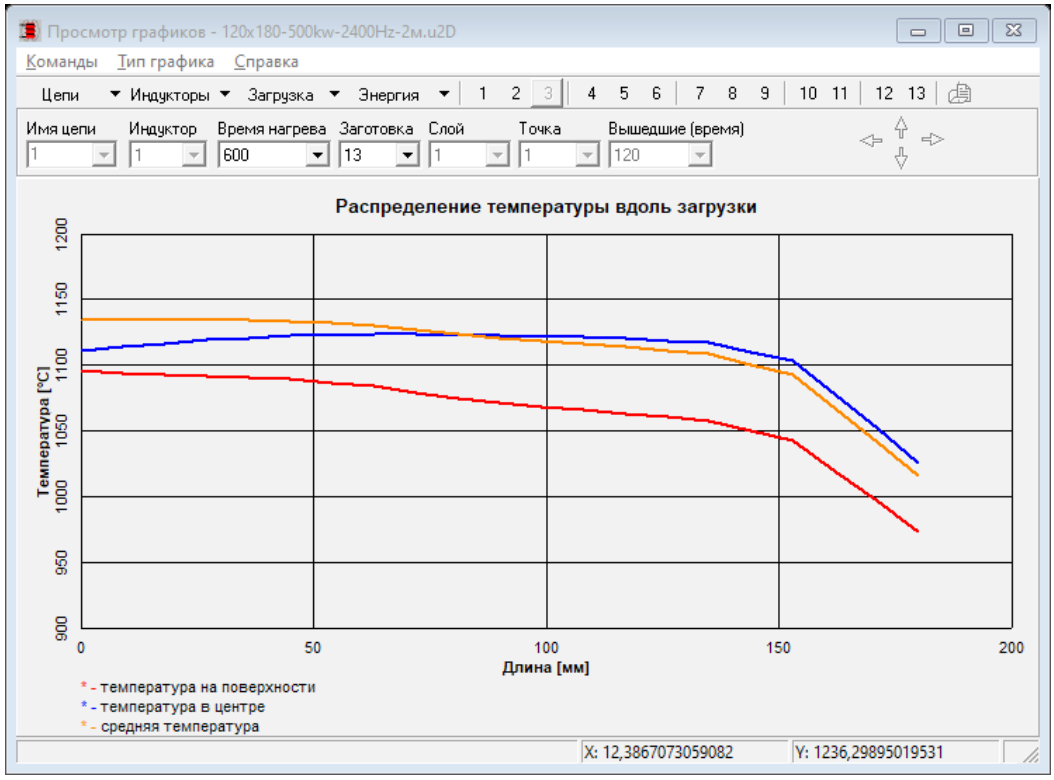


Рис. 6. Распределение температуры в заготовке через 30 сек после выхода из индуктора. Транспортировка к прессу

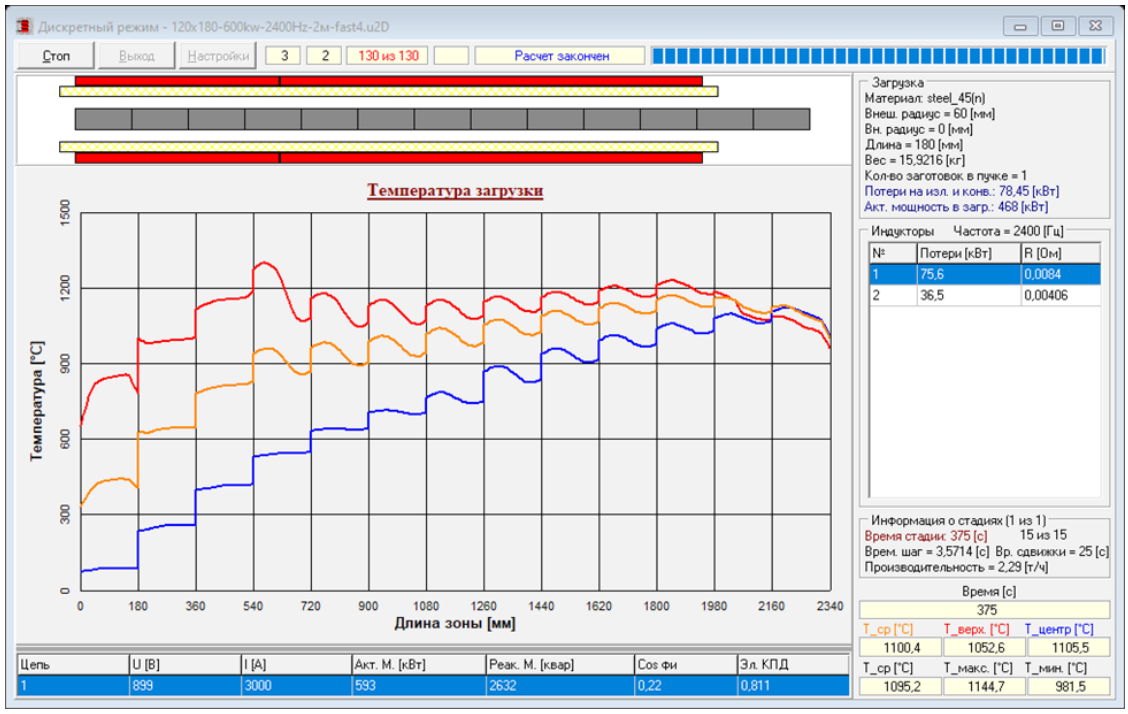


Рис. 7. Нагрев заготовок диаметром 120 мм в ускоренном режиме

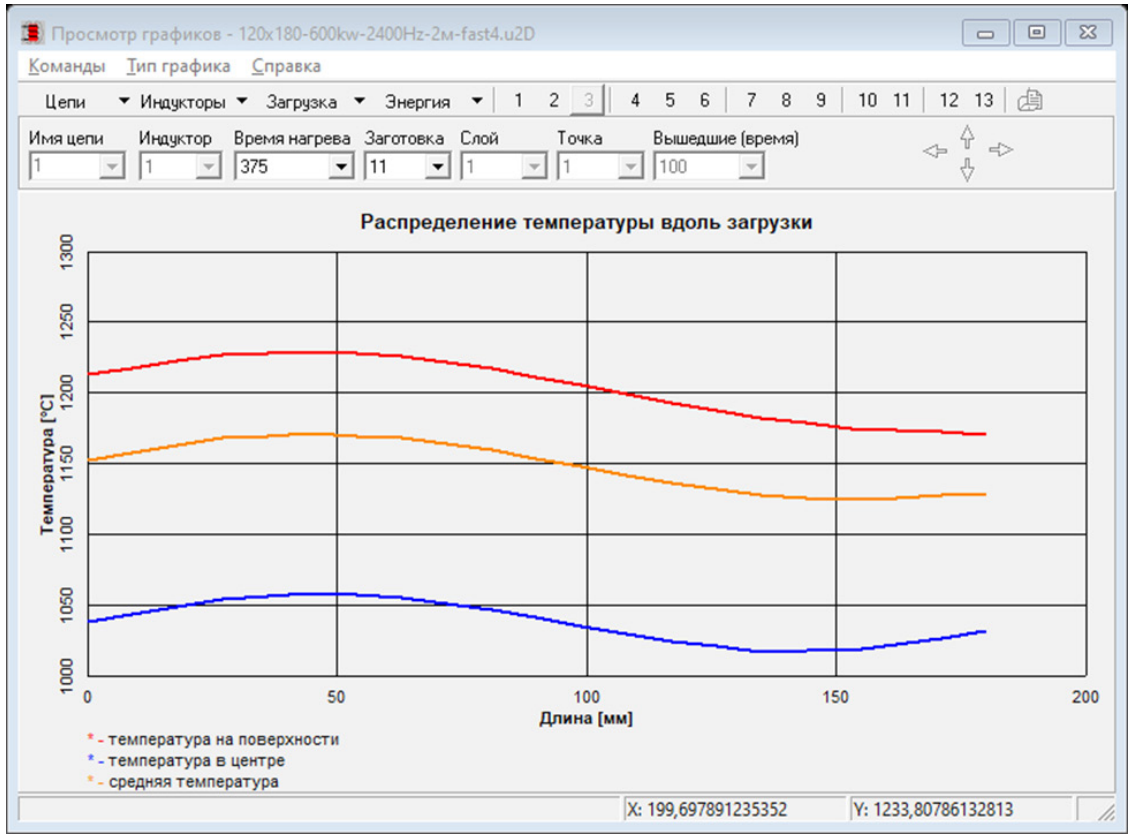


Рис. 8. Распределение температуры в заготовке на выходе из индуктора

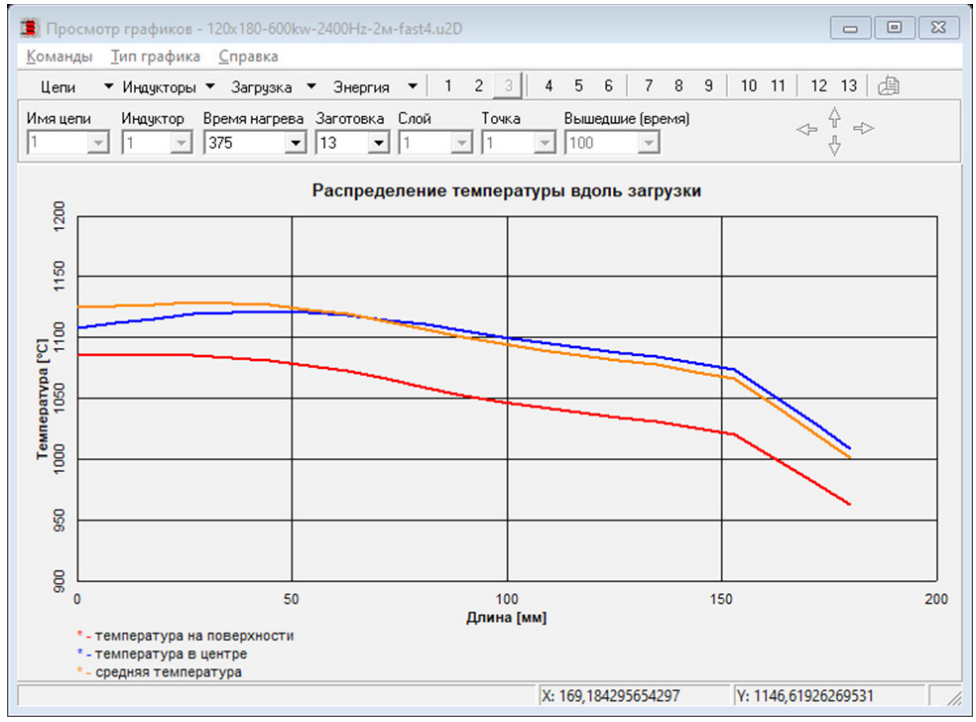


Рис. 9. Распределение температуры в заготовке через 20 сек после выхода из индуктора. Транспортировка к прессу

Таким образом установлено, что для получения максимальной производительности при заданной неравномерности нагрева целесообразно внедрение ускоренного режима нагрева, хоть это и приводит к незначительному увеличению энергозатрат на 1 тонну заготовок.

Кроме увеличения общей производительности снижается неравномерность нагрева по сечению заготовки, что увеличивает в последующем качество поковок.

Перебои в работе прессового оборудования являются серьезной трудностью для работы индукционного нагревателя. В отличие от печей с внешним источником тепла, где максимальная температура заготовок не превышает заданной температуры в камере печи (установки с резистивным или газовым нагревом), в случае высоко интенсивного индукционного нагрева при прекращении выдачи нагретых заготовок, необратимо нарушается температурный режим в заготовках, находящихся в индукторе. Это приводит к тому, что при относительно длительных паузах приходится полностью освобождать индуктор от частично нагретых заготовок и начинать работу с запуска установки на холодных заготовках. При запуске индукционного нагревателя для получения номинального электрического режима индуктор частично загружают заготовками, которые в заданном темпе продвигаются вдоль нагревателя. Однако все заготовки, кроме последнего, не могут быть использованы для обработки давлением, так как они не прошли полного цикла нагрева. Эти заготовки называют балластными и применяют лишь для за-пуска установки. Аналогично, по окончании работы установки не используют находящиеся в индукторе нагретые до различной температуры заготовки.

Для возможности организации паузы в работе установок и недопущения брака применяется глубокое регулирование подводимой мощности с постоянным контролем температуры заготовок. При непродолжительной остановке мощность автоматически уменьшается до величины компенсирующей потери на излучение с поверхности. Это позволяет сохранить температуру загрузки постоянной и продолжить работу без раз-

грузки индуктора. Дополнительный контроль температуры на выходе позволяет автоматически организовать отбраковку заготовок для недопущения брака.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При внедрении технологии и оборудования будет получен экономический эффект за счет экономии электроэнергии, а также за счет отказа от газопотребляещего оборудования. Замена машинных генераторов (с КПД не более 70 % и потреблением на холостом ходу до 30 % электроэнергии впустую), используемых в настоящий момент на предприятии, на современный полупроводниковый источник питания с КПД не менее 95 %, при двухсменной работе оборудования при коэффициенте загрузки 0,8 повлечет экономию энергоресурсов не менее, чем на 50 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Головин Г.Ф. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева / Г.Ф. Головин, Н.В. Зимин. – Л. Машиностроение. – 1979. – 120 с.
2. Андрушкевич В. В. Энергоэффективные технологии с применением индукционного нагрева в трубной промышленности : дис. канд. техн. наук: 05.09.10 / В.В. Андрушкевич. – С.–Петербург. – 2016. – 141 с.
3. Гордиенко А.И. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева / А.И. Гордиенко, П.С. Гурченко, А.И. Михлюк, И.И. Вегера – Минск : Белар. Навука. – 2009. – 287 с.
4. Актуальные проблемы прочности / Под редакцией В.В. Клубовича – Витебск: Изво УО «ВГТУ», 2010. – 435 с. Глава 1 «Перспективы развития оборудования и технологий индукционного нагрева в Республике Беларусь». – С. 5–42.
5. Демидович В.Б. Численное моделирование устройств индукционного нагрева / В.Б. Демидович, Ф.В. Чмиленко. – СПб: Издво СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2010. – 158 с.

REFERENCES

1. Golovin G.F. Tehnologija termicheskoj obrabotki metallov s primeneniem indukcionnogo nagreva [Heat treatment technology of metals using induction heating] / G.F. Golovin, N.V. Zimin. – L. Mashinostroenie. – 1979. – 120 p. (in Russian)
2. Andrushkevich V.V. Jenergojeffektivnye tehnologii s primeneniem indukcionnogo nagreva v trubnoj promyshlennosti [Energy efficient technologies using induction heating in the duct industry] : dis. kand. tehn. nauk: 05.09.10 / V.V. Andrushkevich. – S.–Peterburg. – 2016. – 141 p. (in Russian)
3. Gordienko A.I. Obrabotka izdelij mashinostroenija s primeneniem indukcionnogo nagreva [Processing of mechanical engineering products using induction heating] / A.I. Gordienko, P.S. Gurchenko, A.I. Mihljuk, I.I. Vegera – Minsk : Belar. Navuka. – 2009. – 287 p. (in Russian)
4. Aktual'nye problemy prochnosti [Actual problems of strength] / Pod redakciej V.V. Klubovicha – Vitebsk: Iz-vo UO «VGTU», 2010. – 435 p. Glava 1 «Perspektivy razvitija oborudovanija i tehnologij indukcionnogo nagreva v Respublike Belarus'». – P. 5–42 (in Russian)
5. Demidovich V.B.. Chislennoe modelirovanie ustrojstv indukcionnogo nagreva. [Numerical simulation of induction heating devices] / V.B. Demidovich, F.V. Chmilenko. – SPb: Izdvo SPbGJeTU «LJeTI». – 2010. – 158 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 05.02.2021 г.

УДК 621.365

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО НАГРЕВА ЗАГОТОВОК ПЕРЕД ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

[1]В.Б. Демидович, [1]В.В. Андрушкевич, [1]П.А. Ситько, [2]Ю.Ю. Перевалов, [1]В.А.Оленин

[1]ООО «Русские технологии индукционного нагрева»,
[2]Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассматривается автоматизированный нагревательный комплекс на базе многомодульной индукционной установки. На примере трехмодульного индукционного нагревателя приводятся преимущества использования таких установок по сравнению с применяемыми в настоящее время кузнечными индукционными нагревателями. Многомодульные индукционные установки дают возможность оптимизации режимов работы оборудования по различным критериям, таким как энергопотребление, форма температурного профиля загрузки, производительность, а так же позволяют эффективно отработать возможные возмущения типа изменения скорости, диаметра заготовки, начальной температуры и тем самым минимизировать количество брака при нагреве.

Ключевые слова: индукционный нагрев, модульная установка, термообработка, температурный профиль, многозонный нагрев

MODULE INDUCTION INSTALLATIONS FOR CONTINUOUS HEATING OF BILLETS BEFORE TO PRESSURE TREATMENT

[1]V.B. Demidovich, [1]V.V. Andrushkevich, [1]P.A. Sitko, [2]Yu. Perevalov, [1]V. A. Olenin

[1]Russian technologies of induction heating (RTIH) Ltd.
[2]St.Petersburg Electrotechnical University «LETI»,
Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail: perevalov@yandex.ru

Automated heating system is considered on the basis of a multi induction unit. Advantages of using such installations as compared to currently used blacksmith induction heaters are considered on the example of three-modal induction units. Multi-module induction installations make it possible to optimize of behavior of the equipment on various criteria, such as energy consumption, the shape of the load's temperature profile, productivity and also allow effectively investigate possible perturbations like velocity change, the workpiece diameter, the initial temperature and thereby minimize the number of rejects during heating.

Keywords: induction heating, module installation, heat treatment, the temperature profile, multi-zone heating

Наблюдающийся в последнее время прогресс в разработках источников питания внес серьезные изменения в архитектуру и построение кузнечных индукционных нагревателей [1–4]. Этот процесс напрямую связан с появившейся возможностью сильно уменьшить габариты источников питания, с резко возросшей удельной емкостью электротермических конденсаторов, а также снижением габаритов и повышением эффективности теплообменников. Управление нагревателем стало цифровым, и появилась возможность реализации управления им по модели. Все это привело к тому, что в настоящее время у ведущих компаний, производящих индукционное оборудование, индукционный нагреватель представляет собой набор модулей, которые имеют свои встроенные преобразователи частоты, станции охлаждения, конденсаторные батареи и индивидуальные контроллеры. Общий вид типичной модульной установки индукционного нагрева представлен на рис. 1.

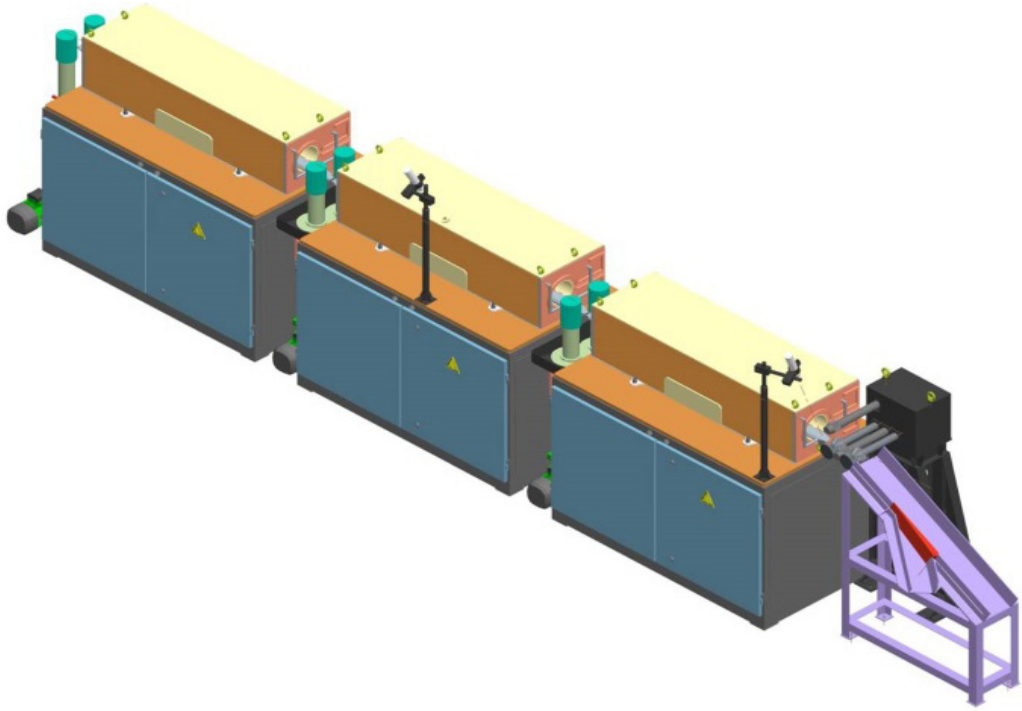


Рис. 1. Общий вид типичной модульной установки

В зависимости от количества индукционных модулей в составе установки существенно изменяется кривая нагрева заготовок по длине кузнечного индукционного нагревателя. И, как показывает практика, анализ, разработка, проектирование и оптимизация таких автоматизированных многомодульных индукционных комплексов невозможен без применения математического моделирования с использованием специализированных программ [5]. В качестве примера на рис. 2 приведены результаты такого компьютерного моделирования. Показаны распределения температурных полей по длине индукционного нагревателя для нагрева заготовок диаметром 110 мм с производительностью 4 т/ч с использованием одного, двух и трех модулей соответственно.

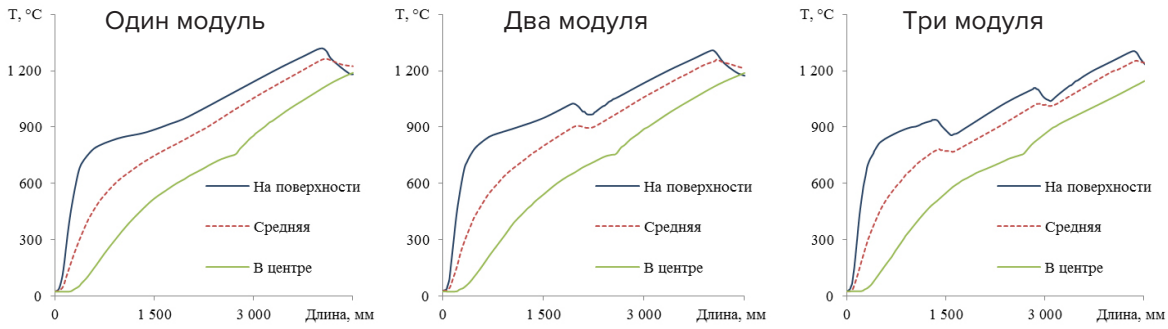


Рис. 2. Распределения температурных полей по длине индукционного нагревателя для нагрева заготовок диаметром 110 мм с производительностью 4 т/ч с использованием одного, двух и трех модулей

При использовании разного количества модулей общая длина зоны нагрева остается неизменной и составляет примерно 4200 мм. Конечная температура нагрева равна 1200 °С. Длины индукторов в многомодульной системе нагрева равны, а мощность, подаваемая на каждый из них, может отличаться в 2–3 раза. Суммарная мощность от источников питания в каждом случае отличается не более чем на 10 %. В качестве примера, на рис. 3 представлено распределение мощности источников питания по зонам нагрева в многомодульных индукционных нагревателях.

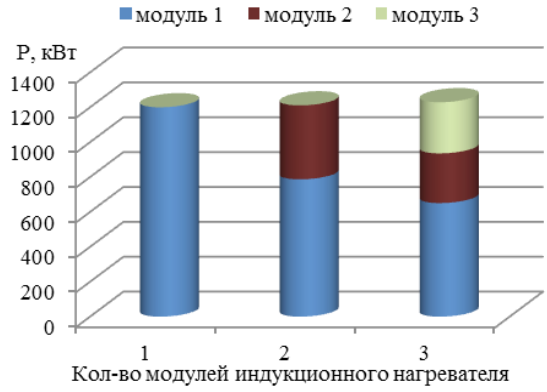


Рис. 3. Распределение мощности источников питания по зонам нагрева в многомодульных индукционных нагревателях

Как видно из примера, по мере увеличения количества модулей нагрев заготовок приобретает «многозонный» характер. Такая структура позволяет создать систему адаптивного многозонного нагрева заготовок, с несколькими индивидуально контролируемыми участками нагрева, питание которых происходит от автономных преобразователей частоты, по управлению объединенных в единую систему с контролем промежуточных параметров. Количество нагревательных модулей может варьироваться от одного до виртуально неограниченного числа, однако наиболее оптимально, с точки зрения вариативности управления распределением температурного поля по заготовкам, использовать три зоны нагрева и выше. Количество и длина модулей зависит от производительности установки, требований к качеству нагрева и от параметров заготовок. На рис. 4 представлена зависимость количества модулей от производительности установок при нагреве цилиндрических заготовок диаметром 130 мм перед ковкой.

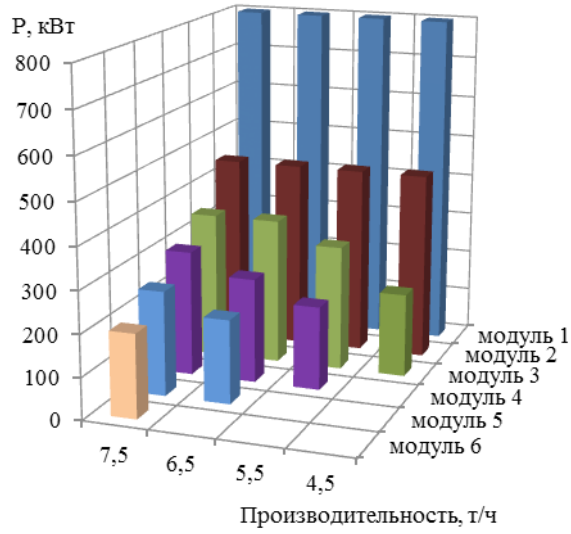


Рис. 4. Зависимость количества модулей от производительности установок при нагреве цилиндрических заготовок диаметром 130 мм перед ковкой

Индивидуальное управление мощностью нагрева в каждом модуле позволяет гибко подстраивать термический режим под требования заказчика, минимизировать количество брака, а также снизить негативные влияния переходных режимов. На рис. 5 изображены кривые нагрева цилиндрических заготовок диаметром 130 мм, полученные при различном распределении мощностей источников питания по модулям нагревателя с тремя зонами нагрева с производительностью 4,125 т/ч. Нижний, 1-й профиль, соответствует плавному режиму нагрева с конечной равномерностью распределения температуры по сечению заготовки 110 °С, а верхний, 3-й профиль, и средний, 2-й профиль, соответствуют ускоренному нагреву разной интенсивности с конечной равномерностью распределения температуры по сечению заготовки 50 °С.

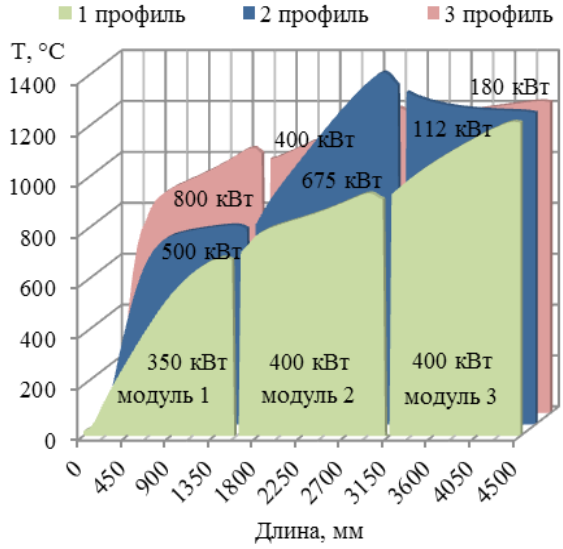


Рис. 5. Кривые нагрева цилиндрических заготовок диаметром 130 мм

На рис. 6 для каждого из трех профилей, соответственно, представлены графики распределения температурных полей по длине индукционного нагревателя.

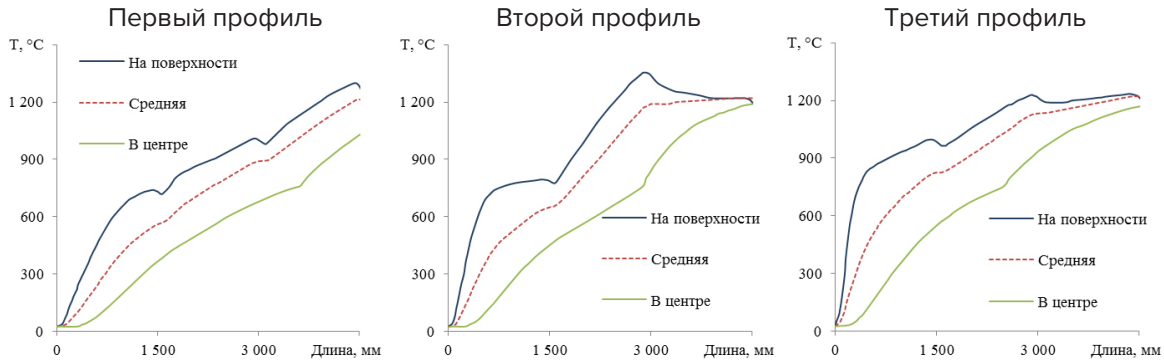


Рис. 6. Графики распределения температурных полей по длине индукционного нагревателя. Первый, второй и третий профили

Плавный нагрев характеризуется пониженным окалинообразованием и высокой энергоэффективностью, ускоренный нагрев позволяет свести разность температур между поверхностью и центром заготовок до минимума. В зависимости от особенностей технологического процесса может быть выбран тот или иной вид кривой. Параметры нагрева заготовок при различных режимах нагрева приведены в табл. 1.

Табл. 1

Сравнение параметров нагрева заготовок при разных режимах нагрева (для заготовок диаметром 130 мм, с производительностью 4,125 т/ч)

Температурный профиль	КПД, %	Общая мощность, кВт	Температурный перепад по радиусу, °С	Условия для окалиноо-бразования	Условия для свариваемо-сти торцов
1	67	1380	50	+++	++
2	70	1287	50	++	+++
3	73	1185	110	+	+

Так же значительный эффект имеет применение метода многозонного нагрева во время переходных процессов, возникающих при работе установки (стартовый нагрев, неритмичная работа стоящего в линии прокатного оборудования). Это объясняется тем, что модульная структура позволяет применять различные алгоритмы задания мощности на каждом участке линии нагрева независимо друг от друга, что в сочетании с малой инерционностью индукционной системы позволяет эффективно отработать возникшие в процессе нагрева возмущения и тем самым минимизировать количество брака при нагреве.

Использование описанной модульной структуры имеет очевидные преимущества в технологии индукционного нагрева, так как делает возможным сохранить температурный профиль постоянным при производительностях, отличных от номинальной величины. Позволяет эффективно отработать возможные возмущения типа изменения скорости, диаметра заготовки, начальной температуры и минимизировать количество брака при нагреве, а также дает возможность оптимизировать режимы работы оборудования относительно:

- энергопотребления
- окалинообразования

- снижения сваривания торцов заготовок
- изменения длины заготовок.

Для полноценной реализации достоинств модульных индукционных установок необходима развитая система цифрового управления, которая включает алгоритмы управления в стационарных и нестационарных режимах работы КИН, возникающих при первоначальном пуске нагревателя, при остановках технологических линий и повторном пуске после остановки, при изменении производительности технологических линий. Нестационарные режимы могут характеризоваться сильным изменением температурного поля загрузки и электрических параметров нагревателя, и потенциально могут приводить к большому проценту брака.

С позиции теории управления индукционный нагреватель является объектом с распределенными параметрами и ограниченной наблюдаемостью и управляемостью. Выходным параметром служит температурное поле загрузки, а входным – передаваемая в загрузку мощность. В промышленных условиях доступными для наблюдения и снятия сигнала для обратной связи является температура поверхности, причем в ограниченном количестве точек. Но качество нагрева оценивается по средней температуре и температурному перепаду по объему.

Можно выделить три наиболее характерных типа систем автоматического управления (САУ) нагревом в кузнечных индукционных нагревателях:

1. Разомкнутые по температуре САУ с программным управлением.
2. Замкнутые САУ с отбором сигнала обратной связи от модели нагревателя.
3. Замкнутые САУ с обратной связью по температуре одной или нескольких точек нагреваемого объекта.

Первый тип систем применяется при несущественных или предсказуемых возмущениях, воздействующих на систему. Получить программу управления можно основываясь на результатах численной модели, которая обладает достаточной точностью, или экспериментальным путем во время пуско-наладочных работ. В стационарном режиме такая система обеспечивает качественный нагрев, однако в нестационарном режиме возникают значительные возмущения теплового режима, приводящие к большому количеству брака.

Второй тип систем управления с обратной связью от модели нагревателя может обеспечить качественный нагрев заготовок при достаточной точности модели и соответствующих алгоритмах управления, а так же требуется знать зависимость между температурами в наблюдаемых и ненаблюдаемых точках, которую можно получить из математических моделей.

Третий тип систем управления с обратной связью по температуре от контрольных точек нагреваемого объекта может обеспечить качественный нагрев заготовок при обеспечении достаточной точности съема температуры в контрольных точках и соответствующих алгоритмах управления. Базовые значения параметров нагрев для системы управления могут быть получены, так же как для САУ 1-ого типа, из результатов вычисления численной модели или экспериментальным путем во время пусконаладочных работ.

САУ 3-его типа с несколькими точками контроля температуры, как правило, подразумевает наличие пирометрического контроля температуры после каждого индукционного модуля индукционного нагревателя, такой подход позволяет подробно контролировать процесс нагрева, однако при взаимном влиянии индукторов друг на друга негативно влияет на качество регулирования, что может приводить к существенному затягиванию процесса регулирования. Так же стоит отметить, что высокопроизводительные нагревательные линии в кузнечном производстве могут

содержать десятки индукционных модулей, из-за чего система управления становится излишне сложной. В связи с этим исследование регулирования нестационарных режимов работы модульных индукционных нагревателей проводились с целью определить возможности снижения изменений температурного поля загрузки на выходе индукционного нагревателя при помощи САУ 3-его типа с одной точкой контроля температуры внутри УИН при регулировании нагрева во время переходного процесса, т.е. только одним индукционным модулем (активной зоной).

В программной среде Universal2D было проведено моделирование нагрева стального прутка в проходном модульном индукционном нагревателе. Применение метода многозонного нагрева позволяет достичь значительного эффекта во время переходных процессов, возникающих при работе установки во время первоначального старта, при разгрузке, из-за изменения производительности или смены сортамента. Это объясняется тем, что модульная структура позволяет применять различные алгоритмы задания мощности на каждом участке линии нагрева независимо друг от друга, что в сочетании с малой инерционностью индукционной системы позволяет эффективно отработать возникшие в процессе нагрева возмущения, тем самым минимизируя количество брака при нагреве.

Результаты численного моделирования процесса нагрева цилиндрических заготовок с использованием нескольких модулей с независимыми преобразователями частоты показали высокую эффективность индукционных нагревателей с такой конфигурацией. Они дают возможность создания высокоэффективной и надежной системы управления кузнечным индукционным нагревателем на базе трех и более модулей.

В рассматриваемом случае в установке из трех модулей управление нагревом заготовки происходит только на втором модуле («активная зона») по пирометру, точка визирования которого располагается в определенной точке внутри второго индуктора, при этом мощность на первом и третьем индукторе поддерживается на постоянном уровне (рис. 7). Из рис. 8 видно, что при условии достижения одинаковой температуры на выходе из индукционного нагревателя, температурные кривые при различной производительности, пересекаются в одной точке внутри второго индукционного модуля. Это позволяет при поддержании температуры в этой особой точке на постоянном уровне за счет изменения мощности второго индуктора добиваться минимальных отклонений температуры заготовки на выходе в процессе перехода на новый режим.

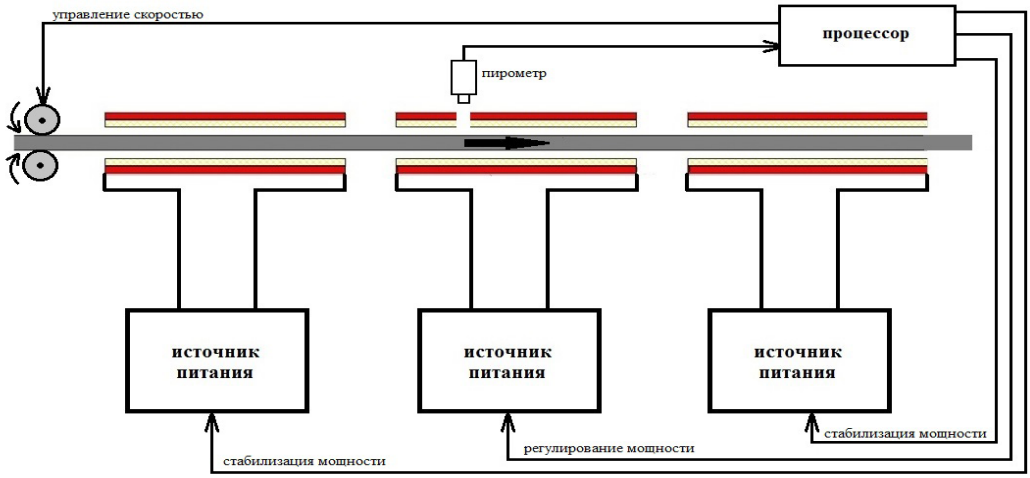


Рис. 7. Схема системы управления модульным индукционным нагревателем 3-его типа с одной точкой контроля

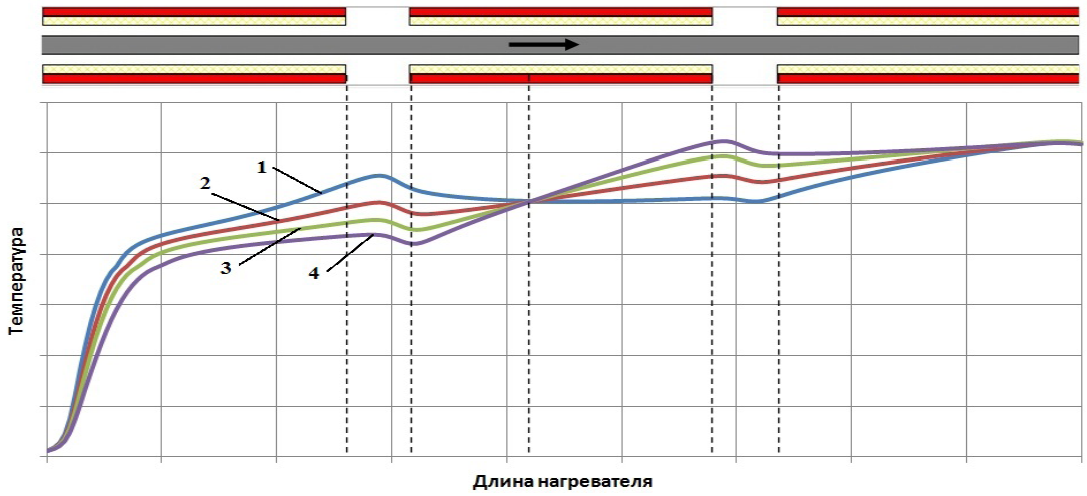


Рис. 8. Распределение температурного поля на поверхности заготовки по длине модульного индукционного нагревателя с использованием САУ 3-его типа с одной точкой контроля для различных производительностей: 1 – 3,5 т/ч, 2 – 4,125 т/ч, 3 – 4,7 т/ч, 4 – 5,5 т/ч

Для нагреваемых теплотехнически тонких тел с линейными свойствами было аналитически доказано существование этой точки [6]. Для цилиндрических нелинейных тел моделирование показало, что при поддержании постоянно определенной температуры в точке пересечения температурных кривых, путем регулирования мощности генератора с обратной связью по температуре, фиксируемой оптическим пирометром в точке контроля, данный метод регулирования позволяет практически полностью убрать колебания температуры загрузки на выходе индукционной нагревательной установки мерных заготовок диаметром 130 мм и длиной 420 мм во время переходных процессов (рис. 9) [7, 8, 9].

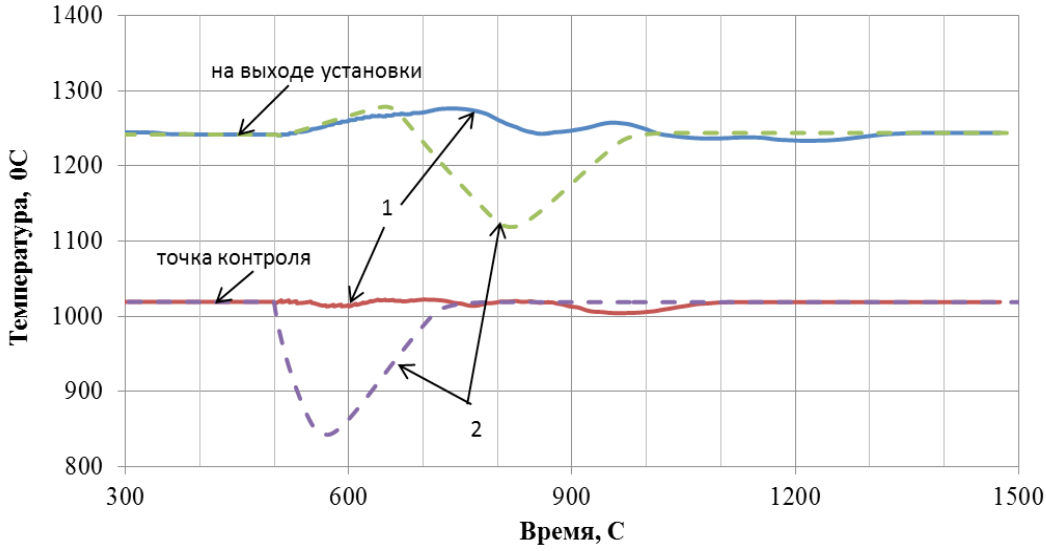


Рис. 9. График изменения температуры поверхности заготовки при использовании САУ 3-его типа с одной точкой контроля (1) и САУ 1-ого типа (2) во время переходного процесс при изменении производительности с 4,7 т/ч до 3,5 т/ч

На рис. 10 показано как изменяется мощность второго индуктора в процессе регулирования. Отдельно были рассмотрены случаи регулирования переходных процессов во время первоначального пуска с пустого индуктора и во время разгрузки индукционной системы. Как видно из рис. 11, использование системы управления с обратной связью по температуре, фиксируемой в центральном модуле, позволяет в значительной мере сократить, или даже полностью избежать некачественного нагрева заготовок [10].

Так же был рассмотрен случай регулирования переходных процессов во время кратковременной остановки с последующим горячим пуском. Из результатов моделирования, представленных на рис. 12, видно, что предлагаемая система управления в данном случае дает значительного улучшения нагрева.

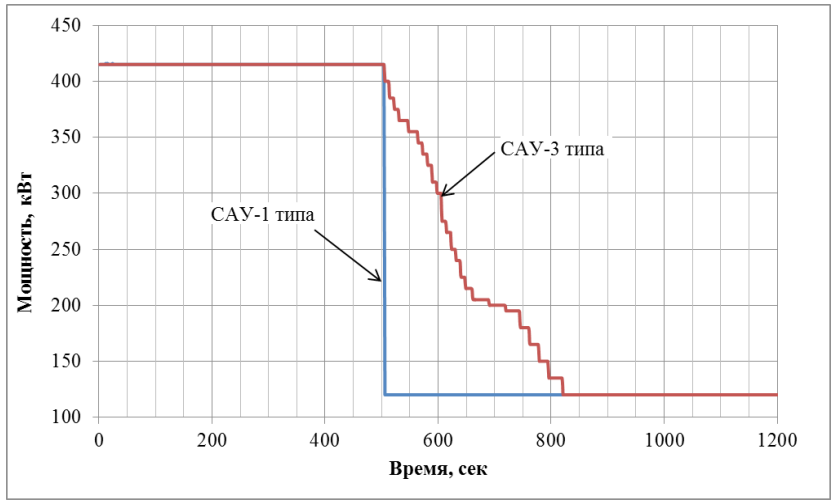


Рис. 10. График изменения мощности на втором модуле при изменении производительности с 4,7 т/ч до 3,5 т/ч

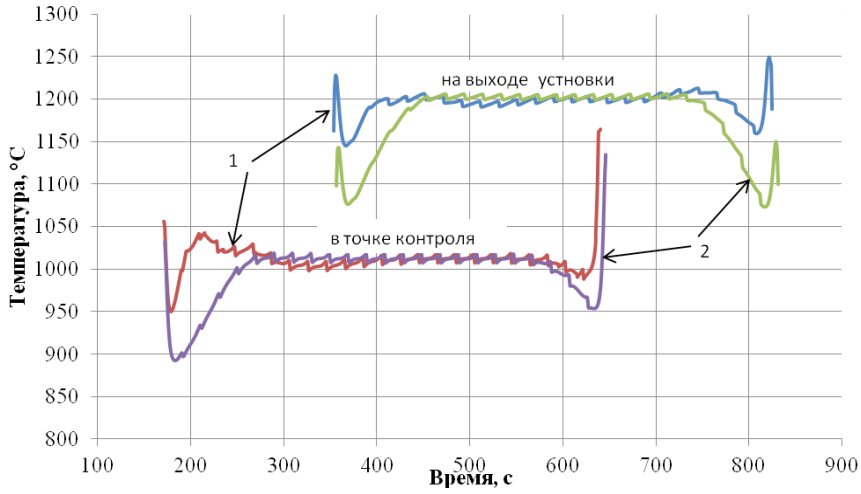


Рис. 11. График изменения температуры поверхности заготовки при использовании САУ 3-его типа с одной точкой контроля (1) и при работе 2-ого индуктора на номинальном напряжении(2)

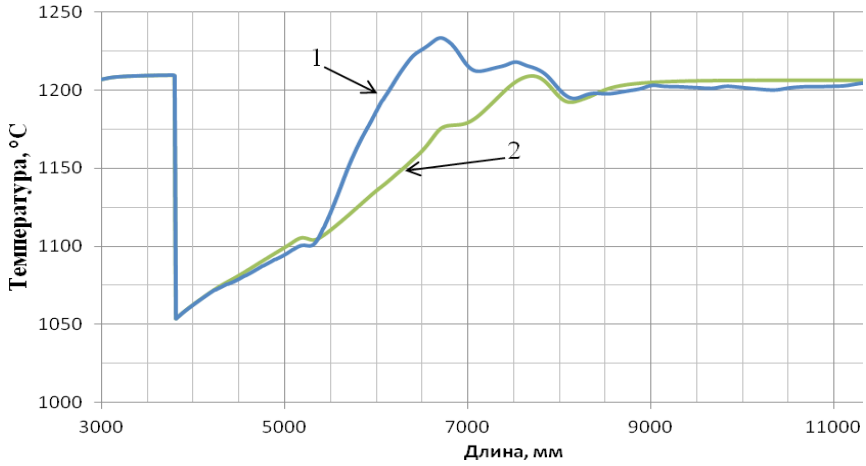


Рис. 12. График изменения средней температуры заготовки на выходе установки при повторном пуске после пятиминутной остановки работы. 1 – с при использованием САУ 3-его типа с одной точкой контроля; 2 – при номинальной мощности на 2-м индукторе при включении

Таким образом, можно сказать, что рассматриваемая САУ с зонным управлением, позволяет гибко и точно адаптировать модульный индукционный нагреватель при работе с изменяющейся производительностью и сортаментом нагреваемых заготовок, сохраняя при этом высокую энергоэффективность системы и максимально возможную стабильность технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Risch M., Walther A., Thus A. Innovative concept using IGBT multiconverter technology. HEAT PROCESSING, (4) issue 1. – 2006. – PP. 43–45.
2. Демидович В.Б., Оленин В.А., Григорьев Е.А., Ситько П.А. Модульные индукционные установки в кузнечном производстве. Индукционный нагрев. – 2013. – Вып. N°4 (26).
3. Brown D. Modular induction system offers billet-heating advantage. Forge, January 2008. – PP. 13–16.
4. Forge operators boost productivity and energy efficiency with new induction furnace technology /Jochen Gies, Dirk M. Schibisch // HEAT PROCESSING (9). – 2011.
5. Демидович В.Б. Компьютерное моделирование и оптимальное проектирование энергосберегающих технологий индукционного нагрева металлов. Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2012. – Вып. 6. – С. 48–63.
6. Demidovich V., Blake E., Churchill R. United States Patent SINGLE-POINT TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR A MULTI-SECTION LINE FURNACE / Patent No.: US 6,259,071 B1 July 10. – 2001.
7. Демидович В.Б., Ситько П.А. Модульный индукционный нагреватель цилиндрических заготовок непрерывного действия. РФ Патент N° 136665, 10 января 2014.
8. Demidovich V.B. Computer simulation and optimal designing of energy-saving technologies of the induction heating of metals, Thermal Engineering. 2012, vol. 59, N° 14, pp. 1023-1034.
9. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Компьютерное моделирование устройств индукционного нагрева – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – С. 160.
10. Demidovich V.B., Andrushkevich V.V., Mikhlyuk A.I., Rastvorova I.I. Advanced electrothermal 3D-model of the continuous induction heaters – Proceedings – 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016. – P. 96–99.

REFERENCES

1. Risch M., Walther A., Thus A. Innovative concept using IGBT multiconverter technology. HEAT PROCESSING. – (4) issue 1. – 2006. – PP. 43–45.
2. Demidovich V.B., Olenin V.A., Grigoriev E.A., Sitko P.A. Modular induction installations in forging. Induction heating. – 2013. – No.4 (26) (in Russian).
3. Brown D. Modular induction system offers billet-heating advantage. Forge, January 2008. – PP. 13–16.
4. Forge operators boost productivity and energy efficiency with new induction furnace technology / Jochen Gies, Dirk M. Schibisch // HEAT PROCESSING (9). – 2011. (in Russian).
5. Demidovich V.B. Computer modeling and optimal design of energy-saving technologies for induction heating of metals. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energy. – 2012. – Issue. 6. – P. 48–63. (in Russian).
6. Demidovich V., Blake E., Churchill R. United States Patent SINGLE-POINT TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR A MULTI-SECTION LINE FURNACE / Patent No : US 6,259,071 B1 July 10. – 2001.
7. Demidovich V.B., Sitko P.A. Modular induction heater of cylindrical billets of continuous action. RF Patent No. 136665, January 10. – 2014. (in Russian)
8. Demidovich V.B. Computer simulation and optimal designing of energy-saving technologies of the induction heating of metals, Thermal Engineering. – 2012. – Vol. 59. – no. 14. – PP. 1023–1034.
9. Demidovich V.B., Chmilenko F.V. Computer modeling of induction heating devices – SPb.: SPbGETU "LETI". – 2013. – P. 160. (in Russian).
10. Demidovich V.B., Andrushkevich V.V., Mikhlyuk A.I., Rastvorova I.I. Advanced electrothermal 3D-model of the continuous induction heaters – Proceedings – 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016. – P. 96–99.

Статья поступила в редакцию 21.01.2021 г.

УДК 539.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГО- И ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ОСЕВОМ НАГРУЖЕНИИ С НЕСИММЕТРИЧНЫМ ЦИКЛОМ

Э.Б. Завойчинская

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация

Представлены результаты анализа много- и гигацикловой усталости 9–12 % мартенситной хромистой стали при асимметричных нагружениях в рамках подхода теории усталостного масштабно-структурного разрушения. Обсуждены результаты расчетов по предложенному методу оценки ресурса лопаток из никелевого сплава ЖС6К и алюминиевого сплава ВД17 при их возможных резонансных вынужденных колебаниях. Построены предельные кривые по уровням дефектности.

Ключевые слова: усталость, масштабно-структурное разрушение, ресурс

MODELLING OF MULTI- AND HYGACYCLE FATIGUE OF GAS TURBINE ENGINE BLADE MATERIALS AT AXIAL ASYMMETRIC LOADING

E.B. Zavoychinskaya

Moscow State University named after M.V. Lomonosov,
Moscow, Russian Federation

The results of the analysis of 9–12 % martensitic chromium steel multi- and gigacycle fatigue at asymmetric loading on the approach of the fatigue scale-structural theory are presented. The results of calculations using the proposed method for the nickel alloy and aluminum alloy blade resource assessing at the possible resonant forced vibrations are discussed. Failure curves were plotted for defect levels.

Keywords: fatigue, scale-structural failure, resource

E-mail: elen@velesgroup.com

Введение

Современное развитие фундаментальной теории безопасности эксплуатации газотурбинных двигателей приводит к необходимости системных исследований вопросов разрушения рабочих лопаток различных ступеней турбин и компрессоров, в

большинстве случае определяющих ресурс и межремонтный период всей конструкции. Параметры конструкционных и техногенных рисков должны обосновываться по критериям долговечности с учетом потенциальных опасностей достижения предельных состояний конструкционных материалов [1].

Охлаждаемые лопатки компрессора или турбины газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации подвергаются в общем случае растяжению при вращении вала двигателя, изгибающим и крутящим моментам от центробежных и аэродинамических сил. Они находятся в условиях сложного асимметричного нагружения, представляющего собой случайный набор циклов с различными частотами, амплитудами и постоянными составляющими напряжения.

На сегодня статические нагрузки достаточно точно прогнозируются и учитываются на стадиях проектирования. Известно, что с точки зрения разрушения собственные колебания опасности не представляют. Анализ отказов промышленных турбоагрегатов показывает, что в 80 % случаев аварии происходят из-за усталостных повреждений.

Усталостные разрушения турбинных и компрессорных лопаток энергетических стационарных газотурбинных установок, газоперекачивающих агрегатов магистральных трубопроводов происходят достаточно редко, т.к. они отстраиваются по частотам в процессе доводки, работают преимущественно на стационарных режимах и связаны, в основном, с накоплением коррозионных повреждений, механических повреждений и др. Особенностями обладают длинные лопатки последних ступеней паровых турбин, в которых реализуется осевое напряженное состояние с большой асимметрией цикла растяжения вследствие центробежных сил (длина таких лопаток порядка полутора метров) с коэффициентом асимметрии цикла R, равном отношению минимального к максимальному напряжениям в цикле, до значений $R = 0{,}7$ при частоте вращения диска до 50 Гц и частоте вынужденных колебаний лопаток, в среднем, до 200 Гц. Длительные сроки службы турбин приводят к необходимости исследовать области много- и, в особенности, гигацикловой усталости лопаток при асимметричном нагружении. В длинных лопатках также возможны разрушения, связанные с их автоколебаниями.

Много- и гигацикловая усталость лопаток связана, в основном, с резонансными вынужденными колебаниями в местах концентрации переменных напряжений, когда частота возмущающей силы совпадает с одной из частот собственных колебаний. Причинами вынужденных колебаний могут являться: турбулентность газового потока при вращении вала, парциальность подвода газа к рабочей лопатке в цикле работы, неоднородная периодическая нагрузка (неравномерность потока из различных сопловых каналов), изменения частоты собственных колебаний и частоты вращения диска по сравнению с проектной. Вынужденные колебания могут приводить к изменению геометрии межлопаточного пространства и, как следствие, изменять картину течения газового потока и действующее распределение газодинамического давления.

Лопатки турбин и компрессоров авиационных газотурбинных двигателей наиболее подвержены усталостным разрушениям. За цикл работы: запуск – основной режим – остановка, лопатка попадает на короткий период времени в условия вынужденных резонансных колебаний по одной из собственных частот. Вероятность усталостных разрушений сохраняется и для современных дисков компрессоров в виде моноколес вместо колес ротора с механическим креплением лопаток. Согласно паспортным данным частоты собственных колебаний лопаток находятся в диапазоне от 150 Гц (для первых ступеней) до 3700 Гц (для последних ступеней), вынужденных колебаний – от 400 Гц до 4500 Гц, соответственно возможно совпадение частот. При этих частотах на базе 15 000 часов числа циклов наработки лежат в диапазоне $N \in [10^9, 10^{11}]$ циклов, т.е.

лопатки находятся в областях гигацикловой усталости. На шлифах обнаруживаются блоки усталостных микротрещин (бороздок) вблизи геометрических концентраторов структуры в зависимости от числа актов вхождения в резонанс.

Усталость лопаток в большей части связана с состоянием поверхностного слоя. При этом много- и, в особенности, гигацикловая усталость связаны с вероятным возникновением очагов микроразрушения в объеме тела от технологических дефектов вследствие несовершенства процессов штампования, термообработки и литья лопаток и структурной неоднородности металла. Эксплуатация лопаток происходит при возможном накоплении внутренних микродефектов, и возникает вероятностная проблема определения долговечности и остаточного ресурса.

Экспериментально обнаруживается, что усталостные микро- и макротрещины возникают перпендикулярно оси лопатки в корневом сечении в зоне концентрации напряжений, в основном, от изгибных форм колебаний. Поэтому с точки зрения исследований усталости определяющим полагается осевое напряжение в корневом сечении лопатки в виде суммы постоянной составляющей напряжения σ_m и дискретного спектра с набором амплитуд σ_{a_k}, круговых частот ω_k и сдвигов фаз φ_k, $\varphi_0 = 0$, k = 1,...K, таким образом:

$$\sigma = \sigma_m + \sum_{k=1}^{K} \sigma_{a_k} \sin\left(\omega_k t - \varphi_k\right), \ \ \omega_1 \le \omega_2 \le \ldots \le \omega_K, \ \ t \in \left[0, T\right] \qquad (1)$$

где T— время работы лопатки. Частоту ω_k связывают с угловой скоростью вращения диска ω_d. Известно [2], что при k = 1 вращающаяся лопатка имеет частоту вынужденных колебаний ω_1 больше ω_d и резонанса не возникает. Опасными считаются переменные напряжения при k = 2,..6. С увеличением значения k амплитуды возмущающих сил убывают.

Напряжение σ_m в этой работе определяется из известных соотношений для упругой консольной балки с прямолинейной осью, проходящей через центры масс сечений, как максимальное значение в корневом сечении суммы растягивающих напряжений от центробежных сил и изгиба от аэродинамических сил. Также ограничиваемся изучением одночастотного нагружения с частотой ω и амплитудой σ_a, при которых возможен резонанс, вида:

$$\sigma = \sigma_a \left(\alpha + \sin \omega t\right), \ \ \alpha = \sigma_m / \sigma_a, \ \ t \in \left[0, T\right] \qquad (2)$$

$\alpha = \sigma_m / \sigma$ – параметр асимметрии цикла. Амплитуды колебаний σ_a определяются для разных прогибов лопатки из известного решения задачи изгиба консольной балки, жестко закрепленной в обод диска, без связей.

Моделирование развития много- и гигацикловой усталости и метода оценки ресурса лопаток при нагружении (1) строится на теории усталостного масштабно-структурного разрушения [3, 4], согласно которой на основе системы гипотез о стадийном развитии дефектов на микро-, мезо- и макромасштабных уровнях формулируются определяющие соотношения для функции распределения вероятности достижения предельных состояний на каждом из уровней и система уравнений многоуровневой повреждаемости. В качестве переменной выбирается амплитуда напряжения, материальные функции определяются в зависимости от параметра асимметрии цикла по данным усталостных испытаний с учетом результатов физических исследований по развитию хрупких трещин.

В данной работе представляются результаты анализа развития усталостного разрушения в никелевом сплаве компрессорных лопаток и алюминиевом сплаве тур-

бинных лопаток авиационных газотрубинных двигателей [5–8] и в 9–12 % мартенситной хромистой стали лопаток последних ступеней паровых турбин [9–11].

Результаты расчетов ресурса лопаток из никелевого и алюминиевого сплавов

Метод оценки ресурса основывается на теории усталостного масштабно-структурного разрушения. В областях много- и гигацикловой усталости макроразрушение имеет место, в основном, по коротким трещинам, относимых к дефектам четвертого мезоуровня зерна или группы зерен, при упругом макродеформировании. Записываются определяющие соотношения для функций распределения вероятности достижения предельных состояний дефектов четырех уровней.

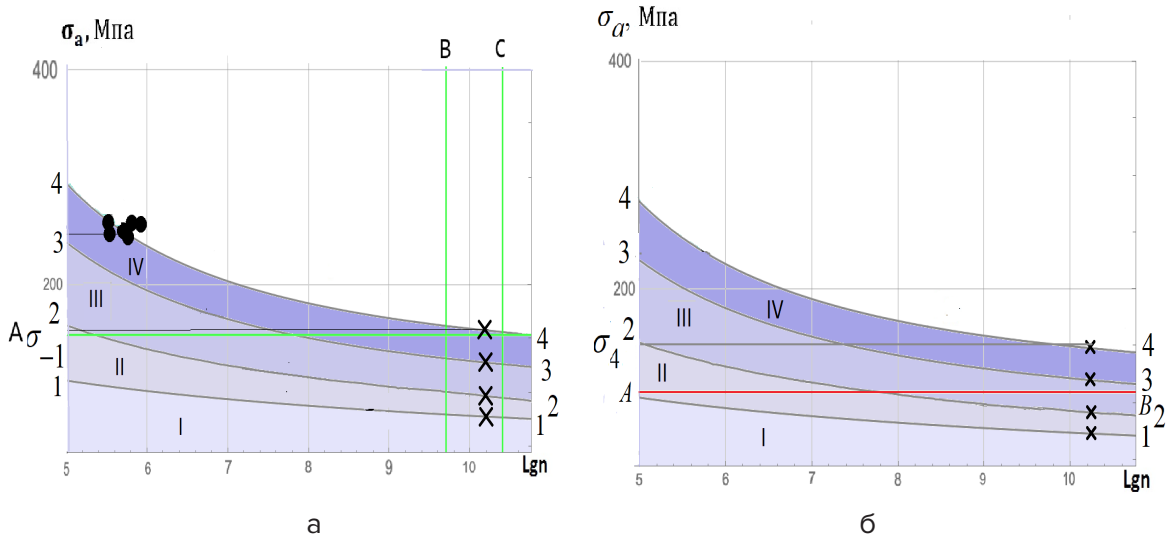
Для симметричного нагружения никелевого сплава ЖС6К (предел усталости σ_1 = 151 МПа на базе N_{-1}= 2·10^{10} при частоте f = 4 кГц) на рис. 1 а представлены рассчитанные по модели [3, 4] области развития дефектов четырех уровней (I – IV) и кривые усталости по этим уровням (1-1 – 4-4).

Определив постоянную составляющую осевого напряжения σ_m= 22,5 МПа для лопатки из никелевого сплава ЖС6К турбокомпрессора двигателей М-601 самолета Л-410 по данным [12], находится амплитуда напряжения при прогибе w = 1,7 мм, равная σ_a= 110 МПа, и параметр асимметрии α = 0,2. Для нагружения (1), α = 0,2, на рис. 1 б изображены области развития дефектов четырех уровней (I – IV) и кривые усталости (1-1 – 4-4), построенные по модели. Горизонтальной линией *AB* отмечено нагружение при прогибе w = 1,7 мм. Из рис. 1 видно, что до числа циклов, в среднем, $N \in [6 \cdot 10^4, 10^8]$ циклов, имеет место развитие микротрещин, в дальнейшем возможно образование коротких трещин и их рост.

При больших прогибах лопатки амплитуда возрастает, параметр асимметрии уменьшается. При прогибе w = 2,5 мм (и амплитуде σ_a = 160 МПа) процесс можно считать почти симметричным (α = 0,14) и при таком нагружении по рис. 1 (а) имеем развитие дефектов четвертого уровня (горизонтальная линия *A*).

В эксплуатации при наработке около 370–1670 часов $N \in [0{,}53–2{,}4] \cdot 10^{10}$ циклов наблюдались усталостные разрушения лопаток [12]. По фрактографиям излома при усталостном обрыве лопатки (по корневому сечению в пределах замковой части) [5–8] обнаруживается, что зарождение микротрещин происходило по кристаллографической плоскости зерна 1 под поверхностью лопатки, далее они накапливались и в результате слияний по зерну 2 возникали блоки мезолиний коротких нераспространяющихся трещин (относимых по модели к дефектам третьего уровня), возможно, вследствие многократного вхождения лопатки в резонанс. По паспорту частота собственных колебаний по первой изгибной форме лежала в диапазоне $f \in [4{,}42–4{,}52]$ кГц, в рабочем положении возможны вынужденные колебания лопаток с амплитудой σ_a= 48 МПа при частоте, в среднем, $f \in [4{,}05–4{,}2]$ кГц. Таким образом, в рассматриваемых лопатках были возможны резонансные вынужденные колебания. Отметим, что с образованием трещин частота собственных колебаний уменьшается, и резонанс возможен на все большем числе рабочих режимов.

По рис. 1 а для никелевого сплава находится, что в рассматриваемом диапазоне числа циклов макроразрушение по коротким трещинам возможно при амплитудах, лежащих в диапазоне $\sigma_a \in [155, 165]$ МПа. Отсюда следует, что в разрушенных лопатках, возможно, возникли резонансные колебания с эффективным коэффициентом концентрации напряжений K = 3,3.



а б

Рис. 1. Области развития дефектов I – IV, кривые усталости по уровням 1-1 – 4-4 для никелевого сплава ЖС6К, а – симметричное нагружение, б – α = 0,2

Для алюминиевого сплава ВД17 лопатки турбины двигателя Д30 по характеристикам потока газа, геометрии и числа лопаток, частоте вращения и радиусе диска [12] получено [5–8], что постоянная составляющая осевого напряжения мала и нагружение можно рассматривать как симметричное. По модели построены области развития и кривые усталости по четырем уровням дефектов.

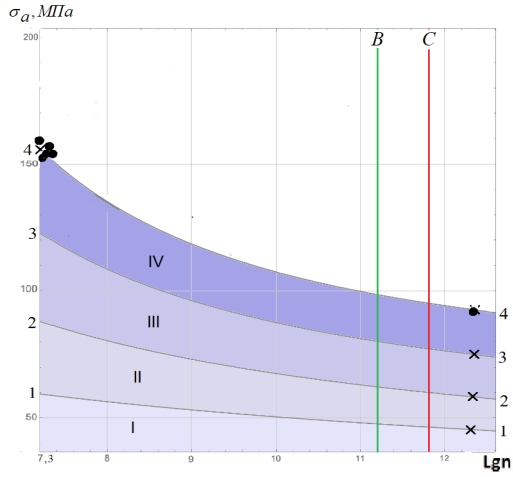


Рис. 2. Области развития дефектов I – IV, кривые усталости по уровням 1-1 – 4-4 для алюминиевого сплава ВД17 при симметричном нагружении

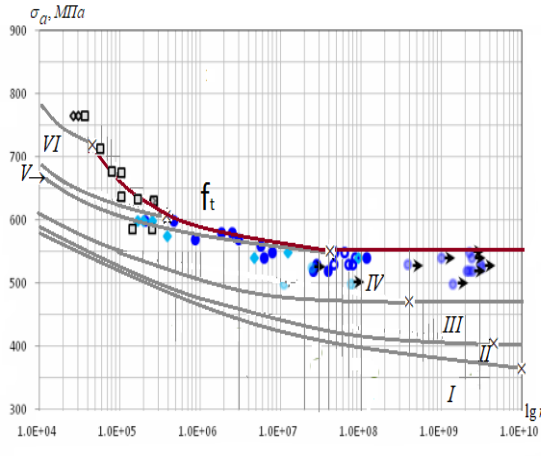
В эксплуатации на базе около 18 000 часов (N = 2,45·10^{11} циклов) наблюдались разрушения отдельных лопаток от очага образования микродефектов в объеме тела при $\sigma_a \in$ [19,22] МПа для лопаток первой ступени и σ_a = 10 МПа для лопаток второй ступени соответственно. Расчет по модели показывает, что в разрушенных лопатках возникла концентрация напряжений с эффективными коэффициентами концентрации K = 4,7 и K = 9,7 для первой и второй ступеней соответственно.

Анализ закономерностей развития много- и гигациклевой усталостимартенситных хромистых сталей

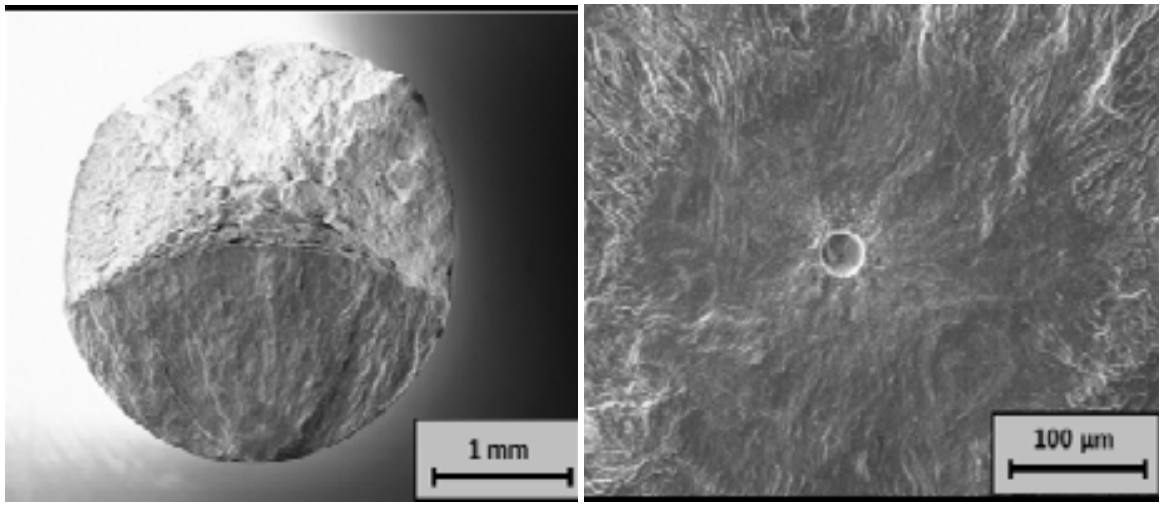
В представительном экспериментальном материале [9–11] при одноосном симметричном нагружении ($\alpha = 0$) мартенситных хромистых сталей лопаток последних ступеней паровых турбин показывается, что в области гигацикловой усталости, в среднем, $N \geqslant 4 \cdot 10^7$ циклов, реализуется механизм хрупкого разрушения. Очаги микроразрушения зарождаются и развиваются в обьеме тела от геометрических концентраторов структуры: включений (например, оксидных включений AlCaO или AlCaMgO) размеров, в среднем, от 0,016 до 0,045 мм [13], литейных дефектов (раковин, пор и др.), границ раздела зерен, и др., и имеют морфологию т.н. «рыбьего глаза» – области темного цвета мелкогранулированной зернистой структуры, по границам которой имеет место разупрочнение материала с формированием свободной поверхности и образованием микродефектов. С ростом числа циклов формируется область с рельефом типа строчечности низкой шероховатости и образуются мезодефекты типа коротких трещин. В области много- и гигацикловой усталости большую часть долговечности составляет время образования и развития микротрещин и коротких трещин, в среднем, размера зерна и зеренных ансамблей, по которым происходит хрупкое макроразрушение по механизмам транскристаллитного или межзеренного скола практически без стадии роста макротрещин. В области многоцикловой усталости развитие макродефектов определяет в значительной мере активность поверхностного слоя (неоднородности его химического состава, остаточные напряжения и др.). В области ограниченной усталости, в среднем, $N \leqslant 10^6$ циклов, микродефекты возникают на поверхности образца и связаны с состоянием поверхностного слоя. С ростом числа циклов в результате развития макродефектов возможно формирование хрупкой макротрещины-лидера.

Для 9–12 % мартенситной хромистой стали [9–11] со следующими характеристиками: предел статической прочности $\sigma_{вр} = 1001$ МПа, предел текучести $\sigma_s = 843$ МПа, предел выносливости $\sigma_{-1} = 505$ МПа при $N_{-1} = 4{,}66 \cdot 10^7$ циклов, найдены базовые константы модели (отмечены крестиками на рис. 3 а), построены области развития дефектов шести уровней I – VI и кривые усталости по уровням дефектности и кривая усталости по хрупкому разрушению ft при симметричном нагружении. На рис. 3 а пустотелые кружки представляют опытные данные для образцов, в которых очаг микроразрушения возникал в обьеме тела с образованием «рыбьего глаза» от оксидного включения. На рис. 3 б (в разных масштабах) представлена поверхность макроразрушения на пределе выносливости с очагом разрушения «рыбий глаз» над включением. Опыты, в которых микроразрушение начиналось с поверхности образцов, отмечены сплошными кружками. Стрелками отмечены разрушенные образцы. Черными квадратами и черными кружками представлены опытные данные [9–11] при ультразвуковом нагружении (с частотой до 20 кГц), светлыми серыми кружками – при нагружении с частотой 100 Гц. Для исследуемых сталей практически отсутствует влияние частоты нагружения на усталостные свойства в диапазоне от 1 Гц до 20 кГц. Расчеты по модели удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным в области $N_f \in [6 \cdot 10^4, 4 \cdot 10^9]$ циклов.

При нагружении (1), $\alpha = 1{,}22$ ($R = 0{,}1$) на рис. 4 а представлены области развития дефектов (базовые характеристики отмечены звездочками), кривые усталости по уровням дефектности и по хрупкому макроразрушению ft, рассчитанные по модели [3, 4]. Сплошные кружки обозначают опытные данные для образцов с очагами микроразрушения на поверхности, полые кружки – в обьеме тела. Кривая усталости ft в области $N_f \in [5 \cdot 10^5, 4 \cdot 10^9]$ циклов удовлетворительно соответствует опытным данным для стали [9–11]. На рис. 4 б (в разных масштабах) изображена поверхность разрушения (по дефектам четвертого уровня) с характерным очагом разрушения «рыбий глаз».



а



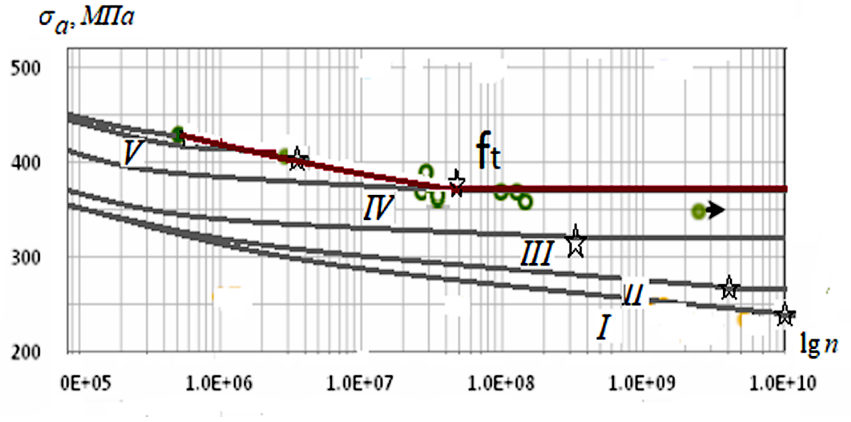
б

Рис. 3. а – Области развития дефектов и кривые усталости по уровням дефектности и по хрупкому макроразрушению ft стали X10CrNiMoV12-2-2

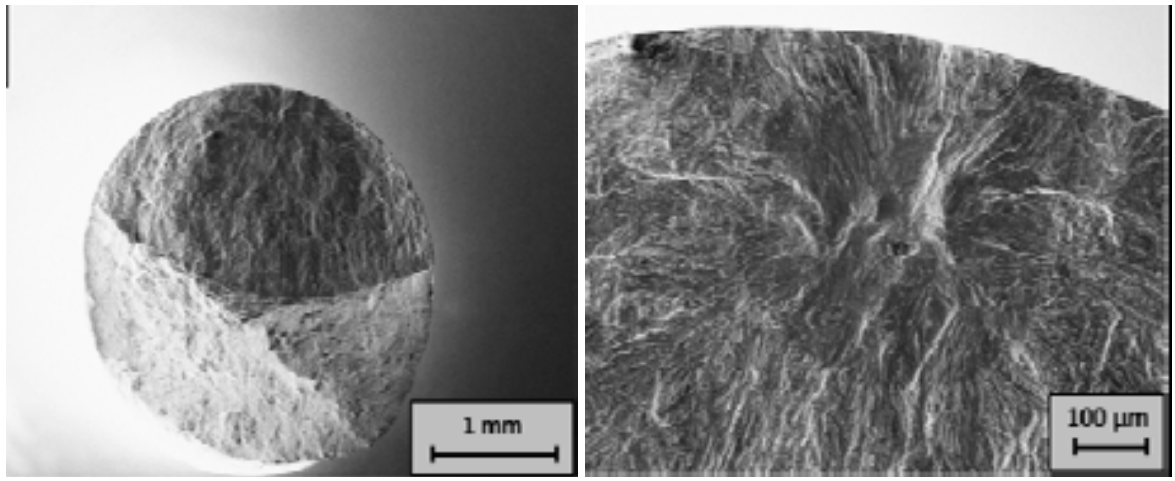
б – поверхность макроразрушения с очагом разрушения «рыбий глаз» над включением, σ_{-1} = 505 МПа и N_f = 4,66·10^7 циклов [9]

При больших асимметриях цикла ультразвуковые колебания приводят к образованию и развитию циклической ползучести и неупругому деформированию. Как показали измерения смещения образцов [9–11], с ростом асимметрии цикла полная осевая деформация, в среднем, увеличивается с ε = 0,4 % при коэффициенте асимметрии цикла R = 0,1 (α = 1,22) до ε = 4,5 % при R = 0,5 (α = 3). При α = 3 в экспериментах наблюдалось развитие усталостных микродефектов с ярко выраженным очагом «рыбий глаз» (рис. 5 а), образование и рост коротких трещин, но определяющим было развитие вязкого разрушения. Наложение ультразвуковых колебаний с амплитудой в три раза меньше постоянной составляющей цикла приводит к существенному увеличению предельного максимального напряжения цикла. Так, при σ_f = 250 МПа, N_f = 1,21·10^9 циклов, оно практически равно пределу статической прочности стали $\sigma_{вр}$. Влияние цикличности нагружения на прочность можно рассматривать по аналогии с влиянием температуры. По экспериментальным данным [9] на рис. 6 а нанесены сплошные кружки для образцов с началом микроразрушения на поверхности образца и полые

кружки – с очагами в объеме тела. Построенная кривая длительной прочности при асимметрии α = 3 представлена на рис. 6 а. Получено, что в этом случае предельное максимальное напряжение цикла мало меняется с ростом числа циклов и практически равно $\sigma_{вр}$.



а

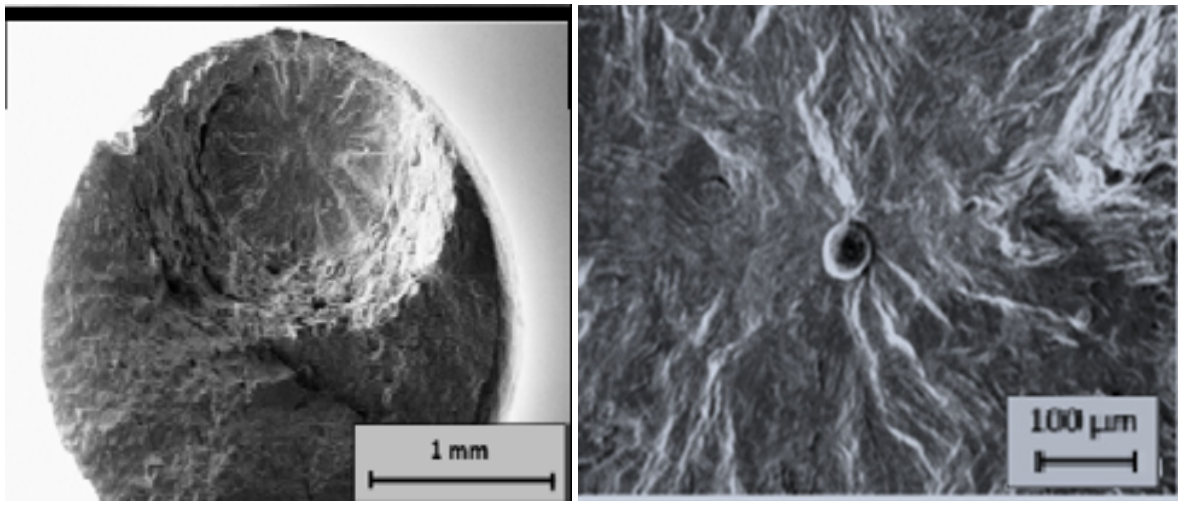


б

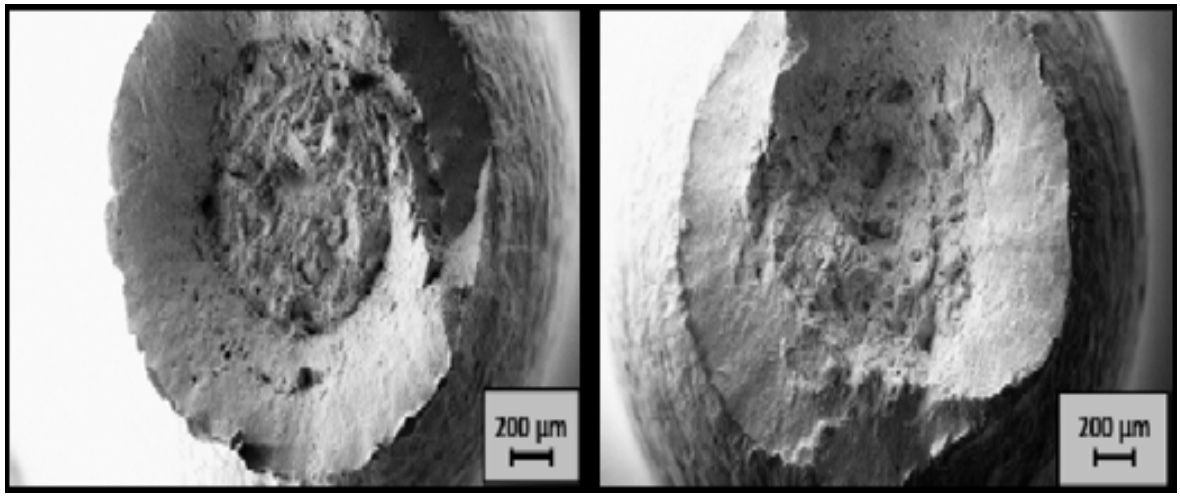
Рис. 4. а – Области развития дефектов, кривые усталости по уровням дефектности и по хрупкому макроразрушению *ft* стали X10CrNiMoV12-2-2, α = 1,22
б – фотографии поверхности разрушения с очагом разрушения «рыбий глаз», α = 1,22, σ_{-1} = 370 МПа, N_f = 1,24·10^8 циклов [9]

При α = 5,7 (*R* = 0,7) наблюдалась установившаяся циклическая ползучесть и тип поверхности квазистатического разрушения в зоне излома без каких-либо явных признаков усталости (рис. 5 б и в). Определяющим является процесс вязкого разрушения при неупругом макродеформировании и удлинении образца. Параллельно развивается процесс по механизму хрупкого разрушения гигацикловой усталости с характерным очагом разрушения «рыбий глаз», но не определяет макроразрушение образцов. Экспериментальные точки (ромбы) при α = 5,7 ложатся на ту же кривую длительной прочности на рис. 6 а, что и при α = 3. Наблюдается слабая зависимость максимального предельного напряжения от числа циклов, процесс становится практически квазистатическим нагружением с предельным максимальным напряжением, равным пределу статической прочности материала $\sigma_{вр}$. Близость кривых при α = 3 и α = 5,7 означает, что процессы практически выходят на кривую длительной прочности стали.

В расчетах на усталость при асимметричных нагружениях применяют известные диаграммы Хея и Смита. На наш взгляд эти диаграммы имеют недостаток в том, что строятся для конкретных значений числа циклов *N* как зависимости предельной амплитуды напряжения σ_f (или максимального значения напряжения в цикле σ_{max}) от постоянной компоненты напряжения σ_m (или параметра асимметрии α). Результаты расчетов и опытные данные целесообразно представлять в виде предельной поверхности макроразрушения в координатах: σ_f (или σ_{max}), параметр асимметрии α и число циклов. Предельная поверхность, построенная по модели усталостного масштабно-структурного разрушения для рассматриваемой стали изображена на рис. 6 б в координатах $\left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{вр}},\ \alpha,\ \mathrm{N}\right)$. Отмечены линии уровня α = *const*, которые определяют расчетные предельные кривые при заданной асимметрии цикла: при |α|< 3 – кривые усталости по макроразрушению, при α ⩾ 3 – кривые длительной прочности. Синим цветом на рис. 7 обозначены линии уровня *N* = *const* (расчетные диаграммы Хея).



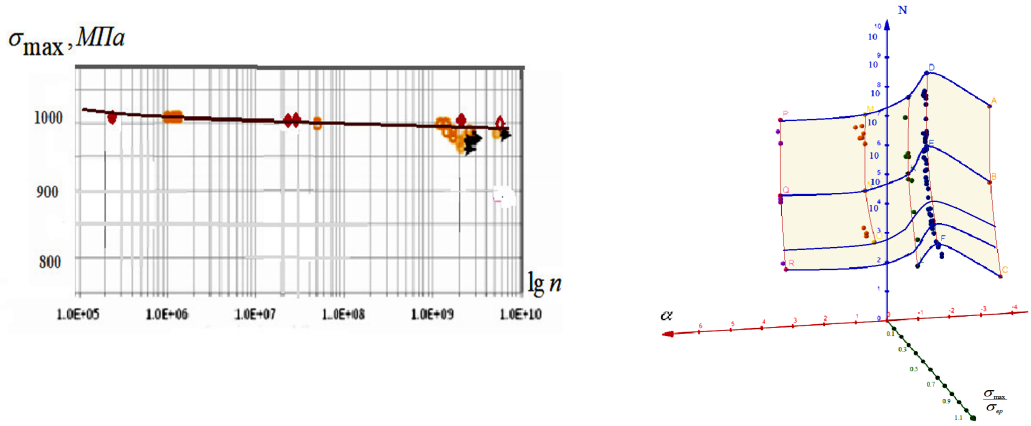
а



б в

Рис. 5. Фотографии макроразрушения стали X10CrNiMoV12-2-2 : а — с очагом разрушения «рыбий глаз», σ_f = 250 МПа, N_f = 1,21·10^9 циклов, α = 3; б — σ_f = 155 МПа, N_f = 2,35·10^5 циклов, α = 5,7; в — σ_f = 150, МПа, N_f = 2,28·10^7 циклов, α = 5,7 [9] [9]

Таким образом, представлены результаты исследования усталостного разрушения 9–12 % мартенситной хромистой стали в диапазоне чисел $N_f \in [4 \cdot 10^4, 10^{10}]$ циклов при нагружении с несимметричным циклом.



а б

Рис. 6. а – Кривая длительной прочности стали X10CrNiMoV12-2-2.
б – Диаграммы предельных значений параметров одноосного асимметричного процесса для стали X10CrNiMoV12-2-2

Построены области развития дефектов шести уровней и кривые усталости по соответствующим уровням дефектности при симметричном нагружении и нагружении с α = 1,22. Получено удовлетворительное соответствие известным экспериментальным данным по макроразрушению в области $N_f \in [6 \cdot 10^4, 4 \cdot 10^9]$ циклов. Изучено влияние асимметрии цикла на усталостное поведение при циклических растяжениях в областях $1{,}22 \leqslant \alpha \leqslant 3$. Проведен анализ много- и гигацикловой усталости при ультразвуковых колебаниях с коэффициентами асимметрии цикла $\alpha = 3$ и $\alpha = 5{,}7$ и построены кривые длительной прочности при этих асимметриях. В экспериментах определяющим является процесс вязкого разрушения в условиях установившейся циклической ползучести при высокочастотном нагружении и неупругом макродеформировании (удлинении образца). В обоих случаях получено, что предельное максимальное напряжение цикла мало меняется с ростом числа циклов и практически равно пределу статической прочности стали. Полученные результаты представлены в виде предельной поверхности макроразрушения в координатах $\left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{вр}},\ \alpha,\ \mathrm{N}\right)$, линии уровня $\alpha = const$ которой определяют при $|\alpha| < 3$ кривые усталости по макроразрушению, при $\alpha \geqslant 3$ – кривые длительной прочности. Линии уровня $N = const$ представляют расчетные диаграммы Хея.

ЛИТЕРАТУРА

1. Климовские чтения – 2020: перспективные направления развития авиадвигателестроения; сборник статей научно-технической конференции. — СПб.: Скифия-принт, 2020. — 344 с.
2. Исследование сопротивляемости конструкционных материалов случайным переменным нагрузкам / Капралов В.М. — Труды ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова — СПб: Изд-во ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2015. — N° 89-2. — С. 55–66.

3. Stochastic A Theory of Scale-Structural Fatigue and Structure Durability at Operational Loading / Zavoychinskaya E. — Understanding complex systems. — Springer Nature Switzerland AG. – 2021. — PP. 71–89.
4. On the Theory of Scale Structural Fatigue of Metals at the Proportional Loading/ Zavoychinskaya E.B. — Journal of Physics. —2020. – V. 1431. — PP. 012024-012032.
5. Завойчинская Э.Б. Прогнозирование ресурса лопаточного аппарата газотурбинного двигателя при асимметричном циклическом нагружении / Современные проблемы механики сплошной среды: Труды XX Международной конференции (Ростов-на-Дону, 18-21 июня 2020 г.): в 2т., / Завойчинская Э.Б. — Таганрог: Издательство Южного федерального университета. — Т. 2. —2020. — С. 97–101.
6. Об оценке ресурса лопаточного аппарата газотурбинного двигателя при асимметричном циклическом нагружении центробежными и аэродинамическими силами / Завойчинская Э.Б. — Многофазные системы. – 2020. — N° 1–2. — С. 42–43.
7. О методе оценки ресурса лопаточного аппарата газотурбинного двигателя при асимметричном циклическом нагружении центробежными и аэродинамическими силами / Завойчинская Э.Б. — Математическое моделирование и численные методы. – 2020. — N° 1 (25). — С. 45–63.
8. Завойчинская Э.Б. Прогнозирование ресурса лопатки газотурбинного двигателя при асимметричном цикле эксплуатационного нагружения / Материалы XXVI Международного Симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред имени А.Г. Горшкова в 2т. / Завойчинская Э.Б.— М.: ООО «ТРП». — Т.2. —2020. — С. 143–155.
9. Influence of mean stresses on fatigue life and damage of a turbine blade steel in the VHCF-regime / Kovacs S., Beck T., Singheiser L. — Int. J. of Fatigue. — 2013. — N 49. — P. 90–99.
10. Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles / Christ H.J.(Ed.). — Springer, 2018. — P. 627.
11. Fatigue behavior of X10CrNiMoV12-2-2 under the influence of mean loads and stress concentration factors in the very high cycle fatigue regime / Ritz F., Beck T., Kovacs S. — Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles. Christ H. J. (Ed.) / Ritz F., Beck T., Kovacs S. — Springer.– 2018. — PP. 253–272.
12. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации / Шанявский А.А. —Уфа: Издательство н.-.т. лит-ры «Монография». — 2007. — 500 с.
13. Quantitative evaluation of effects of non-metallic inclusions on fatigue strength of high strength steels. I: Basic fatigue mechanism and evaluation of correlation between the fatigue fracture stress and the size and location of non-metallic inclusions /Y. Murakami, S. Kodama, S. Konuma, — Int. J. of Fatigue. — 1989. — N 11. — PP. 291–298.

REFERENCES

1. Klimovsk Readings — 2020: Perspective directions of aircraft engine building; collection of scientific and technical articles. SPb .: Scythia-print. – 2020. – 344 p. (in Russian)
2. Kapralov V.M. Investigation of the structural material resistance to random variable loads. Proceedings of the Central Research Institute named after Acad. A.N. Krylova. SPb.: P.h. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. – 2015. – No. 89-2 (373-2). – PP. 55–66. (in Russian)
3. Zavoychinskaya E.A Stochastic Theory of Scale-Structural Fatigue and Structure Durability at Operational Loading. Understanding complex systems. Springer Nature Switzerland AG, – 2021.– PP. 71–89.

4. Zavoychinskaya E.B. On the Theory of Scale Structural Fatigue of Metals at the Proportional Loading. Journal of Physics. – 2020.– V. 1431. – PP. 012024-012032.
5. Zavoychinskaya E.B. About the gas turbine engine blade resource at asymmetric cyclic loading / Modern problems of continuum mechanics: Proc. of the XX Int. Conf. (Rostov-on-Don, June 18-21, 2020): in 2 volumes. Taganrog: Publishing House of the Southern Federal University. – V. 2.2020. – PP. 97–101. (in Russian)
6. Zavoychinskaya E.B. Gas turbine engine blade apparatus resource estimation at asymmetric cyclic loading by centrifugal and aerodynamic forces. Multiphase systems. – 2020. – N° 1–2. PP. 42–43. (in Russian)
7. Zavoychinskaya E.B. On the method of gas turbine blade resource estimation at asymmetric cyclic loading. Mathematical modeling and numerical methods. – 2020. – N° 1 (25). – PP. 45–63. (in Russian)
8. Zavoychinskaya E.B. About the gas turbine engine blade resource at asymmetric cycles of the operational loading / Mat. of the XXVI Int. Symp. “Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continuous media named after A.G. Gorshkov in 2v. M.: OOO «TRP». – V.2.2020. – PP. 143–155. (in Russian)
9. Kovacs S., Beck T., Singheiser L. Influence of mean stresses on fatigue life and damage of a turbine blade steel in the VHCF-regime. Int. J. of Fatigue. – 2013. – N° 49. – PP. 90–99.
10. Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles. Christ H. J.(Ed.). Springer, – 2018. – 627 p.
11. Ritz F., Beck T., Kovacs S. Fatigue behavior of X10CrNiMoV12-2-2 under the influence of mean loads and stress concentration factors in the very high cycle fatigue regime. Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles. Christ H. J.(Ed.). Springer. – 2018. – PP. 253–272.
12. Shanyavsky A.A. Modeling of metal fatigue. Synergetics in aviation. Ufa: P.h. "Monograph". – 2007. – 500 p. (in Russian)
13. Murakami Y., Kodama S., Konuma S. Quantitative evaluation of effects of non-metallic inclusions on fatigue strength of high strength steels. I: Basic fatigue mechanism and evaluation of correlation between the fatigue fracture stress and the size and location of non-metallic inclusions. Int. J. of Fatigue. – 1989. – N° 11. – PP. 291–298.

Статья поступила в редакцию 25.01.2021 г.

УДК 621.365.5

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СОРБЕНТОВ ИЗ ОТХОДОВ РАСТЕНИЕВОДСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЧ-ЭНЕРГОПОДВОДА

В.Ю. Кожевников, С.Г. Калганова, О.О. Коваленко

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
г. Саратов, Российская Федерация

Рассмотрены проблемы загрязнения сточных вод разливами нефти и нефтепродуктов и загрязнение окружающей среды твердыми побочными продуктами, образующимися при переработке сырья сельскохозяйственной отрасли и их влияния на окружающую среду. Проведено исследование СВЧ электротехнологии для получения сорбента из отходов растениеводства в лабораторных условиях. Разработана математическая модель в трехмерной постановке, описывающая процесс СВЧ-нагрева диэлектрика, который представляет собой самосогласованную задачу электродинамики и теплопроводности в СВЧ электротермических установках с камерой бегущей волны. Проведено моделирование процесса нагрева в СВЧ камере. Разработана и предложена схема установки для производства сорбентов из отходов растениеводства.

Ключевые слова: электротехнология, сорбенты, СВЧ нагрев диэлектриков

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF SORBENTS FROM CROP WASTE USING MICROWAVE ENERGY SUPPLY

V.Y. Kozhevnikov, S.G. Kalganova, O.O. Kovalenko

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Saratov, Russia Federation

The problems of waste water pollution by oil and oil products spills and environmental pollution by solid by-products formed during the processing of agricultural raw materials and their impact on the environment are considered. A study of microwave electrotechnology for obtaining a sorbent from crop waste under laboratory conditions was carried out. A mathematical model in a three-dimensional formulation is developed that describes the process of microwave heating of a dielectric, which is a self-consistent problem of electrodynamics and thermal conductivity in microwave electrothermal installations with a traveling wave chamber. The simulation of the heating process in the microwave chamber is carried out. The scheme of the plant for the production of sorbents from crop waste has been developed and proposed.

Keywords: electrical engineering, sorbents, microwave heating of dielectrics

E-mail: kovur1952@mail.ru, s.kalganowa2016@yandex.ru, Ksuha_96@inbox.ru

Защита окружающей среды от разливов нефти и нефтепродуктов – является одной из важных проблем современного мира. Одной из экологических проблем является загрязнение сточных вод нефтью и нефтепродуктами, которые распространяются в виде пленки на поверхности воды и препятствуют контакту и взаимодействию системы гидросфера – атмосфера, нарушая тем самым физико-химические и биологические процессы в водной среде. Что ведет к неконтролируемым изменениям климата Земли, нарушению баланса кислорода в атмосфере [1].

Таким образом, важной и весьма актуальной научно-прикладной задачей является разработка технических решений по очистке сточных вод и ликвидации разливов нефти с использованием новых, более дешевых и доступных адсорбентов.

В данной работе рассмотрена возможность производства углеродных сорбентов из растительного сырья, путем термохимической активации побочных продуктов растительного происхождения, а именно лузги подсолнечника с воздействием СВЧ-энергии.

Первым этапом работы по разработке технологии получения сорбента являлось проведение эксперимента в лабораторных условиях в СВЧ установке периодического действия описанной в [2].

В качестве сырьевых материалов для получения сорбентов использовалась монтмориллонит содержащая глина, лузга семечек и дистиллированная вода, которые были смешены в определенных пропорциях и нагреты до температуры, при которой протекает процесс термолиза (рис. 1).

Рис. 1. Фотография нагретого материала

В процессе эксперимента наблюдали за изменением температуры обрабатываемого материала под воздействием СВЧ-энергии.

Результаты измерения температуры нагрева материала приведены в виде графика зависимости температуры от времени нагрева на рис. 2.

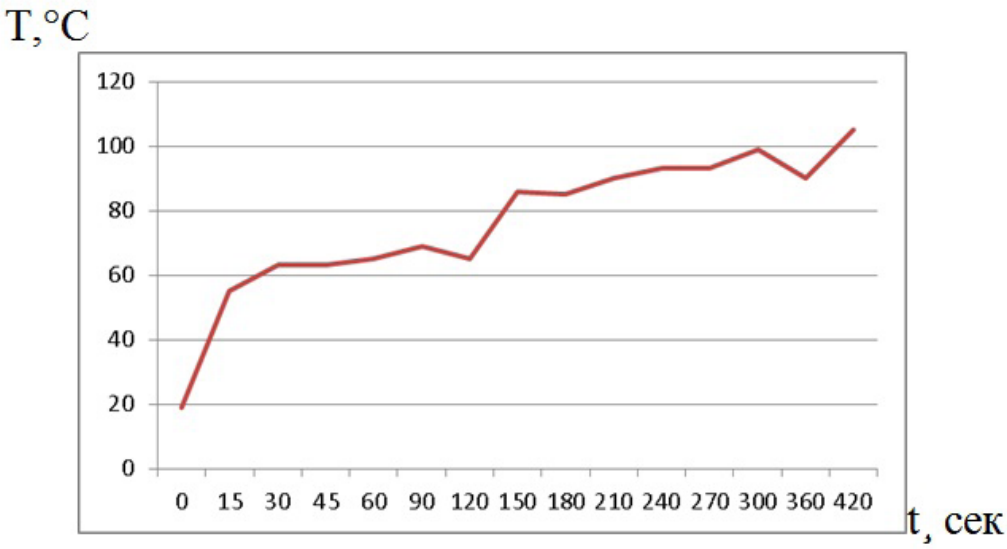


Рис. 2. График зависимости температуры от времени нагрева

По результатам измерений определили зависимость изменения температуры от времени воздействия СВЧ-энергии на исследуемый объект. Время проведения эксперимента составило 7 минут.

Таким образом, выявлено, что процесс получения сорбента путем термохимической активации, может быть реализован в СВЧ камере.

Следующий этап работы заключался в измерении диэлектрических параметров композита лузга семечек, монтмориллонит содержащая глина – вода с помощью волноводного моста на сверхвысоких частотах [3].

Измерения диэлектрических характеристик проводились волноводным методом полного заполнения сечения волновода [3].

В этом методе образец исследуемого диэлектрик заданной толщиной располагается в волноводе вплотную к коротко – замыкающей пластине и без зазоров прилегает по всем стенкам волновода. Второй конец волновода через развязывающий аттенюатор подключен к генератору.

Длина волны генератора (или размеры волновода) выбираются таким образом, чтобы в волноводе располагался основной тип колебаний.

Экспериментально полученные изменения картины стоячей волны зависят от свойств исследуемого образца диэлектрика и могут быть связаны с его электрическими характеристиками определенным соотношением, получающимся в результате решения соответствующей электродинамической задачи.

Решение электродинамической задачи приводит к комплексному трансцендентному уравнению, связывающему характеристики диэлектрического образца с измеряемыми величинами – коэффициентом бегущей волны (или коэффициентом стоячей волны) и положением узла стоячей волны относительно поверхности образца.

Дальнейший алгоритм расчета был реализован в программе Mathcad, где были рассчитаны диэлектрическая проницаемость ε' и угол диэлектрических потерь tg δ, которые использовались для математического моделирования технологических процессов в установках СВЧ диэлектрического нагрева в программной среде COMSOL Multiphysics. Исследования проводились для двух вариантов: без нагрева (20 °C) и с нагревом (100 °C).

Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Табл. 1

Результаты эксперимента

	ε’	tg δ
T = 20 °C	81,93	0,14
T = 100 °C	80,34	0,14

Изменение температуры композита привело к тому, что ε’ изменилась в диапазоне от 81,93 до 80,35, а значение тангенса угла диэлектрических потерь не изменилось, tg δ = 0,14.

С целью построения технологической установки непрерывного действия в данной работе было проведено математическое моделирование высокотемпературной обработки отходов растениеводства, процесса термолиза в СВЧ установке с камерой бегущей волны на нерегулярном коаксиальном волноводе.

Для обеспечения требуемой равномерности нагрева материала предлагается использовать СВЧ рабочую камеру бегущей волны, состоящую из прямоугольного волновода сечением 45×90 мм, коаксиально-волноводного перехода, и камеры имеющей, согласующий экран и диэлектрическую трубу.

Затем был произведен выбор материалов камеры и обрабатываемого диэлектрика, участвующих в процессе нагрева.

После разработки рабочей камеры решалась задача численного моделирования процесса высокотемпературной термообработки материала. Математическая модель, описывающая процесс СВЧ-нагрева диэлектрика, представляет собой самосогласованную задачу электродинамики и теплопроводности [4].

Математическое моделирование для СВЧ термообработки исследуемого материала осуществлялось в трехмерной постановке.

В расчетах принимались следующие параметры СВЧ-генератора: частота – 2,45 ГГц, мощность СВЧ-излучения изменялась от 1,5 кВт. При заданных параметрах камеры и СВЧ генератора нагрев обрабатываемого материала составил 593 °C (рис. 3), что свидетельствует о целесообразности применения СВЧ-энергии для производства сорбентов из отходов растениеводства.

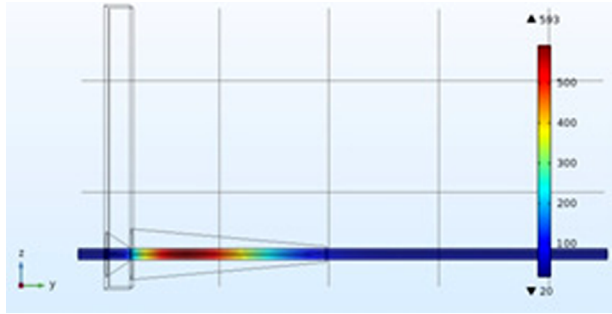


Рис. 3. Модель распределения температуры в камере бегущей волны

Последний этап работы заключался в разработке технологической схемы для производства сорбентов.

Исходя из параметров, полученных при математическом моделировании и для обеспечения автоматизированного процесса переработки отходов растениеводства в сорбент, предназначенный для очистки разливов нефтепродуктов, разработали схему установки, представленную на рис. 4.

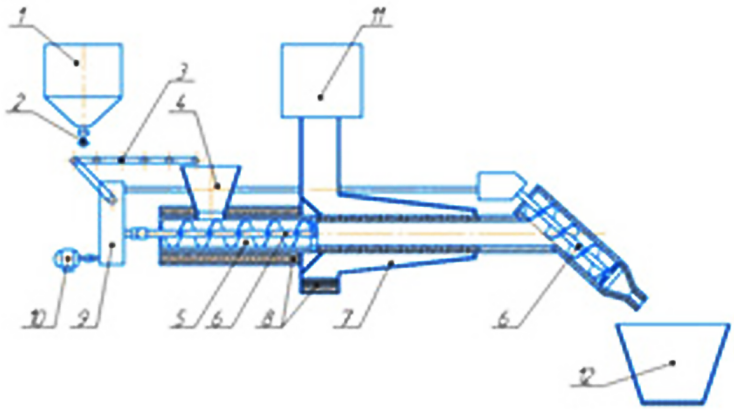


Рис. 4. Технологическая схема установки для производства сорбентов из отходов растениеводства: 1 – емкость для перемешивания и хранения сырья; 2 – клапан регулятор; 3 – транспортер; 4 – бункер для подачи сырья; 5 – камера термической обработки; 6 – шнек; 7 – волновод; 8 – балластная нагрузка; 9 – редуктор; 10 – мотор; 11 – СВЧ генератор; 12 – емкость для хранения адсорбентов

Технологический процесс получения сорбента из отходов растениеводства путем термолиза состоит из следующих стадий:

– смешение компонентов;
– дозирование;
– подача сырья;
– нагрев сырья до температуры термолиза;
– экструзия;
– выгрузка конечного продукта.

Сырье — лузга подсолнечника и монтмориллонит содержащая глина при температуре 20 °С поступает в бункер подачи, в котором происходит смешивание. Сырье из емкости для хранения отходов 1, через регулирующий клапан подачи 2, поступает на ленту транспортера 3, а затем через бункер 4 попадает в рабочую камеру для термической обработки отходов 5.

Перемещение и экструзия отходов обеспечивается шнеком 6, состоящего из двух частей, приводимого в движение электродвигателем 10 и редуктором 9, который в свою очередь, согласует движение шнеков и ленты транспортера 3.

Скорость вращения шнека обеспечивает необходимое время термообработки, которое можно регулировать. Затем готовый продукт поступает в емкость для хранения адсорбентов 12.

Нагрев в рабочей камере осуществляется с помощью электромагнитных волн, которые генерируются СВЧ генератором (магнетроном) 11, поступающих через волновод 7 в рабочую камеру до температуры 593 °С.

Таким образом, использование разработанной схемы позволит получать в непрерывном режиме адсорбционный материал, который может быть применен для очистки сточных вод от загрязнения нефтью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожевников В.Ю. Электротехнология получения сорбентов из отходов растениеводства (шелуха семечек) с помощью СВЧ энергоподвода / В.Ю. Кожевников,

С.Г. Калганова, Р.С. Родников. – Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области (ТРАНСЭНЕРГОКОМ-2018) : сб. науч. тр. по материалам всерос. науч.-практ. конф., г. Саратов, 16–17 мая 2018 г.
2. Тригорлый С.В. Моделирование и испытания СВЧ электротехнологической установки для высокотемпературной термообработки керамики (научная статья) / С.В. Тригорлый, В.Ю. Кожевников В.Ю., В.В. Захаров.- Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки – 2017 – 4 (56). – С. 98–105.
3. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А. А. Брандт. – М.: Физмат. – 1963. – 403 с.
4. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. – 1998. – 408 с.

REFERENCES

1. Kozhevnikov V.Y. Electrotechnology of obtaining sorbents from crop waste (seed husk) using a microwave power supply/ Кожевников В.Ю., S.G. Kalganova., R.S. Rodnikov. – The role of the reference university in the development of the transport and energy complex of the Saratov region (TRANSENERGO COM-2018): sb. nauch. tr. based on materials vseros. scientific.-pract. Conf., Saratov, 16–17, 2018. (in Russian)
2. Trigorly S.V. Modeling and testing of a microwave electrotechnological installations for high temperature heat treatment of ceramics (scientific article)/ S.V. Trigorly, V.Y. Kozhevnikov, V.V. Zakharov. – Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences – 2017. – 4 (56).– PP. 98–105. (in Russian)
3. Brandt A.A. Research of dielectrics at ultrahigh frequencies [Research of dielectrics at ultrahigh frequencies]. – Phys. – 1963. – P. 403. (in Russian)
4. Arkhangelsky Y.S. Microwave electrothermia. [Microwave electrothermia]. – Saratov, Saratov state technical University – 1998 – P. 408. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 27.01.2021 г.

УДК 621.365.5

ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРЕВА ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.Р. Лепешкин, А.Б. Кувалдин, С.А. Лепешкин

Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»,
г. Москва, Российская Федерация

Исследован нагрев диска в электромагнитном поле, созданном постоянными магнитами на разных частотах вращения на разгонном стенде. Проведен анализ распределений температур вращающегося диска на разных частотах вращения. Разработанный метод нагрева может использоваться для нагрева вращающихся дисков в технологических процессах термообработки и при специальных испытаниях на разгонных стендах.

Ключевые слова: нагрев, вращающийся диск, электромагнитное поле, постоянные магниты, стенд

INVESTIGATIONS OF HEATING OF ROTATING DISKS IN MAGNETIC FIELD

A.R. Lepeshkin, A.B. Kuvaldin, S.A. Lepeshkin

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Moscow, Russian Federation

The heating of a disk in an electromagnetic field created by permanent magnets at different speeds on an accelerating stand is investigated. The analysis of the temperature distributions of the rotating disk at different speeds is carried out. The developed heating method can be used for heating of rotating discs in the technological processes of heat treatment and during special tests at accelerating rigs.

Keywords: heating, rotating disc, electromagnetic field, permanent magnets, rig

E-mail: lepeshkin.ar@gmail.com

Применяются различные методы нагрева: индукционный, аэродинамический, газодинамический, радиационный для реализация тепловых процессов в телах вращения для проведения разгонных и термоциклических испытаний дисков и деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и турбин энергетических установок на разгонных специализированных стендах. Индукционный нагрев позволяет обеспечить высокие скорости нагрева и получить заданное неравномерное распределение температур по радиусу диска, соответствующего эксплуатационным условиям при испытаниях на разгонных стендах [1–3]. Обычная система индукционного нагрева состоит из нескольких плоских кольцевых индукторов, расположенных на разных радиусах диска. Ее недостатком является: невозможность получения дополнительной тепловой энергии за счет вращения, т.к. индукторы осесимметричные. Натурные эксперименты и разгонные испытания с индукционным нагревом вращающихся дисков на установках и стендах связаны с существенными материальными затратами.

В настоящее время актуальна разработка и применение энергосберегающих методов нагрева. К одному из таких новых методов нагрева относится нагрев деталей с использованием сильных постоянных магнитов с улучшенными характеристиками.

При вращении детали в поле магнита в ней наводится ЭДС и, таким образом, появляется тепловая энергия (мощность внутренних источников тепла при определенных условиях в зависимости от формы магнита). Однако, ранее нагрев вращающихся дисков с помощью постоянных магнитов, в том числе, и на разгонных стендах не рассматривался и не оценивался. Также не исследованы вопросы комбинированного нагрева вращающихся дисков с применением постоянных магнитов.

Разработка методики нагрева - получения тепловой энергии в дисках за счет вращения (выделения мощности внутренних источников тепла) в магнитном поле, созданном постоянными магнитами, является актуальной задачей. При термоциклических испытаниях максимальная частота вращения дисков может составлять 15000–80000 об/мин.

Технология изготовления современных постоянных магнитов совершенствуется и достигла определенного прогресса и в настоящее время для нагрева вращающихся малоразмерных дисков можно применить постоянные магниты из редкоземельных сплавов – неодим-железо-бор и самарий-кобальтовых сплавов, производство которых началось сравнительно недавно. Они намного сильнее обычных ферритовых магнитов и магнитов из других магнитных материалов. Это позволило использовать их в промышленности, в частности, они нашли широкое применение в электродвигателях и генераторах для получения электрической или механической энергии.

Исследования теплового состояния дисков, вращающихся в постоянном магнитном поле на начальном этапе целесообразно проводить с использованием магнитов из самарий-кобальтовых сплавов, т.к. они имеют не только значительную магнитную индукцию до 1 Тл, но и работают при повышенных температурах до 250–330 °С. Однако, следует учитывать, что они обладают хрупкостью.

ЭДС наводится при вращении диска в магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом, в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея. В результате чего возникают индуцированные токи. На небольшой частоте вращения указанная ЭДС мала. При увеличении частоты вращения увеличивается скорость изменения (пульсации) магнитного потока в диске и наведенная ЭДС становится значимой в диапазоне больших частот вращения. В результате мощность внутренних

источников тепла увеличивается и повышается интенсивность нагрева вращающегося диска.

В данной работе рассмотрен метод нагрева дисков, вращающихся в постоянном магнитном поле, с учетом выделения мощности внутренних источников тепла на различных частотах вращения [3].

Исследование теплового состояния модельного диска (из стали 12Х18Н10Т), вращающегося в поле постоянных магнитов, проводилось на разгонном стенде. Диск был препарирован термопарами на трех радиусах. Диск и узел крепления с магнитами, установленные в вакуумной разгонной камере, показаны на рис. 1.

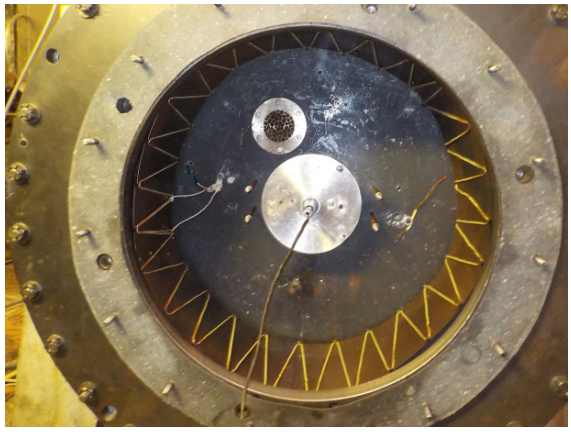


Рис. 1. Модельный диск, установленный в вакуумной камере разгонного стенда

Между диском и магнитами установлен зазор 5 мм. Измерения температур диска осуществлялись через ртутный токосъемник с помощью компьютерной системы. На рис. 2 представлены распределения температур диска на разных частотах вращения диска на разных радиусах в зависимости от частоты вращения в процессе эксперимента. Наблюдалась максимальная температура на радиусе 100 мм, который был близко расположен к средней линии установленных магнитов.

В данных экспериментах тепловое состояние модельного диска исследовалось на частотах вращения до 15000 об/мин при давлении остаточного воздуха 0,2 атм. в испытательной вакуумной камере (рис. 1) разгонного стенда. На этой частоте вращения максимальная температура составила 440 °С. Из анализа экспериментальных исследований следует, что на внешнем радиусе диска температура может составлять 640 °С. На более высоких частотах вращения следует ожидать нагрев дисков до более высокой температуры.

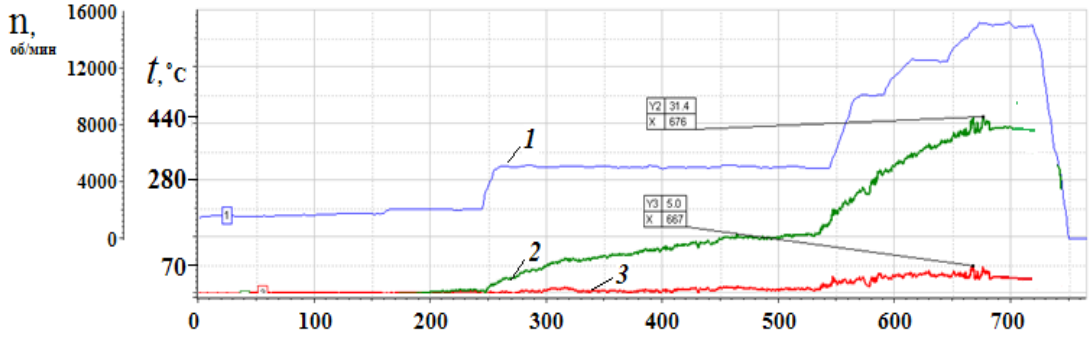


Рис. 2. Зависимости: 1 – частота вращения диска, 2 – температура на радиусе 100 мм диска, 3 – температура на радиусе 50 мм диска

Тепловизионные исследования теплового состояния модельного диска (из стали 12Х18Н10Т), вращающегося в поле постоянных магнитов, проводились на специальной установке при нормальных условиях воздушной среды. Вращающийся диск и тепловизионная система специальной установки показаны на рис. 3.

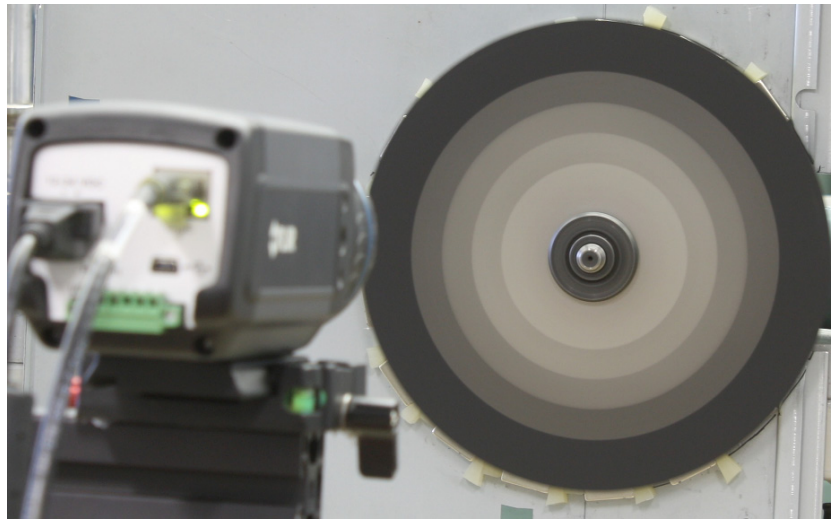


Рис. 3. Вращающийся модельный диск и тепловизионная система

Между диском и магнитами, расположенными за диском (рис. 3), установлен зазор 5 мм. Измерения температур диска осуществлялись с помощью тепловизионной системы Flir (рис. 3) со скоростью 50 кадров в секунду. В частности, анализ исследований распределений температур модельного тонкого диска проводился с использованием 14 небольших сильных постоянных магнитов, расположенных в ободной части диска на мини-установке в воздушной среде при нормальных условиях на разных частотах вращения от 3000 об/мин до 12000 об/мин. Такие исследования проведены впервые с использованием тепловизора. На рис. 4 представлена термограмма распределения температуры и на рис. 5 – расчетное распределение температуры во вращающемся модельном диске на частоте 12000 об/мин в электромагнитном поле, созданном с использованием постоянных магнитов. Расчет связанной задачи электромагнитного поля и нестационарного теплового состояния вращающегося диска осуществлялся с использованием метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Анализ распределений температур показал, что экспериментальные и расчетные данные имеют хорошее совпадение и максимальная температура в ободной части составляет 90–100 °C.

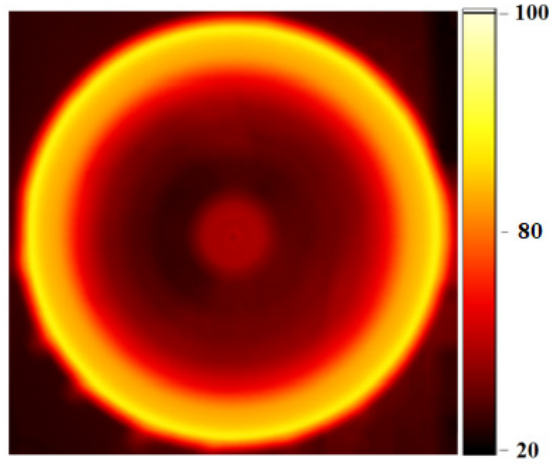


Рис. 4. Термограмма распределения температуры вращающегося диска на частоте 12000 об/мин

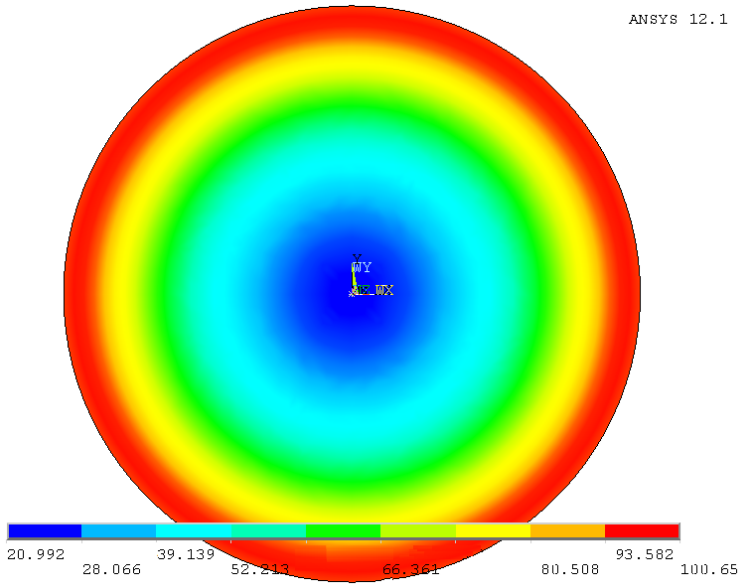


Рис. 5. Расчетное распределение температуры вращающегося диска на частоте 12000 об/мин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты температурных исследований и разработанный энергосберегающий метод нагрева вращающегося диска с использованием сильных постоянных магнитов. Анализ распределений температур диска, вращающегося в электромагнитном поле, на разных частотах вращения показал, что можно обеспечивать нагрев диска до 400–600 °С с использованием разработанного метода. Предложен бесконтактный метод измерений температуры вращающихся дисков с использованием тепловизионной системы. Проведенные тепловизионные исследования показали, что возможно применение нескоростного тепловизора для регистрации распределений температуры вращающихся дисков. Анализ распределений температур вращающегося диска показал, что экспериментальные и расчетные данные имеют хорошее совпадение. Разработанные методы можно использовать для нагрева малоразмерных вращающихся дисков и изделий при исследованиях и испытаниях на специальных установках и на разгонных стендах в отраслях машиностроения и в технологических процессах термообработки деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кувалдин А.Б. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях / А.Б. Кувалдин, А.Р. Лепешкин. Монография. — М.: Изд-во Инфра-М. серия: Научная мысль. – 2019. — С. 282.
2. Кувалдин А.Б. Метод испытаний дисков турбомашин и бандажей роторов турбогенераторов с использованием индукционного нагрева / А.Б. Кувалдин, А.Р. Лепешкин, С.А. Лепешкин — Электричество. – 2009. – № 7. — С. 33–38.
3. Кувалдин А.Б. Способ получения энергии и устройство для его реализации / А.Б. Кувалдин, А.Р. Лепешкин, С.А. Лепешкин — Пат. 2416869 Российская Федерация, МПК H02N 11/00.; Заявитель и патентообладатель НИУ “МЭИ“. № 2010117026/07; заявл. 30.04.2010; опубл. 20.04.2011, бюл. № 11.

REFERENCES

1. Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R. Skorostnye rezhimy indukcionnogo nagreva i termonapryazheniya v izdeliyah [High-speed modes of induction heating and thermal stress in products]. Monografiya. M.: Izd-vo Infra-M. seriya: Nauchnaya mysl'. – 2019. – PP. 282. (in Russian)
2. Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R., Lepeshkin C.A. Metod ispytanij diskov turbomashin i bandazhej rotorov turbogenerato-rov s ispol'zovaniem indukcionnogo nagreva [Test method for turbomachine disks and turbo generator rotor rims using induction heating]. Elektrichestvo [Electricity]. – 2009. – N° 7. – PP. 33–38. (in Russian)
3. Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R., Lepeshkin C.A. Sposob polucheniya energii i ustrojstvo dlya ego realizacii [Method of obtaining energy and device for its implementation]. Pat. 2416869 Rossijskaya Federaciya, MPK H02N 11/00.; Zayavitel' i patentoobladatel' NIU “MEI“. N° 2010117026/07; zayavl. 30.04.2010; opubl. 20.04.2011, byul. N° 11. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 25.01.2021 г.

УДК 621.365.53

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ИНДУКЦИОННАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ ГРАФИТАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

[1]В.М. Луганцев, [1]Ю.С. Свистунов, [2]В.Б. Демидович, [3]Ю.Ю. Перевалов

[1]UMATEX, Госкорпорация «РОСАТОМ»,
г. Москва, Российская Федерация
[2]Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
[3]ООО «Русские технологии индукционного нагрева»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Разработана высокотемпературная индукционная печь для окончательной термообработки углеродного волокна. Разработана трехмерная электротепловая модель печи, которая основана на комбинации метода конечных элементов (МКЭ) и метода интегральных уравнений (МИУ) при решении задачи расчета квазитрехмерного электромагнитного и трехмерного температурных полей.

Ключевые слова: индукционный нагрев, углеродные волокна, термообработка, моделирование

HIGH TEMPERATURE INDUCTION FURNACE FOR CARBON FIBER GRAPHITATION

[1]V.M. Lugantsev, [1]Y.S. Svistunov, [2]O.V. Demidovich, [3]Y.Y. Perevalov

[1]UMATEX, ROSATOM State Corporation,
Moscow, Russian Federation
[2]St.Petersburg Electrotechnical University «LETI»,
[3]Russian Technologies of Induction Heating (RTIH) Ltd.,
Saint Petersburg, Russian Federation

A high-temperature induction furnace for the final heat treatment of carbon fiber has been developed. A three-dimensional electro-thermal model of the furnace has been developed, which is based on a combination of the finite element method (FEM) and the method of integral equations (MIE) when solving the problem of calculating the quasi-three-dimensional electromagnetic and three-dimensional temperature fields.

Keywords: induction heating, carbon fibers, heat treatment, modeling

E-mail: yyperevalov@yandex.ru

Применение углеродных волокон благодаря их уникальным свойствам находит широкое применение, что связано, прежде всего, с использованием их в качестве армирующих составляющих в современных композиционных материалах. Это требует создания новых, высокопроизводительных промышленных технологий, позволяющих гибко управлять свойствами и качеством получаемого материала.

Свойства углеродных волокон определяются содержанием углерода, кристалличностью и степенью ориентации кристаллических плоскостей графита. Выравнивание ориентации кристаллов в волокне придает ему большую прочность на растяжение; такие волокна характеризуются высоким модулем упругости, низким удельным весом, низким коэффициентом температурного расширения, химической инертностью практически ко всем агрессивным средам.

Производство углеродных волокон состоит из нескольких этапов температурной обработки органических волокон. Заключительный и самый ответственный этап в производстве высококачественной продукции – это этап графитации, при котором волокно необходимо нагревать с температурой вплоть до 2500 °С – 3000 °С [1, 2, 3].

Современное промышленное технологическое оборудование для графитации строится по принципу высокотемпературных проходных печей, в которых достигается требуемый уровень температур, а также может быть обеспечено заданное температурное распределение по длине печи. Использование известных преимуществ индукционного нагрева позволяет построить печь, наиболее полно удовлетворяющую требованиям технологии проходного нагрева углеродных волокон в защитной атмосфере при высоких температурах.

Рост мощности, повышение требований к качеству нагрева и энергетическим показателям делают актуальной задачу оптимизации основных конструктивных параметров индукционных нагревателей и режимов их работы. Экспериментальное решение этой задачи крайне затруднительно. Оно связано с затратами значительных материальных ресурсов и времени.

Опыт использования методов математического моделирования для исследования и проектирования систем индукционного нагрева [4, 5] показал их высокую эффективность при изучении процессов, протекающих в устройствах индукционного нагрева, позволяя выявлять новые закономерности и получать рекомендации по проектированию нагревателей и их режимов работы.

Принципиальная конструкция высокотемпературной индукционной печи косвенного нагрева

Принципиальная конструкция высокотемпературной индукционной печи косвенного нагрева непрерывного действия для термообработки углеродных волокон показана (рис. 1). Она состоит из: индукторов овальной формы из профилированной медной трубки (при необходимости регулировать распределение температуры по длине печи каждый индуктор подключается к отдельному источнику питания); теплоизоляции, снижающей тепловые потери; нагреваемого электрически проводящего тигля, магнитопроводов (на рисунке не изображены). Из-за хорошей электрической проводимости и высокого коэффициента черноты углерод идеально подходит в качестве материала тигля, разогреваемого в защитной атмосфере до 3000 °С. Нагрев пучка углеродных волокон, проходящих с натягом через внутреннее окно тигля, осуществляется как за счет конвекции горячих потоков защитного газа, так и излучением от внутренней поверхности тигля. Теплоизоляция выполняется минимум из двух слоев. Каждый слой изготавливается из материалов с разными свойствами [6]. Для того,

чтобы защитить корпус от нагрева магнитным полем индукторов, используются магнитопроводы, размещенные на внешней поверхности индукторов. Магнитопроводы также ослабляют магнитную связь между индукторами в многоиндукторной системе с независимыми источниками питания, что повышает надежность работы преобразователей частоты.

На основе исследований электромагнитных и температурных полей с помощью цифровых моделей, оптимизации конструкции, был разработан промышленный образец трехиндукторной печи проходного типа для высокотемпературной обработки длинномерных углеволокнистых материалов в непрерывном режиме в защитной атмосфере.

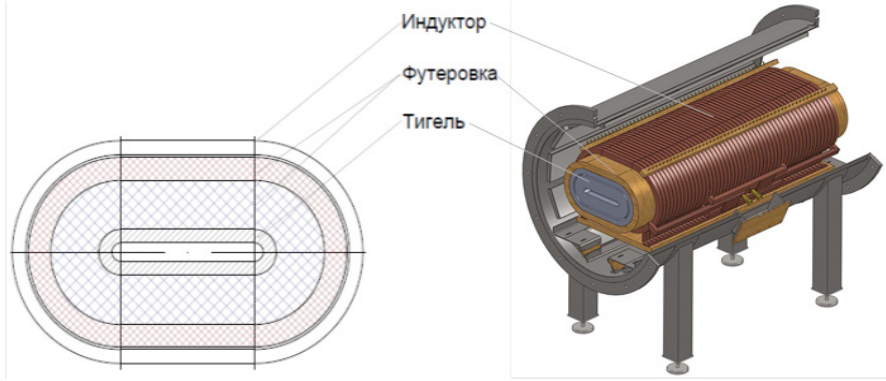


Рис. 1. Принципиальный вид высокотемпературной индукционной печи косвенного нагрева и поперечное сечение индуктора

Комплексные модели высокотемпературной индукционной печи косвенного нагрева

Высокотемпературные индукционные печи косвенного нагрева являются сложными техническими объектами, в которых протекают физические процессы различной природы. В общем случае математическое описание таких объектов представляет собой систему детерминированных нелинейных дифференциальных и интегральных уравнений, записанных для многомерных и многосвязных областей. Если не вводить существенных упрощений в постановку задачи, то решение указанной системы уравнений, а значит и количественное описание изучаемых объектов может быть получено только с использованием численных методов через моделирование на ЭВМ [5]. Применение ЭВМ при моделировании индукционных электротермических установок позволило создавать комплексные модели, учитывающие неразрывную связь электромагнитных и тепловых процессов в нелинейных и многомерных областях загрузки индукционных электротермических устройств.

Ведущее место при создании электротепловых моделей индукционных нагревателей занимает разработка метода электрического расчета. Это объясняется тем, что при индукционном нагреве первичным и основным фактором, влияющим на формирование температурного поля нагреваемого объекта, является распределение внутренних источников теплоты (индуцированных токов) по объему нагреваемого тела. Электрический расчет должен дать количественную картину распределения электромагнитного поля в объеме нагреваемого тела и, тем самым, создать необходимые предпосылки для решения тепловой задачи. С другой стороны, электрический расчет должен включать в себя определение интегральных параметров индукционной установки, характеризующих ее как потребителя энергии. Указанные

задачи являются наиболее общими при моделировании любой индукционной нагревательной системы, и без их решения невозможен сколь либо точный анализ процесса нагрева. Конкретизация требований, которым должна удовлетворять математическая модель, связана с анализом особенностей исследуемой индукционной системы.

В данном случае в электрической части модели особенности связаны с наличием магнитопроводов, металлического корпуса и раздельного питания индукторов от независимых источников питания. Тепловая часть модели усложнена косвенным способом передачи энергии в углеродные волокна конвекцией и излучением от графитового нагревателя. Модель должна учитывать распределение температуры и тепловые потери через двухслойную тепловую защиту [6].

Разработанная трехмерная электротепловая модель печи основана на комбинации метода конечных элементов (МКЭ) и метода интегральных уравнений (МИУ) при решении задачи расчета квазитрехмерного электромагнитного и трехмерного температурных полей [7, 8, 9]. Трехмерное распределение электромагнитного поля получается наложением двух двумерных (в продольных и поперечных сечениях). Тем самым учитываются продольный и поперечный краевые эффекты.

Задача разбивается на внешнюю, решаемую МИУ, и внутреннюю трехмерную (область загрузки), решаемую МКЭ и методом конечных разностей (МКР), которые связаны с помощью импедансных граничных условий. Использование МИУ для решения внешней задачи позволяет легко включить в модель источники питания [10]. В свою очередь, внутренняя задача по принципу локально-одномерной схемы [11] разбивается на две: двумерную электротепловую в поперечном сечении (МКЭ) и одномерную тепловую в продольном сечении (МКР).

В результате внешнего электрического расчета при заданном напряжении питания, токе или мощности цепи определяются полная активная мощность, полная реактивная мощность, активная мощность, выделяющаяся в тигле и корпусе, мощность потерь в индукторах, токи в индукторах, электрический КПД нагревателя, распределение напря-женности магнитного поля на поверхности загрузки. Внутренний электротепловой расчет заключается в нахождении распределения температуры по длине и в поперечном сечении тигля при определенных граничных условиях на поверхности загрузки, которые задаются или из условия свободного теплообмена с окружающей средой, или с учетом футеровки. Одновременно рассчитываются общие тепловые потери и распределение температуры внутренней поверхности футеровки по длине нагревателя.

Результаты расчетного проектирования индукционной печи с использованием комплексной модели

На рис. 2 представлен эскиз разрабатываемой индукционной печи, которая имеет следующие геометрические параметры: длина индукционной печи – 4500 мм, высота индуктора – 430 мм, ширина индуктора 1010 мм, высота рабочей зоны графитового тигля – 54 мм, ширина рабочей зоны графитового тигля – 680 мм, толщина графитового тигля – 23 мм. Характеристики углеродного волокна: количество элементарных волокон (филаментов) в жгуте: 3–24 тыс. шт.; количество одновременно обрабатываемых жгутов: 150–65 шт.; длительность работы линии в непрерывном режиме: 7200 часов в год; производительность линии: 29–50 т/год.

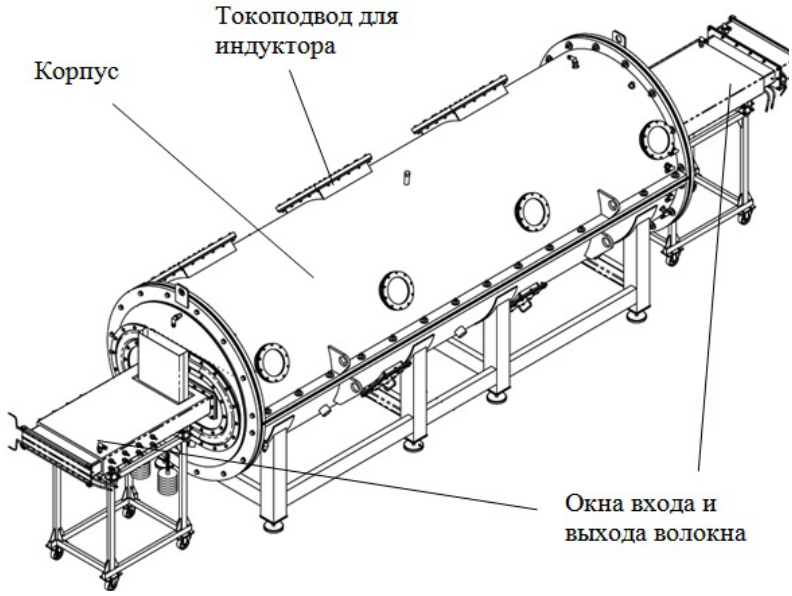


Рис. 2. Эскиз индукционной печи

На выбор частоты тока источника питания печи оказывает влияние несколько факторов. Главным элементом печи является графитовый нагреватель (тигель), расположенный внутри корпуса соосно с ним, и имеющий овальную форму поперечного сечения с горизонтально ориентированной длинной осью. Из соображений механической прочности толщина стенки графитового тигля должна быть не менее 20 мм. Частота тока при этом должна обеспечить достаточно высокий электрический КПД индукционной системы (с минимальными дополнительными электрическими потерями в магнитопроводах и корпусе) и относительно однородное распределение температуры по ширине окна тигля для создания одинаковых условий нагрева пучка углеродных волокон. Моделирование показало, что оптимальная частота тока будет находиться в диапазоне 370–500 Гц.

Мощность индукционной печи и соответственно мощность источников питания определяется из моделирования технологического процесса. Технологический процесс работы печи состоит из двух стадий. Первая стадия – разогрев печи до рабочей температуры. На этой стадии обычно накладываются ограничения на скорость повышения температуры печи, чтобы избежать разрушительных термонапряжений, возникающих в тигле. Это накладывает ограничения на мощность. Тем не менее, она может быть больше или меньше мощности второй стадии в зависимости от режима разогрева. Мощность второй стадии служит для компенсации тепловых потерь и повышения теплосодержания углеродных волокон на выходе из печи.

Тепловые потери в основном происходят через расположенную на поверхности нагревателя двухслойную термоизоляцию, состоящую из первого слоя высокотемпературного углерод-углеродного материала, находящегося непосредственно на поверхности нагревателя, и второго слоя из высокотемпературного керамического материала [6]. Первый слой углеродной теплоизоляции обеспечивает снижение температуры до уровня, при котором могут работать обычные виды изоляции, а второй слой выполняет две функции: теплоизоляционную и электроизоляционную.

По длине печи расположены три водоохлаждаемых индуктора, каждый из трёх параллельно включенных секций, которые имеют форму, подобную форме поперечного

сечения тигля, и расположены непосредственно на поверхности верхнего второго слоя изоляции тигля. Каждый из индукторов снабжен отдельной группой магнитопроводов в виде пакетов пластин из магнитного материала, расположенных по периметру индуктора, имеющих U-образную форму и расположенных непосредственно поверх витков индукторов выступами к центру нагревателя (рис. 3). Все три индуктора снабжены собственным источником питания, обеспечивающим автономное управление каждым индуктором по самостоятельной программе, позволяющей получить желаемый позонный температурный профиль вдоль графитового нагревателя. Моделирование электромагнитного поля в системе позволяет не только согласовывать индукторы с источниками питания, но и определить число пакетов магнитопроводов и их размеры, которые позволяют радикально уменьшить потери в корпусе печи и свести до минимума взаимную магнитную связь индукторов.

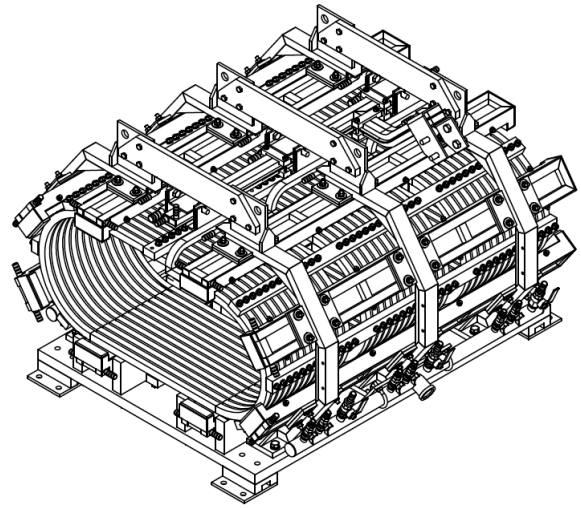


Рис. 3. Индуктор с оптимизированными параметрами

Индуктора, работающие в данной установке являются сложными устройствами, работающими при больших мощностях и токах. Целесообразно провести анализ механических напряжений возникающих в индукционной системе. Для оценки механических напряжений рассмотрена четверть одного витка индуктора с соответствующими сегментом магнитопровода шириной 100 мм – один расположен на верхней поверхности и связан с витком индуктора контактом, второй расположен сбоку и его узлы по линии контакта сшиты с соответствующими узлами индуктора.

Максимум эквивалентных напряжений по Мизесу не превышает 3,94 МПа при пределы текучести для отожженной меди М1 в 50 МПа (при 700 °С предел текучести составляет 10 МПа, так что при возникновении внештатной ситуации типа перегрева при отключении подачи охлаждения есть все шансы, что индуктор выдержит все возможные деформации. На рис. 4 и 5 показаны механические перемещения и напряжения, возникающие при работе индукторов.

Каждая деталь и конструкция имеет бесконечное количество частот собственных колебаний, образующих спектр. Каждой частоте собственных колебаний соответствует своя форма колебаний. Форма колебаний определяется картиной знакопеременных смещений или прогибов и положением узловых линий. В узловых линиях перемещения бесконечно малы и считаются нулевыми. По разные стороны узловых линий смещения колеблющихся участков находятся в противофазе. Совокупность форм колебаний детали образуют спектр форм. Способ крепления детали изменяет спектр частот и

форм колебаний. Знание частот собственных колебаний позволяет избежать условий работы конструкции на длительных эксплуатационных режимах при частотах, близких к резонансным. Изменение спектра частот конструкции может служить в качестве признака появления и развития дефекта.

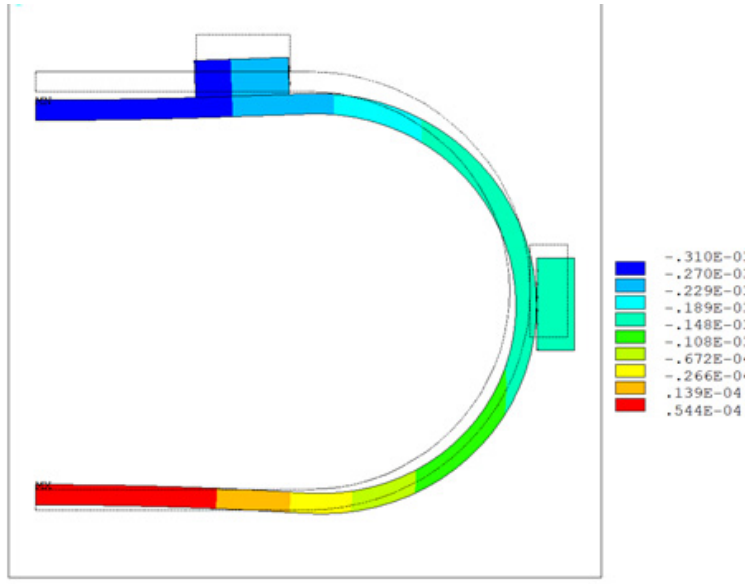


Рис. 4. Вертикальные перемещения, масштаб деформации 100:1.
Трубка индуктора 22×22×3

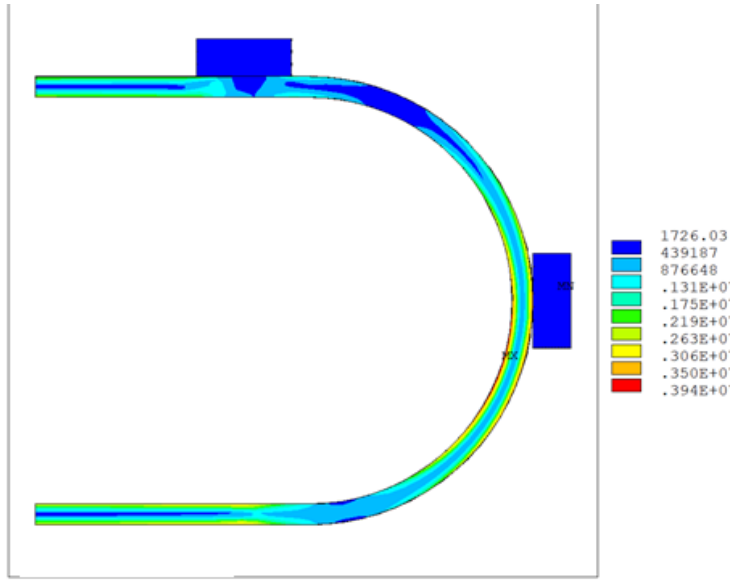


Рис. 5. Эквивалентные напряжения. Трубка индуктора 22×22×3

Для определения собственной АЧХ каркаса с магнитопроводами была разработана специальная модель. В моделях была задана жесткая связь всех элементов, заданы граничные условия (жесткое крепление каркаса на «основании», сила тяжести).

В процессе исследования частота изменялась с 5 Гц до 2000 Гц. При анализе на каждой частоте была определена максимальная амплитуда колебаний по каждой оси (X, Y, Z), а так же определялось отношение массы каркаса, которая совершает колебания на каждой частоте, к общей массе каркаса.

Были выделены две основные опасные частоты колебаний – 18,3 Гц и 42,5 Гц. На частоте 18,3 Гц возникают колебания 58 % массы каркаса, а на 42,5 Гц у порядка 40 %. На частоте 1000 Гц практически нет колебаний (перемещений) по каждой оси.

На рис. 6 показаны результаты моделирования – распределение температуры по длине тигля при изменении мощности каждого из индукторов.

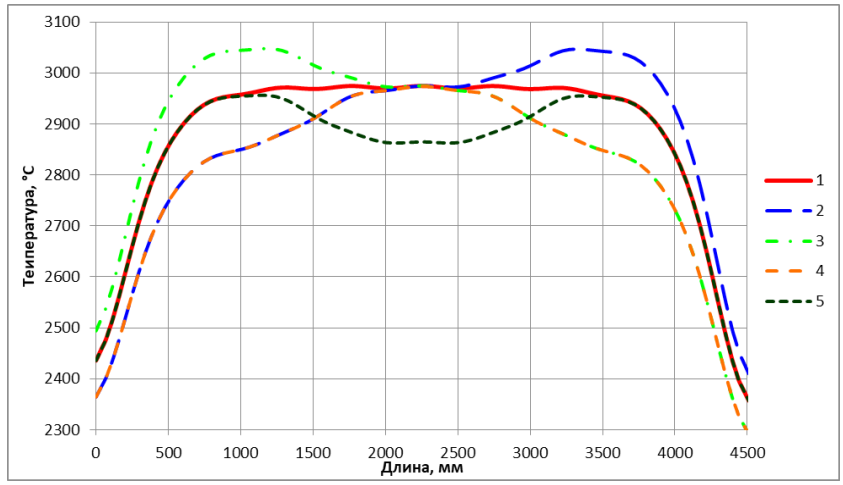


Рис. 6. Сравнение температурных профилей полученных режимов:
1 – 1-й генератор 67 кВт; 2-й генератор 63 кВт; 3-й генератор 73 кВт;
2 – 1-й генератор 57 кВт; 2-й генератор 63 кВт; 3-й генератор 83 кВт;
3 – 1-й генератор 75 кВт; 2-й генератор 63 кВт; 3-й генератор 63 кВт;
4 – 1-й генератор 57 кВт; 2-й генератор 63 кВт; 3-й генератор 63 кВт;
5 – 1-й генератор 67 кВт; 2-й генератор 54 кВт; 3-й генератор 73 кВт

На рис. 7 представлена фотография разработанной и запущенной печи для нагрева углеродных волокон. На рис. 6 показано, что данная конструкция индукционного нагревателя позволяет регулировать распределение температуры по длине тигля в широких пределах.

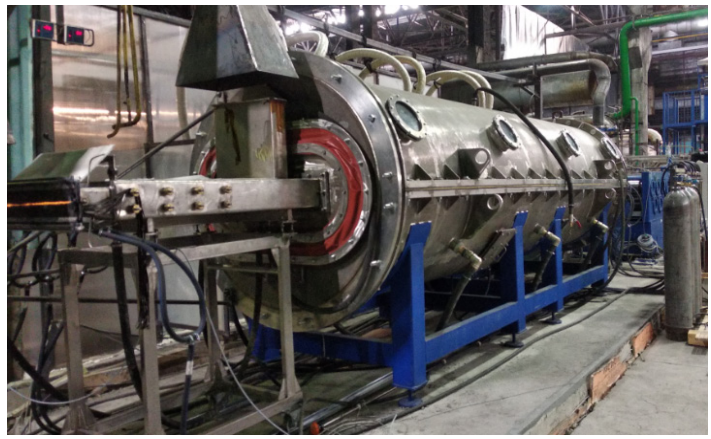


Рис. 7. Общий вид запущенной установки косвенного нагрева углеродных волокон

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка сложных объектов индукционного нагрева невозможно без детального моделирования. Цифровая модель позволяет оптимизировать конструкцию индукционной печи косвенного нагрева углеродных волокон и осуществлять пуско-наладочные работы в кратчайшие сроки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А., Вотинов А.М., Постных А.М., Чекалкин А.А. Технология и проектирование углерод-углеродных композитов и конструкций. Издательство: Наука, Физматлит. – 1996. – 236 с.
2. Мелешко А.И., Половников С.П. Углерод, углеродные волокна, углерод. Издательство: САЙНС-ПРЕСС. – 2007. – 192 с.
3. Graphitization at up to 3000 °C with Carbolite Gero Chamber Furnaces [Электронный ресурс] // AZOM: онлайн журнал. – Режим доступа: https://www.azom.com.
4. Demidovich V.B. Computer simulation and optimal designing of energy-saving technologies of the induction heating of metals, Thermal Engineering. – 2012. – Vol. 59. – N° 14 – PP. 1023–1034.
5. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Компьютерное моделирование устройств индукционного нагрева – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – 160 с.
6. Демидович В.Б., Перевалов Ю.Ю., Жамбалова С.Ц. Особенности выбора и оптимизации футеровки высокотемпературных нагревательных индукционных печей для графитизации углеродного волокна / Новые огнеупоры. – N°5. – 2019.
7. Zhambalova S., Demidovich V., Perevalov Yu., Lugantsev V. Simulation of a high-temperature induction furnace for heating carbon fibers/ HES-19 INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEATING BY ELECTROMAGNETIC SOURCES, 22–24 May. – 2019. – PP. 53–57.
8. Demidovich V.B., Andrushkevich V.V., Mikhlyuk A.I., Rastvorova I.I. Advanced electrothermal 3D-model of the continuous induction heaters – Proceedings – 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016. – P. 96–99.
9. Demidovich V.B., Rastvorova I.I. 3D-Simulation of electromagnetic and temperature fields in the continuous induction heaters COUPLED PROBLEMS 2015 – Proceedings of the 6th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering.
10. Demidovich V.B., Rastvorova I.I. A combined method of simulation of an electric circuit and field problems in the theory of induction heating Russian Electrical Engineering August 2014. – Volume 85. – Issue 8. – PP 536–540.
11. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. М.: Научный мир. – 2003. – 315 с.

REFERENCES

1. Sokolkin Yu.V., Tashkinov A.A., Votinov A.M., Postnykh A.M., Chekalkin A.A. Technology and design of carbon-carbon composites and structures. Publisher: Nauka, Fizmatlit. – 1996. – 236 p. (in Russian).
2. Meleshko A.I., Polovnikov S.P. Carbon, carbon fiber, carbon. Publisher: SAYNS-PRESS. – 2007 – 192 p. (in Russian).
3. Graphitization at up to 3000 °C with Carbolite Gero Chamber Furnaces [Электронный ресурс] // AZOM: онлайн журнал . – Режим доступа: https://www.azom.com.
4. Demidovich V.B. Computer simulation and optimal designing of energysaving technologies

of the induction heating of metals, Thermal Engineering. 2012, vol. 59, N° 14, pp. 1023–1034.
5. Demidovich V.B., Chmilenko F.V. Computer modeling of induction heating devices – SPb.: SPbGETU "LETI". – 2013. – P. 160. (in Russian).
6. Demidovich V.B., Perevalov Yu.Yu., Zhambalova S.Ts. Features of selection and optimization of lining of high-temperature heating induction furnaces for graphitization of carbon fiber / New refractories, No. 5, 2019S. Zhambalova, V. Demidovich, Yu. Perevalov, V. Lugantsev Simulation of a high-temperature induction furnace for heating carbon fibers/ HES-19 INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEATING BY ELECTROMAGNETIC SOURCES, 22–24 May. – 2019. – PP. 53–57.
7. Demidovich, V.B., Andrushkevich, V.V., Mikhlyuk, A.I., Rastvorova, I.I. Advanced electrothermal 3D-model of the continuous induction heaters – Proceedings – 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016. – P. 96–99.
8. Demidovich V.B., Rastvorova I.I. 3D-Simulation of electromagnetic and temperature fields in the continuous induction heaters COUPLED PROBLEMS 2015 – Proceedings of the 6th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering.
9. Demidovich V.B., Rastvorova I.I. A combined method of simulation of an electric circuit and field problems in the theory of induction heating Russian Electrical Engineering August 2014. – Volume 85. – Issue 8. – PP 536–540.
10. Samarsky A.A., Gulin A.V. Numerical methods of mathematical physics. M.: Scientific world. – 2003. – 315 p. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 21.01.2021 г.

УДК 537.39:669.15.002

СОВМЕСТНОЕ ДЕЙСТВИЕ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ И ИМПУЛЬСОВ ТОКА НА ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

В.И. Сташенко, О.А. Троицкий

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
Москва, Российская Федерация

Экспериментально установлено дополнительное увеличение пластической деформации в образцах нержавеющей стали в процессах активной деформации и релаксации механических напряжений при совместном действии СВЧ-излучения и импульсов тока.

Ключевые слова: деформация, разупрочнение, нержавеющая сталь, импульсы тока, СВЧ-излучение

THE COMBINED EFFECT OF MICROWAVE RADIATION AND CURRENT PULSES ON THE PLASTIC DEFORMATION OF STAINLESS STEEL

V.I. Stashenko, O.A. Troitsky

A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russian Federation

An additional increase in plastic deformation in stainless steel samples in the processes of active deformation and relaxation of mechanical stresses under the combined action of microwave radiation and current pulses is experimentally established.

Keywords: deformation, softening, stainless steel, current pulses, microwave radiation

E-mail: vis20-11@rambler.ru

Импульсы тока высокой плотности порядка $\sim 10^3$ А/мм^2 и длительности $\sim 10^{-4}$ с при прохождении по металлу приводят к снижению деформирующего напряжения в нем на десятки процентов [1, 2]. Этот эффект получил название электропластического эффекта (ЭПЭ).

Облегчение пластической деформации металлов действием тока высокой плотности, улучшение механических свойств металлов с успехом используются в различных технологиях обработки металлов и сплавов давлением. Как показывают результаты экспериментов электропластический эффект (ЭПЭ) носит комбинированный характер и в зависимости от условий возможно доминирование того или иного механизма:

• давление и увлечение «электронным ветром» зон пластической деформации, одиночных и скоплений дислокаций [3];

• появление сил увлечения точечных дефектов и дислокаций потоками тепла, формирующихся в процессе электропластической деформации металла (ЭПДМ) [4, 5];

• возникновение термических напряжений из-за неравномерного распределения джоулева нагрева [6];

• силовое электродинамического действие магнитного поля импульса тока, включая его «ударное» вибрационное действие на проводник [7–9].

Теоретически предсказано, что возникновение дополнительной электропластической деформации металла возможно при спиновом разупрочнении [10, 11]. Реализация спинового разупрочнением металла может произойти за счет влияния на механические свойства металла электронного парамагнитного резонанса. Для этого требуется выполнение следующих условий: собственное магнитное поле импульсного тока при прохождении его по металлическому образцу и электромагнитное поле СВЧ-излучения, охватывающего образец, должны быть скрещены; должно быть обеспечено наличие в образцах термодинамически неравновесных процессов, в частности, генерации свежих дислокаций, что обеспечивается активной деформацией образцов при их растяжения с постоянной скоростью или в прерывистом режиме с чередованием растяжения с паузами релаксации напряжений без снятия нагрузки.

Целью являлось изучение дополнительного влияния СВЧ-излучения при действии импульсов на электропластическую деформацию металла.

Методика и результаты экспериментов

Для изучения влияния СВЧ-излучения на механические свойства металлов была выбрана нержавеющая сталь 12Х18Н10Т как благоприятный объект для исследований ЭПЭ. В своей основе сталь имеет железо и никель, а также парамагнитные примеси, обладающие собственным магнитным моментом и под воздействием внешних полей (под влиянием магнитного поля тока) ориентирующиеся по полю, создавая результирующее поле, превышающее внешние. Сталь 12Х18Н10Т содержит титан, который является парамагнитным металлом, причем его парамагнитные свойства возрастают с ростом температуры, что частично реализуется при ЭПДМ.

В качестве источника электромагнитного поля СВЧ-излучения была выбрана частота 2,45 ГГц, применяемая в микроволновых СВЧ печах [12, 13]. Передача электромагнитного (ЭМ) излучения от источника СВЧ-излучения – магнетрона к деформируемому образцу осуществлялась с помощью волновода прямоугольного сечения. В опытах применялось дистанционное управление магнетроном. Ориентацию вектора напряженности E электрического поля СВЧ-излучения меняли поворотом короба волновода относительно деформируемого образца на 90^0. Температуру образцов измеряли термопарой во время действия СВЧ-излучения и одиночных импульсов тока. Она не превышала 60–80 °С.

На рис. 1, 2 представлено расположение образцов из стали 12Х18Н10Т толщиной 0,2 мм, шириной 3 мм, длиной рабочей части 28 мм в горизонтальной испытательной машине ИР 5047-50-10.

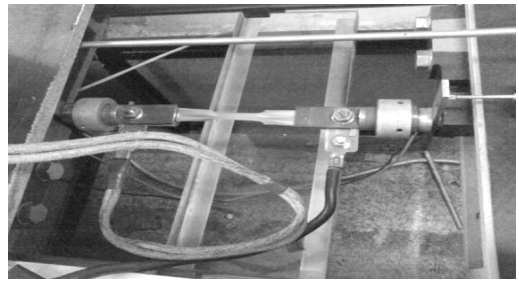


Рис. 1. Образец под действием импульсов тока на последней стадии растяжения

Рис. 2. Образец находится в волноводе, магнетрон в низу. Захваты образца электрически изолированы для подвода тока. ЭМ поле *E* направлено поперек оси образец

Установлено влияние СВЧ-излучения на процесс пластической деформации нержавеющей стали в условиях активной деформации образцов растяжением и в опытах по релаксации механических напряжений. Испытуемый образец деформировался в поле СВЧ-излучения, как при действии импульсов тока, так и без тока. Ориентацию вектора напряженности электрического поля *E* СВЧ-излучения относительно оси деформируемых образцов меняли на продольную или поперечную.

При активной деформации металла и действии СВЧ-излучения происходило снижение напряжения. Небольшое тепловое действие тока и СВЧ не вызывало скачков напряжений. На рис. 3 приведены данные измерений скачков снижения напряжений, полученные на пяти образцах при действии импульсов тока высокой плотности порядка 1000 А/мм^2 и длительностью 250 мкс. Верхние данные (в границах пунктирных линий) относятся к тем же образцам при одновременном действии импульсов тока и СВЧ-излучения. Ориентация электрического поля *E* СВЧ-излучения продольная.

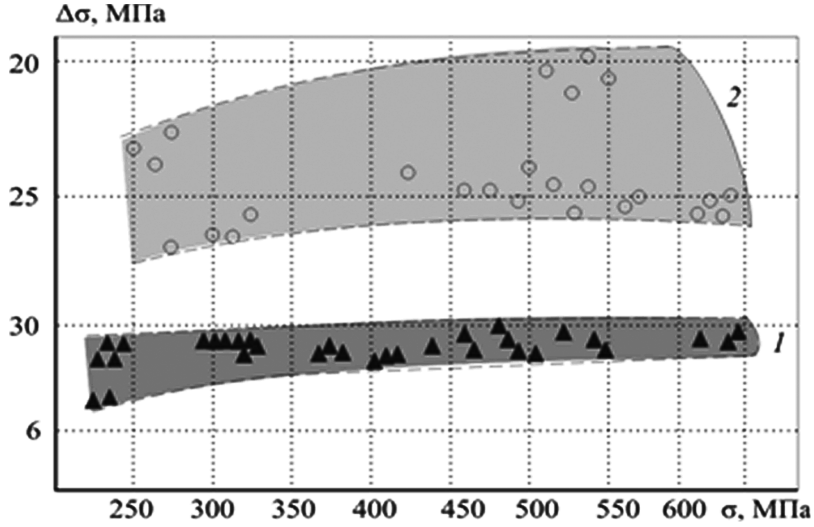


Рис. 3. Зависимость величины скачков напряжений Δσ от приложенного напряжения σ при действии импульсов тока (область 1 в границах пунктирных линий), а также тока и СВЧ–излучения (область 2 в границах пунктирных линий)

В табл. 1 представлены результаты падения нагрузок на образце в процессе релаксации напряжений при комбинированном энергетическом воздействии.

Табл. 1

Величина падения нагрузок Δσ при остановках привода машины за полную паузу релаксации напряжений σ в течение 3 мин в различных постановках опыта

N°	Виды действий	1-я серия, диапазон измерений Δσ		2-я серия, диапазон измерений Δσ		3-я серия, диапазон измерений Δσ		4-серия, диапазон измерений Δσ	
		σ, MPa	%	σ, MPa	%	σ, MPa	%	σ, MPa	%
1	Без какого-либо действия	20–300	6,4	30–375	7,7	35–420	8,1	45–520	8,8
2	СВЧ-излучение, поле E продольно	40–350	10,5	45–350	11,6	55–480	11,3	70–540	12,3
3	Импульсы тока	40–375	10,6	50–420	10,9	70–500	14,1	90–560	17,5
4	Действие тока и СВЧ-излучения	70–395	18,0	105–440	23,8	150–520	29,8	175–580	30,0

При продольной ориентации вектора *E* величина скачков разупрочнения ЭПЭ возрастает в поле СВЧ-излучения, примерно на 8 % (с 22 % до 30 %). Тепловые эффекты действия тока, а так же СВЧ-излучения корректно вычитались из величин общего снижения деформирующих усилий и релаксации напряжений. Величина пинч-эффекта действия импульсного тока на плоских тонких образцах была слабо выражена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют утверждать о наличии дополнительного механизма электропластической деформации [1], возможно, спинового разупрочнения металла[10, 11] в скрещенных полях СВЧ-излучения и собственного магнитного поля тока. Результаты исследований могут быть использованы при любом виде ОМД [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий О.А. Электромеханический эффект в металлах // Письма в ЖЭТ. – 1969. – Т. 10. – С. 18–22.
2. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы (монография), М.: Изд-во МГИУ. – 2001. – 843 с.
3. Кравченко В.Я. Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации //ЖЭТФ. – 1966. – Т. 51. – N° 5. – С. 1676–1681.
4. Фикс В.Б. Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации // ЖЭТФ. – 1966. – Т. 51. – N° 5. – С. 1676–1681.
5. Рощупкин А.М., Батаронов И.Л. Об эффекте электрон-фононного увлечения дефектов в кристаллах // Изв. РАН. Серия Физическая. – 2004. – Т. 68. – N° 7. – С. 998–1007.

6. Батаронов И.Л. Механизмы электропластичности Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации, Соросовский образовательный журнал, N° 10. – 1999. – С. 93.
7. Троицкий О.А. Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом // Изв. АН СССР. Серия Физическая. – 1977. – N° 6. – С. 118 – 122.
8. Батаронов И.Л., Рощупкин А.М. Электропластическая деформация металлов и динамический пинч – эффект// Изв. вузов. Чернаяметаллургия. – 1993. N° 8. – С. 57–61.
9. Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Троицкий О.А. Упругие деформации проводников при действии импульсов тока // Машиностроение и инженерное образование. – 2018. – N° 1. – С. 33–42.
10. Molotskii M.,Fleurov V. Magnetic effects in electroplasticity of metals // Physical Review B. – 1991. – Vol. 52. – N° 22. – P. 311–317.
11. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б.// ЖЭТФ. Магниторезонансное разупрочнение кристаллов. – 1999 – Т. 115. – N° 2. – С. 605–621.
12. СВЧ-полупроводниковые приборы и их применение: пер. с англ. / Г. Уотсон. – М.: Мир. – 1972. –660 с.
13. Сапунов Г.С. Ремонт микроволновых печей. – Изд-во Салон-пресс. – 2003. – 272 с.

REFERENCES

1. Troiczkij O.A. E`lektromexanicheskij e`ffekt v metallax[Electromechanical effect in metals]. Pis`ma v ZhE`T. – 1969. – T. 10. – P. 18–22.
2. Baranov Yu.V., Troiczkij O.A., Avramov Yu.S., Shlyapin A.D. Fizicheskie osnovy` e`lektroimpul`snoj i e`lektroplasticheskoj obrabotok i novy`e materialy` (monografiya) [Physical fundamentals of electro-pulse and electroplastic treatments and new materials] M.: Izd-vo MGIU. – 2001. – 843 p.
3. Kravchenko V.Ya.Vozdejstvie napravlennogo potoka e`lektronov na dvizhushhiesya dislokacii [The effect of a directed electron flow on moving dislocations] ZhE`TF. – 1966. – T. 51. – N° 5. – PP. 1676–1681. (in Russian)
4. Fiks V.B.Vozdejstvie napravlennogo potoka e`lektronov na dvizhushhiesya dislokacii [Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации] ZhE`TF. – 1966. – T. 51. – N° 5. – PP. 1676–1681. (in Russian)
5. Roshhupkin A.M., Bataronov I.L. Ob e`ffekte e`lektron-fononnogo uvlecheniya defektov v kristallax [On the effect of electron-phonon entrainment of defects in crystals] Izv. RAN. Seriya Fizicheskaya. – 2004. – T. 68. – N° 7. – PP. 998–1007. (in Russian)
6. Bataronov I.L. Mexanizmy` e`lektroplastichnosti Sorosovskij obrazovatel`ny`j zhurnal [Mechanisms of electroelasticity the Influence of the directed stream of electrons for moving dislocations] N° 10. – 1999. – P. 93. (in Russian)
7. Troiczkij O.A. Plasticheskaya deformaciya metalla, vy`zvannaya pinch-e`ffektom [Plastic deformation of metal caused by the pinch effect] Izv. AN SSSR. Seriya Fizicheskaya. – 1977. – N° 6. – PP. 118–122. (in Russian)
8. Bataronov I.L., Roshhupkin A.M. E`lektroplasticheskaya deformaciya metallov i dinamicheskij pinch – e`ffekt [Electroplastic deformation of metals and dynamic pinch effect] Izv. vuzov. Chernayametallurgiya. – 1993. – N° 8. – PP. 57–61. (in Russian)
9. Skvorczov O.B., Stashenko V.I., Troiczkij O.A. Uprugie deformacii provodnikov pri dejstvii impul`sov toka [Elastic deformations of conductors under the action of current pulses] Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie. – 2018. – N° 1. – PP. 33–42. (in Russian)
10. Molotskii M.,Fleurov V. Magnetic effects in electroplasticity of metals // Physical Review B. – 1991. – Vol. 52. – N° 22. – P. 311–317.

11. Golovin Yu.I., Morgunov R. [Magnetic resonance softening of crystals] ZhE`TF. Magnitorezonansnoe razuprochnenie kristallov. – 1999. – T. 115. – N° 2. – PP. 605–621. (in Russian)
12. SVCh-poluprovodnikovy`e pribory` i ix primenenie: per. s angl. [Microwave semiconductor devices and their application] G. Uotson. – M.: Mir. – 1972. – 660 p. (in Russian)
13. Sapunov G.S. Remont mikrovolnovy`x pechej. [Repair of microwave ovens] – Izd-vo Salon-press. – 2003. – 272 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 22.01.2021 г.

УДК 621.793.1

ЭЛЕКТРОННЫЕ И РЕШЁТОЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

[1]О.А. Троицкий, [2]В.С. Савенко

[1]Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
г. Москва, Российская Федерация
[2]Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина
г. Мозырь, Республика Беларусь

Экспериментально обнаружен электронно-пластический эффект (ЭПЭ) при действии ускоренными электронами на деформацию растяжением кристаллов цинка при интенсивности облучения 10^{11} эл/см^{2}с и энергии электронов 1,4–1,5 МэВ, оказывающих на металл объёмное действие.

Аналогичный результат (ЭПЭ на токе) был получен при действии импульсами тока на деформируемые растяжением или сжатием кристаллы цинка. Импульсов имели плотностью $J_m = 10^4$–10^5 А/мм^2 создавали «электронный ветер» в короткие времена действия, порядка 10^{-4} с, что стимулировало пластическую деформацию и гарантировало отсутствие большого теплового эффекта. Был исследован электронный и решеточный механизмы ЭПЭ.

Ключевые слова: дислокации, «электронный ветер», прочность, пластичность металлов, обработка металлов давлением, электронно-пластический эффект

ELECTRONIC AND LATTICE MECHANISMS ELECTROPLASTIC EFFECT

[1]O.A. Troitsky, [2]V.S. Savenko

[1]Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russian Federation
[2]Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin
Mozyr, Republic of Belarus

An electron-plastic effect (EPE) was experimentally detected when accelerated electrons act on the tensile deformation of zinc crystals at an irradiation intensity of 10^{11} el/cm^{2}s and an electron energy of 1,4–1,5 MeV, which has a volumetric effect on the metal.

A similar result (EPE at the point) was obtained when current pulses were applied to zinc crystals deformed by stretching or compression. Pulses with a density of $J_m = 10^4$–10^5 A/mm^2 created an «electronic wind» in short action times, on the order of 10^{-4} seconds, which stimulated plastic deformation and guaranteed the absence of a large thermal effect. The electronic and lattice mechanisms of EPE were investigated.

Keywords: dislocations, "electronic wind", strength, ductility of metals, metal processing by pressure, electron-plastic effect

E-mail: oatroitsky@mail.ru

1. Обнаружение электронно-пластического эффекта на ускорителе

В 1963 г на линейном ускорителе электронов ИФХ РАН был обнаружен и опубликован [1] электронно-пластический эффект (ЭПЭ) действия ускоренных электронов на пластическую деформацию кристаллов цинка диаметром 1 мм и длиной 20 мм, находящихся в квазихрупком состоянии. Интенсивность облучения составляла 10^{11} эл/см^{2}с, энергия электронов 1,4–1,5 МэВ. Электроны указанных энергий оказывают объёмное действие на деформируемый металл. Расстояние от выходного окна ускорителя до испытуемых образцов составляло 100–120 мм. Для деформации образцов использовалась дистанционно работающая испытательная машина типа Instron, установленная под выходное окно ускорителя. В образцах тонкой полоской туши вдоль их оси отмечалось место выхода на поверхность дислокаций в элементах лёгкого скольжения (0001) $<11\bar{2}0>$. Образцы устанавливались в зажимы испытательной машины так, чтобы для одной их группы облучение во время деформации растяжением было поперечным элементам скольжения (а), а для другой группы продольным (б). В результате экспериментов было установлено, что в последнем случае при совпадении направления облучения с элементами легкого скольжения кристаллов имеет место повышенная их пластичность до момента квазихрупкого разрушения. Последнее состояние достигалось нанесением на поверхность образцов плёнки ртути толщиной 5 мкм по методике, описанной в монографии [2].

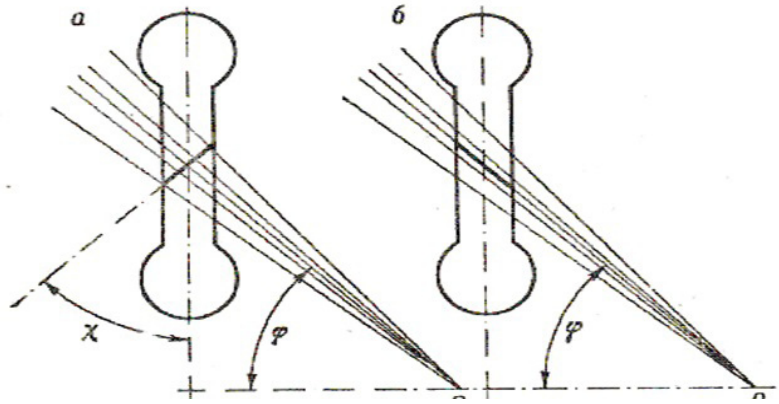


Рис. 1. Положение плоскости базиса монокристаллического образца цинка относительно потока частиц, испускаемых источником, расположенным в точке О: а – поперечное положение базиса; б – продольное, после поворота образца вокруг своей оси на 180°

Полученный результаты был объяснён действием «электронного ветра» внешнего происхождения на подвижные дислокации в плоскостях базиса (0001) кристаллов цинка, а также возможной интенсификацией работы источников дислокаций. Явление получило название электронно-пластического эффекта (ЭПЭ) при облучении. Помимо публикации [1] сведения об этом эксперименте были опубликованы в монографиях [3–6]. Однако практическое применение обнаруженного явления не получило из-за опасного для жизни тормозного и синхротронного излучения в рабочей камере линейного ускорителя электронов.

2. Обнаружение ЭПЭ при действии импульсами тока

ЭПЭ на токе был экспериментально обнаружен в 1969 г в работах [7, 8] при действии одиночными импульсами тока амплитудной плотности $J_m = 10^5$ А/мм^2 и длительности $\tau \sim 10^{-4}$ с на деформацию кристаллов цинка растяжением и сжатием при температуре жидкого азота. Эффект проявлялся, как показано на диаграммах растяжения рис. 2, в скачках вниз, т.е. падениях приложенной нагрузки от машины Instron за счет мгновенных скачкообразных удлинений образцов, скачков пластической деформации продолжительностью примерно по 10^{-3} с. Указанное явление возникало без участия макроскопического теплового эффекта, поскольку образцы и токоподводящие контакты, впаянные в их головки, находились в жидком азоте при температуре – 196 °С. В случае сжатия образцов во время действия на них импульсами тока, скачки ЭПЭ были направлены также вниз в сторону разупрочнения металла. Таким образом, тепловой эффект отсутствовал, в противном случае дилатометрическое удлинение сжимаемых образцов вызывали бы пики ЭПЭ не вниз, а вверх. При остановках работы машины, когда процессы активной деформации прекращались, наступала релаксация приложенных напряжений и небольшая дополнительная пластическая деформация, усиленная действием импульсного тока. Измерения с помощью приваренных к контрольным образцам термопар показали наличие лишь небольшого теплового эффекта относительно окружающего жидкого азота в моменты прохождения по ним импульсов тока. Тепловой эффект был не более одного градуса. Фиксировался также эффект Пельтье. Как видно из представленных на рис. 2 диаграмм, под влиянием импульсов тока происходило значительное (примерно вдвое) увеличение пластической деформации кристаллов до момента их хрупкого разрушения. Уменьшался коэффициент упрочнения, а также величина отдельных пиков с ростом частоты посылок тока. Последние два результата можно объяснить истощением под влиянием тока дислокационной структуры деформируемых кристаллов. В последующие годы многими авторами в мире были повторены эти опыты. Они теоретически обсуждались. Продолжались экспериментальные исследования ЭПЭ на монокристаллах и поликристаллах различных металлов и сплавов не только при низких, но и при комнатных температурах [7–28].

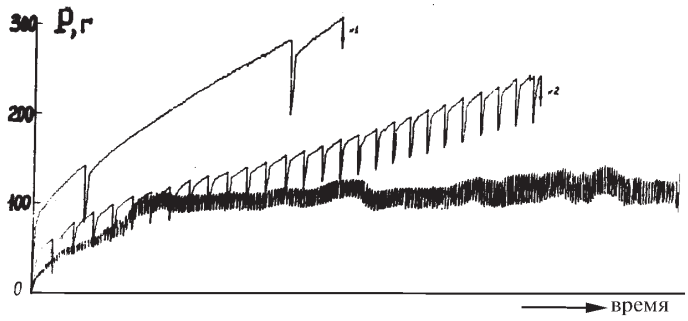


Рис. 2. Скачкообразная деформация кристаллов цинка, вызванная прохождением через них импульсов тока через каждые 200 с (1), 20 с (2), а также через каждую секунду (3). Амплитудная плотность тока составляла $J_m = 10^5$ А/мм^2 при длительности импульсов $\tau \sim 10^{-4}$ с

Существование ЭПЭ было подтверждено американскими учеными под руководством проф. Г. Конрада в работах [11–13] на поликристаллическом титане, десять лет спустя после первых российских публикаций в этом отношении [7, 8]. Вопреки распространенному мнению, что воздействие электромагнитными полями на металл во время обработки его давлением (ОМД) следует относить к сильным, эти воздействия,

как правило, отличаются относительно низкими затратами энергии – не более 10^{-4} эВ в расчете на один атом, что на один – два порядка меньше затрат энергии на простое механическое деформирование (10^{-3} эВ) или тепловом действии (10^{-2} эВ). В.Е. Громовым с сотрудниками было установлено увеличение подвижности дислокаций в массивных кристаллах цинка под действием импульсов тока [17–19]. При попутном «электронном ветре» скорость дислокаций в элементах скольжения (1122) <1123> кристаллов увеличивалась на 25–30 %, что явилось доказательством наличия полярной части ЭПЭ, измеренной на дислокационном уровне. Встречно направленные импульсы тока также инициировали перемещение дислокаций, но в меньшей степени, видимо, в силу влияния тока на стартовые напряжения движения дислокаций, которые уменьшались на величину порядка 0,14–0,16 МПа [17–19]. О.А. Троицким с сотрудниками было установлено, что внутреннее трение $\mathrm{tg}\,\Phi$ в кристаллах кадмия повышается под влиянием импульсного тока, как считается, за счет увеличения подвижности дислокаций [28]. При действии импульсного тока с амплитудной силой тока 200 А и длительности импульсов 50 мкс дефект модуля был больше, чем при действии переменным током эквивалентного теплового действия, а потери тем меньше, чем больше скважность импульсного процесса $Q = T/\tau$ при заданном периоде T и частоте посылок импульсов тока F = 100 Гц [28]. В отношении ЭПЭ существенны два основных действия:

• в части электронных механизмов – это действие «электронного ветра» на движение дислокаций в металле, включая его давление на временно заторможенные скопления дислокаций с возможным усилением взаимодействия этих скоплений со стопорами, в качестве которых могут выступать парамагнитные примеси, а также дефекты решетки в виде дислокации леса [22, 23];

• в части решеточных механизмов – это пондеромоторные силы пинч-эффекта, характерные для импульсного тока, вызывающие колебания узлов кристаллической решетки [9, 10, 14, 15] по типу влияния ультразвука (УЗ) с макроскопической вибрацией всего образца.

Как комбинацию указанных действий возможно существование также спин – зависимых реакций электронов с дефектами решетки, включая взаимодействие парамагнитных примесей с подвижными дислокациями, приводящее к спиновому разупрочнению [16]. Это означает наличие влияния электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) на механические свойства металла. Явление пока мало изученное, хотя теоретически возможное. Его можно отнести к перспективным новым направлениям исследований ЭПЭ, которое настало время осуществлять в продолжение работ [10, 13, 14, 16].

3. Электронные механизмы действие тока

В настоящей работе рассмотрим обе группы воздействий, исходя из существования различных видов движения свободных электронов в металлах, а также существования пинч-эффекта действия импульсного тока на проводник собственным магнитным полем тока, которое вызывает колебания узлов решетки и вибрацию всего образца. Различают беспорядочное движение типа броуновского движения молекул (атомов) со скоростью примерно $\overline{V}_T = 10^5$ м/с, что совпадает со скоростью электронов на изоэнергетической поверхности Ферми (см. разделы 3.2–3.4 статьи), а также упорядоченное движение электронов под влиянием приложенного электрического напряжения с возможной скоростью дрейфа 0,6–6 мм/с если речь идёт о постоянном токе силой не более 10 А. Сила тока может быть повышена, если создавать его на короткие времена порядка 10^{-4} с. Можно получить импульсный ток плотностью J_m до 10^3 А/мм^2. Это в свою очередь позволит достигать больших значений средней скорости электро-

нов $V_д = J_m/en$ = 1 м/с и более, что сопоставимо со скоростью пластической деформации металла при отдельных видах ОМД. По сути дела это скорость «электронного ветра» тока при реализации ЭПЭ на импульсном токе.

Существует также инерционное движение электронов, которое возникает при резком торможении куска металла, например, пули при резком торможении на мишени или торможении кругового движения катушки с длинным проводом. В обоих случаях возникает ток инерционного происхождения. Скорость «электронного ветра» инерционной природы $v_{ин}$ может достигать значений в нескольких сот м/сек, в зависимости от начальной скорости движения куска металла. Это также может иметь практическое значение, включая военное.

3.1. Действие «электронного ветра» на деформируемый металл

Действие «электронного ветра» на процесс перемещения дислокаций при деформации металла может быть существенным при больших плотностях тока порядка $J_m = 10^5$–10^6 А/см^2. В.Я. Кравченко теоретически рассмотрел вопрос взаимодействия направленного потока электронов с уже движущимися дислокациями [29]. Сила увлечения дислокаций свободными электронами была представлена в виде:

$$F_в = \frac{b}{4}\left(\frac{v_в}{v_d} - 1\right)\frac{v_в}{v_d}\frac{dn_в}{d\mu}\Delta^2$$

где μ, Δ – химический и деформационный потенциал; v_F – скорость электронов на поверхности Ферми, b – вектор Бюргерса дислокаций. При условии превышения скорости дрейфа электронов $v_в$ над скоростью движения дислокаций $v_д$ сила F становится положительной величиной. Указанное положение теории В.Я. Кравченко имеет экспериментальное основание в первых опытах по ЭПЭ с импульсным током [7, 8], проведенных три года раньше создания теории [29]. Отметим также, что теория В.Я. Кравченко не объясняет всю совокупность данных по ЭПЭ на токе, накопленных к настоящему времени. В частности, не объясняется сильная зависимость ЭПЭ от концентрации примесей, особенно парамагнитных, а также влияние «электронного ветра» на работу источников дислокаций, что исправил В.Д. Фикс своей теорией [30] пятнадцать лет позже. Под влиянием импульсов тока усиливается генерирующая работа источников дислокаций. Простой расчет, выполненный В.Д. Фиксом, показывает, что «электронный ветер» при больших плотностях тока может вызывать размножение дислокаций в источниках Франка-Рида, если механические напряжения σ превысят критический уровень σ_c , что несомненно выполняется при ЭПЭ.

Согласно В.Д. Фикса [30] должно выполняться условие:

$$\sigma > \sigma_c = \frac{2\tau}{Lb} = \frac{2\mu b}{L}$$

где τ – линейное натяжение дислокационной петли; L – расстояние между точками закрепления и μ – модуль сдвига. Известно, что при $L = 10^{-3}$ см напряжения начала работы источников Франка-Рида равны экспериментально наблюдаемому пределу текучести металла σ_c. Размножение дислокаций импульсным «электронным ветром» может реализоваться в том случае, если созданные «ветром» тока механические напряжения $\sigma_J = J_m/e$, mv_F будут равными значениям критических механических напряжений или пределу текучести металла σ_c. Можно приравнять два последних выражения и получить формулу для критических значений амплитуды плотности тока J_m, при которых начинается генерирование дислокаций

$$J_m = \frac{2e\mu_b}{m\nu_F L}$$

Для металлов можно принять значения $\mu = 10^{10}$–10^{11} дин/см^2, $b/L = 10^{-5}$. Тогда для плотности тока получается значение $J_m = 10^5$–10^6 А/мм^2, что достижимо в эксперименте, особенно на тонких образцах и малых длительностях импульсов тока, порядка 10^{-4} с. С учетом текущего внешнего механического напряжения σ_s окончательно имеем $J_m = e / m\nu_F = 2\mu_b/L - \sigma_s = 10^5$ А/мм^2, что соответствует использованным при обнаружении ЭПЭ плотностям тока [7, 8]. Таким образом, приведенные фрагменты теорий взаимодействия «электронного ветра» с дислокациями В.Я. Кравченко [25] и В.Д. Фикса [26], относящиеся к основам электронной теории пластичности металлов, обосновывают режим ЭПЭ по параметрам импульсов тока, его скоростную зависимость и в меньшей степени по влиянию примесей. Кроме того, на основе этих теорий не может быть объяснена зависимость ЭПЭ от величины длительности импульсов тока. Остается также в стороне от объяснения такая важная компонента электропластической деформации как динамический пинч-эффект [9, 10, 14, 15], органически свойственный импульсному току.

3.2. Влияние характера поверхности Ферми и типа проводимости

Важную роль в величине ЭПЭ в металлах играет поверхность Ферми. Поверхность Ферми, как известно, является изоэнергетической поверхностью в импульсном p_F–пространстве. Она представляет собой виртуальный энергетический каркас, частично повторяющий симметрию кристаллической решетки металла. Верхний энергетический уровень свободных электронов металла, принимающий участие в проводимости и в передачах импульсов силы и энергии на дислокации в ходе электропластической деформации, описывается формулой $\varepsilon_{F(0)} = \hbar / 2m\,(3\pi 2n)^{2/3}$ и составляет, например, для цинка при $n = 3{,}38\ 10^{22}$ величину примерно 5 эв. Полная площадь поверхности Ферми составляет $S_F = 1{,}8\ 10^{-37}$ г^{2}см^2/с^2, а средняя скорость электронов на поверхности Ферми равна $< \nu_F > = 0{,}92\ 10^8$ см/с, что на несколько порядков выше дрейфовых скоростей электронов $\upsilon_e = 10^2$ см/с при максимально возможных плотностях тока в металле $J_m = 10^6$ А/мм^2 (в импульсном режиме). Из теории В.Я. Кравченко [29] следует, что «электронный ветер» может производить ускорение дислокаций, действуя на них с максимальной силой

$$F_{в,max} = \frac{b}{4}\frac{v_в}{v_F}\frac{dn}{d\mu}\Delta^2$$

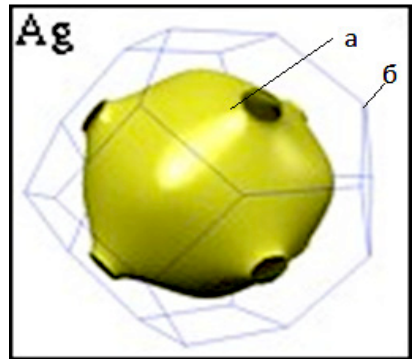


Рис. 3. Поверхность Ферми серебра

Другим важным аспектом влияния поверхности Ферми на ЭПЭ является участие различных ее частей и фрагментов в передачах импульсов энергии и силы на дислокации. В процессе электропроводности, как известно, происходит смещение фермиевских электронов по нормали к поверхности Ферми, причем доля таких электронов возрастает с увеличением площади поверхности Ферми, а также и с увеличением степени ее закрытости. В этом смысле, например, металлы 1 группы Cu, Ag и Au, имеющие примерно одинаковую топологию поверхности Ферми (рис. 3) в виде гофрированного сфероида или «пузо» (а), который через узкие трубки или «шейки» в пространственных направлениях ГЦК решетки (б) соединяется с соседними сфероидами, характеризуются наличием противоположных тенденций. С одной стороны площадь Ферми S_F в указанном ряду возрастает и можно ожидать усиления ЭПЭ в золоте и серебре по сравнению с медью. С другой стороны в этом же ряду диаметр «шейки» возрастает, приводя к уменьшению степени закрытости. Это означает уменьшение проводимости металла и снижение ЭПЭ в золоте и серебре по сравнению с медью. Это требует выяснения и уточнений в экспериментах. Уже проведенные эксперименты свидетельствуют о преобладании второй тенденции.

3.3. Новые вопросы и роль удельной поверхности Ферми

Можно считать, что ЭПЭ, подобно электронной теплоемкости, пропорционален удельной поверхности Ферми $\int dS_F / V$, где dS_F – элемент площади поверхности Ферми и V – объем, охватываемый поверхностью Ферми. Поверхность Ферми цинка, наиболее изученного в отношении ЭПЭ, имеет практически полную компенсацию электронных и дырочных объемов, но топология этих объемов совершенно различная. Дырочная поверхность открытая и представляет собой многосвязную конструкцию – «монстр», а электронная поверхность состоит из «линз» и «иголок» на вертикальных гранях вдоль оси [0001], перпендикулярной плоскости базиса, а также из «сигар», «раковин» и «бабочек» на горизонтальных направлениях. Поэтому, вероятно, механизм взаимодействия электронов с дислокациями превалирует над механизмом взаимодействия «дырок» с дислокациями.

Кадмий имеет также открытую «дырочную» поверхность Ферми. Однако у него в базисной плоскости (0001) имеются разрывы, т.е. элементы закрытости, чем можно объяснить большую величину ЭПЭ в этом металле, сопоставимую с цинком. Кроме того, в кадмии даже в сильном магнитном поле вдоль направлений <1100> и <1210> не образуются открытые направления, чем он отличается от цинка, а также от рения, бериллия и магния. Величина ЭПЭ в кадмии в отличие от цинка не снижается в ходе электропластической деформации благодаря сохранению закрытости поверхности Ферми в направлениях <1210> наиболее вероятного направления продвижения дислокаций в базисной плоскости (0001).

Наконец, для таллия поверхность Ферми является открытой с неравным числом электронных и «дырочных» носителей. Она содержит две гофрированные плоскости типа (0001), соединенные узкими перемычками вдоль оси [0001]. Гофры в плоскости (0001) создают соответствующие компоненты электронного и «дырочного» ветров, влияющих на перемещения базисных дислокаций разного знака. Поэтому в этом металле можно ожидать большой величины ЭПЭ. В заключении этого раздела отметим одну деталь механизма передачи импульсов силы и энергии от фермиевских носителей тока на дислокации, подтверждающую определяющую роль именно удельной поверхности Ферми $\int dS_F / V$ на величину ЭПЭ. Поглотив в электрическом поле E кванты энергии фермиевские носители тока (электроны) переходят в непосредственную окрестность (близость) от поверхности Ферми, приводя к ее смещению в поперечном направлении по нормали к этой поверхности на величину:

$$\Delta\varepsilon / \varepsilon_F = 10^{-5} - 10^{-3}\,\%.$$

В силу большой разницы эффективных масс электронов и узлов решетки (включая дислокаций) фермиевские электроны в ходе рассеяния и потерь приобретенной в поле E энергии $\Delta\varepsilon$ изменяют лишь направление своего импульса, перепрыгивая с одной точки поверхности Ферми на другую. Множество таких скачков и столкновений приводит к отрыву дислокации от препятствия и к увеличению скорости движения дислокации. Фермиевские электроны и «дырки» фактически не покидают верхний уровень поверхности Ферми. Они мигрируют по ее поверхности. Поэтому, чем больше поверхность Ферми S_F металла, и конкретно – чем больше удельный вес поверхности Ферми $\int dS_F/V$ по отношении к объему, охватываемому изоэнергетическим объемом (что реализуется при большом объеме, охватываемых отдельными фрагментами поверхности Ферми), тем больше величина ЭПЭ. В этих условиях возрастает число элементарных передач импульсов силы и энергии от носителей тока к дислокациям, участвующим в пластической деформации металла. Этот вывод очевиден и практически не требует доказательств.

3.4. Влияние «электронного ветра» на группы дислокаций

Концепция динамической неравновесности дислокационных скоплений в ходе электропластической деформации металла (ЭПДМ), предложенная А.М. Рощупкиным, И.Л. Батароновым и О.А. Троицким в 1989 г. [17] наиболее адекватно отвечает большой величине ЭПЭ, его зависимости от условий экспериментов и от параметров импульсного тока. Она учитывает и объясняет влияние импульсного тока на деформируемый металл как через механизм действия «электронного ветра» на скопления дислокаций, так и через механизм действия динамического пинч-эффекта посредством создания вибраций кристаллической решетки и создания дополнительных дальнодействующих полей механических напряжений.

В отличие от механизма возможного в принципе влияния тока на термоактивируемое движение дислокаций, который не объясняет большую величину ЭПЭ и наличие значительной нетермической части ЭПЭ, эта концепция была построена на предположении наличия безактивационного вклада «электронного ветра» импульсного тока на пластическую деформацию через влияние указанного фактора на динамическую нестабильность и неравновесность дислокационных ансамблей в скоплениях. Суть этой концепции состоит в следующем.

В процессе пластической деформации формируются неравновесные группы дислокаций (временно заторможенные дислокационные скопления и группы скоплений в линиях скольжения, а также в других возможных дислокационных ансамблях). Импульсы тока вызывают их разрядку, сопровождаемую микропластической деформацией $\Delta\varepsilon$. При этом основная величина наблюдаемого скачка деформации осуществляется за счет энергии внутренних напряжений, накопленных в процессе предварительной пластической деформации, а также в промежутках между импульсами тока. Импульс тока выступает, таким образом, в качестве спускового крючка, инициируя разрядку скоплений дислокаций. Этот вклад может быть небольшим по уровню своего эквивалентного механического действия. Отметим, что подобное пластифицирующее действие оказывает низкоамплитудный ультразвук (УЗ) и ряд других внешних энергетических факторов, включая возможно и импульс СВЧ-излучения. Важной особенностью рассматриваемого процесса является его очевидная полярность и энергетическая пороговость.

Разряжаются только те неравновесные группы дислокаций, для которых величина механических напряжений σ_J, создаваемых «электронным ветром», увеличивает

механические напряжения, действующие на голову скопления. Для них вектор плотности тока J_m направлен в нужном направлении. Остальные неравновесные группы, для которых вектор плотности тока J_m направлен противоположно наиболее вероятному направлению продвижения скопления, будут преодолевать свои барьеры лишь термофлуктуационным путем, т.е. не сиюминутно, если к тому же не происходит их инициирование разряжающимися скоплениями в других соседних плоскостях скольжения.

Появление и массовое накопление новых неравновесных групп дислокаций нуждаются в дополнительной нагрузке металла, т.е. должно существовать некоторое время t_3 формирования неравновесных групп дислокаций, в пределах которого импульс тока фактически не оказывает влияния на пластическую деформацию. Это было установлено экспериментально. Установлено также, что деформационное упрочнение может вызывать увеличение t_3 с ростом общей деформации металла. Кроме того, если применять серии импульсов, то эффективно срабатывают только некоторое число первых импульсов тока в серии, к приходу каждого из которых успевают появиться неравновесные группы дислокаций, готовые к преодолению препятствия и к началу движения. Естественно указанная ситуация сильно зависит также от темпа нагружения образца испытательной машиной. Такая ситуация имела место в первом эксперименте по ЭПЭ [1] в 1968 г., в котором было обнаружено явление ЭПЭ, когда применялся импульсный ток частот порядка 0,5 Гц, а также в работах других авторов, исследовавших ЭПЭ.

И.Л. Батароновым и др. [8, 9, 18, 19] был рассмотрен механизм, обеспечивающий безактивационный вклад импульсов тока в ЭПДМ, что схематически иллюстрируется ниже. Считалось, что упругое взаимодействие дислокаций аналогично электростатическому взаимодействию одноименно заряженных нитей. Поэтому скопление дислокаций одного знака, определяемого положением относительно плоскости скольжения их экстраплоскостей, можно рассматривать как систему объектов, связанных пружинками с нелинейным законом упругости. Такая система удерживается в равновесии с одной стороны приложенными механическими напряжениями σ от испытательной машины, а с другой стороны локальным стопором, возможно парамагнитным примесным атомом, как показано на рис. 4. При пропускании импульсов тока на каждую дислокацию в скоплении, содержащем *N* дислокаций (примерно 20–25 дислокаций) будет действовать сила «электронного ветра» F_J на все скопление будет действовать уже сила в N раз большая, т.е. NF_J, чем на одну дислокацию. Эта сила в соответствии с третьим законом механики будет давить на стопор, помогая головной дислокации преодолеть этот стопор. Происходит, таким образом, *N* – кратное усиление эффекта действия «электронного ветра», приводящее к быстрому и безактивационному преодолению скоплением препятствия в своей плоскости скольжения.

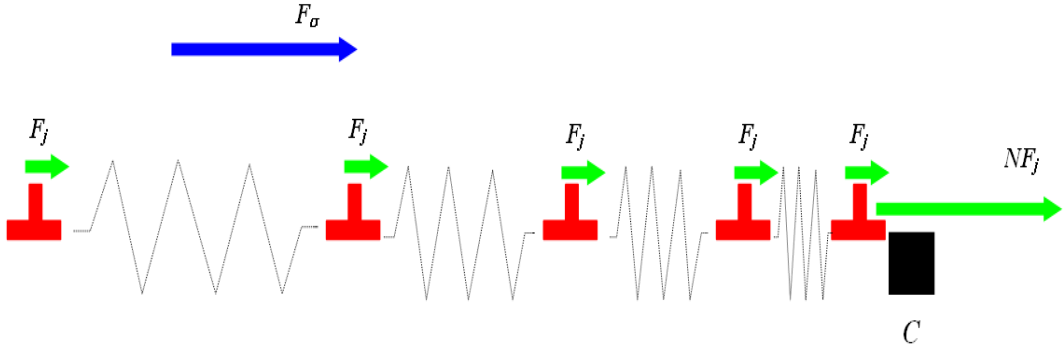


Рис. 4. Усиление эффекта «электронного ветра» на головной дислокации скопления, зажатого у локального стопора с силой *Fm* от механических напряжений

Кроме того для линейных дислокаций разных знаков, у которых экстраплоскости находятся выше или ниже плоскости скольжения, «электронный ветер» может быть попутным или встречным, как показано на рис. 4 правой стороной.

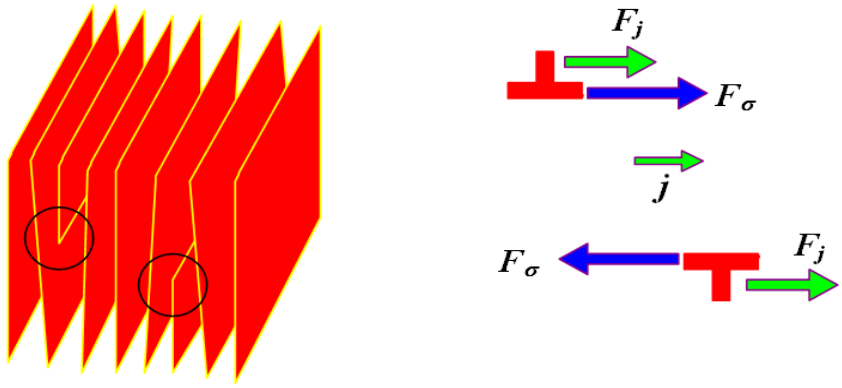


Рис. 5. Дислокации разных знаков (а) и два возможных направления действия на них силы «электронного ветра» F_j (б) – попутного и встречного относительно механических сил F, задаваемых испытательной машиной

Однако такое усиление эффекта действия «электронного ветра» происходит не одновременно с прохождением по образцу следующего импульса тока, а только после перемещения дислокаций всего скопления, состоящих из нескольких десятков дислокаций, в новое относительно равновесное положение, которое из-за эффекта вязкого торможения дислокаций с коэффициентом B_e происходит с некоторым запозданием, что теоретически было показано А.М. Рощупкиным и И.Л. Батароновым в 1996 г. [19]. Это объясняет показанное О.А. Троицким с сотрудниками. [15, 16, 23], отсутствие эффекта на коротких по длительности τ импульсах тока (при $\tau = 10^{-5}$ с и меньше), т.е. пороговость ЭПЭ по параметру τ, а также запаздывание эффекта действия тока на деформацию металла, т.е. наличие некоторой энерционности ЭПЭ.

В рамках концепции влияния тока на неравновесные группы дислокаций [8, 9, 17–19] удается найти объяснение практически всем закономерностям ЭПДМ, а также получить хорошее согласование экспериментально наблюдаемой величины ЭПЭ с теоретическими оценками. В то же время картина ЭПДМ на всех структурных уровнях пластической деформации до конца еще не изучена. В этом направлении необходимо вести дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования, обусловленные в связи с открытием ЭПЭ расширением физических представлений об ЭПДМ (электропластической деформации металлов) и очевидной практической ценностью ЭПЭ как основы многих новых технологий обработки металлов давлением на среднем металлургическом переделе.

4. Решеточные механизмы действия тока через пинч-эффект

Представления о пинч-эффекте перешли в твёрдое тело из газовой плазмы [18]. По аналогии с газовой плазмой в твёрдом теле различают как самостоятельные явления *Z*- и *Q*-пинч-эффекты [19]. Первый (*Z*-пинч) возникает при протекании сильного тока по образцу и обусловлен сжатием плазмы твёрдого тела собственным магнитным полем тока (рис. 6, верхний рисунок). Второй (*Q*-пинч) возникает при сжатии плазмы твёрдого тела в импульсном продольной магнитном поле, изменяющимся во времени (рис. 6, нижний рисунок).

Поскольку пинч-эффект заключается во взаимодействии собственного магнитного поля тока с образцом, изучение влияния его на пластическую деформацию металла является довольно сложной задачей из-за влияния самого тока на пластическую деформацию металла. Разделить действие теплового эффекта и ЭПЭ с одной стороны и пинч-эффекта с другой стороны на простых образцах практически не представляется возможным. В известной мере поэтому в первых работах [7, 8], касающихся действия импульсного тока на пластическую деформацию кристаллов, не предполагалось, что пинч-эффект влияет на пластическую деформацию образцов. Однако позже, сначала теоретически, а затем прямыми экспериментами [9, 10] было установлено участие пинч-эффекта (ПЭ) в скачкообразной деформации металлических кристаллов.

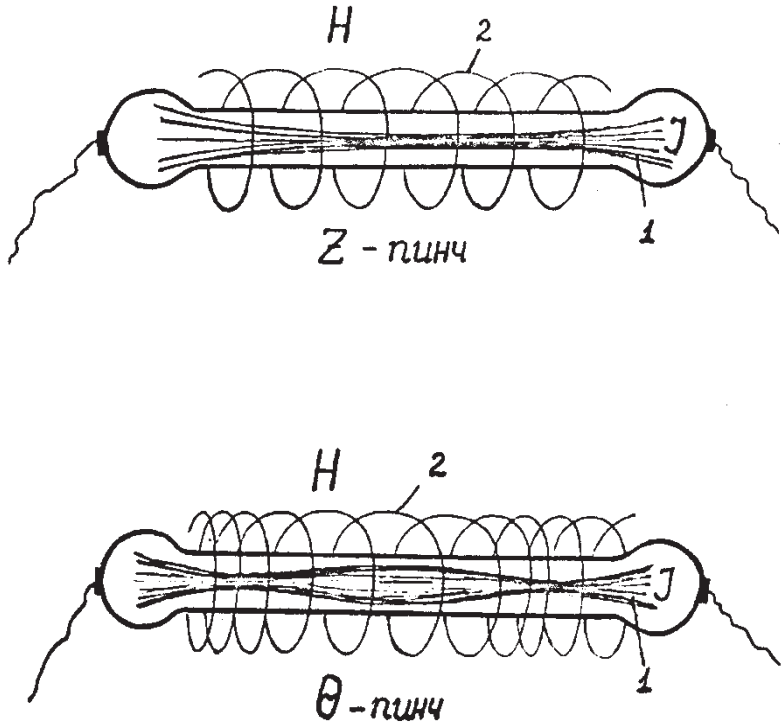


Рис. 6. Разновидности пинч-эффекта: а – Z- и б – Q-пинч-эффект;
1 – линия тока, 2 – линии магнитного поля

Была разработана методика двойных образцов, показанных на рис. 8 а, имеющих рабочую деформируемую часть А и нерабочую часть Б, служащую для пропускания тока и создания пинч-эффекта в верхней части образцов с генерированием упругих колебаний, которые передавались на нижнюю их часть. Для проведения экспериментов использовались кристаллы чистого (99,998% Zn) и легированного ($2 \cdot 10^{-2}$ Cd) цинка, имеющих ориентацию от 18° до 44° (угол между плоскостью базиса и осью образца). Длина частей А и Б была одинаковой и составляла 16 мм, а диаметр образцов ~ 1 мм. Головки на кристаллах наваривались с помощью электрической спирали. Соединением двух кристаллов головками (из одной партии) получали двойные образцы, имеющие одинаковую ориентацию в обеих частях. Образцы имели при температуре жидкого азота сопротивление ~ $2 \cdot 10^{-5}$ Ом. Деформация осуществлялась растяжением с постоянной скоростью 0,01 см/мин при точности определения нагрузок 1–2 г. Жесткость пружины динамометра составляла $K = 3{,}3 \cdot 10^{-4}$ мм/г. Опыты проводились при температуре жидкого азота. Через двойные образцы в части Б с помощью генератора

пропускались импульсы тока плотностью от 500 А/мм^2 до 2500 А/мм^2 при длительности импульсов ~ 10^{-4} с и частоте следования 0,1–0,2 Гц. Величина импульсного тока определялась по падению напряжений на калиброванном сопротивлении 0,004 Ом с помощью осциллографа С1-15. Форма импульсов была прямоугольной, обратные выбросы отсутствовали.

Время между импульсами выбиралось большим (5–10 с) с тем, чтобы на диаграммной записи деформации кристаллов можно было выделить одиночные скачки деформирующего усилия ΔP и оценить затем приращения длины кристалла Δl в части *А* по формуле $\Delta l = K \cdot \Delta P$, где K – жесткость пружины динамометра. Невысокая частота импульсного тока позволила также избегать резонансных явлений. Температура образцов контролировалась прибором Ф116/2 от системы дифференциальных медь-константановых термопар в различных частях образца с точностью 0,05 °С. Холодные спаи термопар находились в жидком азоте.

На рис. 7 б приведены характерные диаграммы растяжения двойных образцов с осцилляциями деформирующего усилия, связанными с прохождениями тока по части А и по части Б образцов. Скачки деформации, получаемые в случае прохождения тока по части Б обусловлены пластической деформацией кристалла, стимулированной пинч-эффектом. Упругие колебания образца, создаваемые пинч-эффектом в части Б образца со скоростью v_l, близкой к скорости звука, передавались на нижнюю деформируемую часть А и вызывали здесь пластическую деформацию кристалла без прохождения по ней тока. Скачки деформации в этом случае были меньше по величине, чем когда ток проходил по части А, когда действие пинч-эффекта суммировалось с собственно электрическим действием тока, т.е. с ЭПЭ. Из приведённых диаграмм видно, что пики типа Б меньше, чем типа А. Это свидетельствуют о влиянии ПЭ на пластическую деформацию металла. ПЭ возникал в части Б и порождал через коэффициент Пуассона упругие продольные колебаниями вдоль образца до его рабочей части А. Здесь он вызывал, хоть меньшие, но всё же скачки пластической деформации, стимулированные только пинч-эффектом. Так удалось доказать участие ПЭ в электропластической деформации металла.

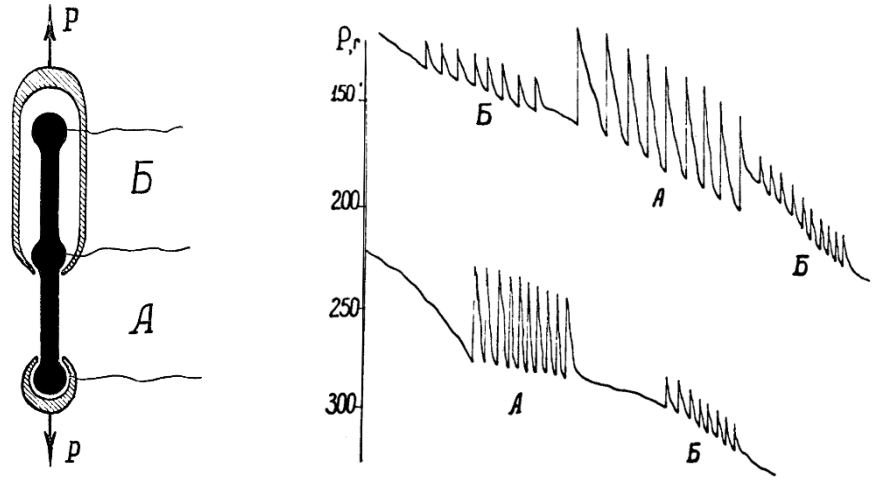


Рис. 7. Двойные образцы монокристаллического цинка χ_0=32° и диаграммы их растяжения с осцилляциями деформирующего усилия, связанными с прохождением одиночных импульсов тока по деформируемой (а) и недеформируемой (б) части

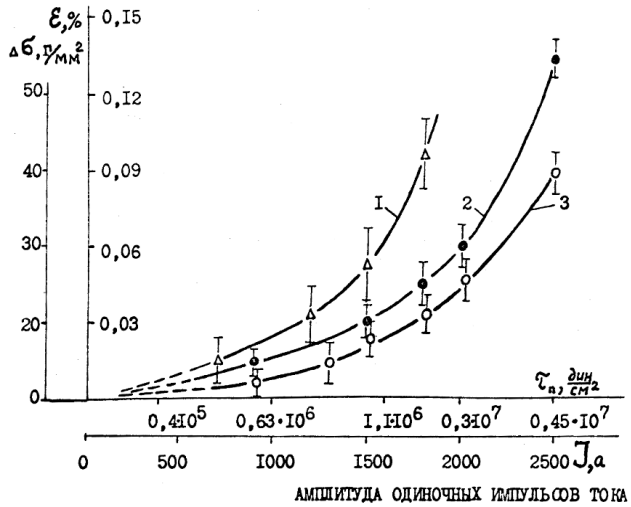


Рис. 8. Зависимость скачка деформирующего напряжения и приращения длины образцов диаметром ~ 1 мм с длиной рабочей части ~ 16 мм от величины одиночных импульсов тока и соответствующего пинч-действия (первая ось)

На рис. 8 приведены зависимости величины деформирующего напряжения $\Delta\sigma_Б$, а также соответствующее приращение длины образцов в одиночных импульсах тока для кристаллов ориентации χ_0 = 18° (кривые 2 и 3) и χ_0 = 44° (кривая 1). Каждая точка на приведенных графиках является средней по результатам измерений 10–12 осцилляций деформирующего усилия на диаграммах. Отклонение скачков от средней величины не превышало 5 %. Как видно из представленных данных, наблюдается квадратичная зависимость эффекта от силы тока, что указывает на ответственность за наблюдаемое явление пинч-эффекта, который квадратично зависит от тока. Эффект усиливается с увеличением угла χ_0, т.е. на кристаллах с легким базисным скольжением и уменьшается на легированных кристаллах (χ_0 = 18°). По оси абсцисс на рис. 8 (вторая ось) указаны также механические напряжения, которые создаются на поверхности образцов в части Б за счет пинч-эффекта. Указанных напряжений оказывается достаточно, чтобы создать упругие колебания в металле и ускорить пластическое течение кристалла в нижней части двойных образцов, находящихся под нагрузкой выше предела текучести.

Было установлено, что помимо указанного возрастания порогового значения тока при легировании происходит увеличение наклона зависимости Δl от величины тока для легированных образцов. Такое же возрастание угла наклона графиков наблюдается при изменении ориентации.

Пороговое значение плотности тока, с которого начинают отмечаться скачки деформирующего усилия и заметная пластическая деформация кристаллов, составляет для «чистых» кристаллов цинка величину порядка J_n = 400–500 А/мм², а для кристаллов цинка, легированных кадмием, несколько больше J'_n= 500–600 А/мм². Приращение длины образцов за счет электропластической деформации включающей, помимо ЭПЭ, возможное тепловое действие тока за один импульс тока составляет примерно 10 мкм (при точности измерений 1–2 мкм) или 6–7·10^{-2} % от начальной длины образцов, что эквивалентно выходу на поверхность кристалла порядка 10^4–10^5 базисных дислокаций, скользящих по плоскости базиса (0001). Помимо указанного возрастания порогового значения тока при легировании происходит увеличение наклона зависимости Δl от величины тока для легированных образцов. Такое же возрастание угла наклона

графиков наблюдалось при изменении ориентации кристаллов от 18° до 44°. Скачки деформации связаны, в основном, с пластической деформацией кристаллов по базисным плоскостям (001).

Установлено также, что тепловое действие тока не было ответственно за наблюдаемый эффект. Об этом свидетельствовал факт увеличения пороговых значения тока I'_n на легированных кадмием кристаллах цинка Приведенные данные указывают также на то, что ПЭ, сопутствующий ЭПЭ действию тока, вызывает пластическую деформацию кристаллов, даже если он создается по краю образцов, как в описанных экспериментах. Следовательно, наблюдавшееся в работах [7, 8] явление скачкообразной деформации кристаллов цинка включало в себя пинч-действие тока, как это предположительно указывалось в указанных работах. Эффект теплового действия тока в данном случае отпадает, т.к. ток проходил по недеформируемой Б части образцов, а в деформируемой А части при тщательных измерениях температуры дифференциальная медь-константановая термопарами с точностью 0,05 °С не было отмечено изменений температуры по отношению к окружающему жидкому азоту.

Сопутствующий действию импульсного тока ПЭ эквивалентен по своему влиянию приложению к кристаллу осциллирующих механических напряжений. Известно, что под влиянием таких напряжений прямолинейные дислокации совершают возвратно-поступательное движение, а дислокационные петли периодически изменяют свой радиус, т.е. расширяются или сжимаются с частотой внешнего механического напряжения. Закрепленные же по концам дислокационные сегменты испытывают вынужденные колебания около положения равновесия. В этих условиях возрастает вероятность отрыва дислокаций от стопоров. Согласно Мэзона даже малоинтенсивные колебания, не вызывающие работы источников дислокаций, могут изменять спектр длин дислокационных сегментов и влиять на сопротивление кристаллов деформированию. Было отмечено также, что акустическое «смягчение» металла может увеличить предшествующую хрупкому разрушению образцов пластическую деформацию, что позволяет деформировать хрупкие материалы. Это согласуется с увеличением пластичности кристаллов цинка под влиянием импульсов тока, вызывающим упругие колебания от пинч-эффекта (ПЭ).

О соотношении между ПЭ и ЭПЭ для монокристаллического цинка диаметром ~ 1 мм можно судить по графикам на рис. 9, где по оси ординат отложены скалывающие напряжения на плоскости базиса цинка (0001), а по оси абсцисс – амплитудная плотность тока J_m. Видно, что с ростом J_m сначала преобладает ЭПЭ, а затем более существенным становится пондеромоторный ПЭ.

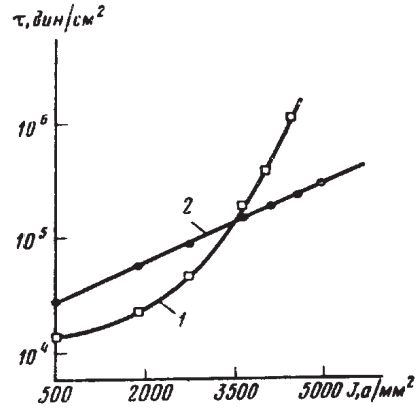


Рис. 9. Соотношение ПЭ (1) и ЭПЭ (2)для кристаллов цинка диаметром ~ 1 мм и длиной ~ 16 мм в зависимости от плотности тока J_m

Согласно опубликованным ранее теориям взаимодействия «электронного ветра» с дислокациями [29, 30] ЭПЭ должен быть линейным по току, иметь порог действия по плотности тока J_m, а также быть полярным, т.е. зависеть от направления вектора амплитудной плотности тока J_m относительно зоны деформации. Кроме того ЭПЭ должен характеризоваться слабой температурной зависимостью, а скоростная его зависимость должна коррелироваться с дрейфовыми скоростями свободных электронов (скоростями «электронного ветра»), участвующими в пластической деформации металла.

Часть указанных закономерности подтвердились экспериментально, что отражено в монографиях [3–6, 16], а также в работах многих ученых из разных стран. Теории [20, 30] не объясняют всей совокупности накопленных экспериментальных данных по ПЭ и ЭПЭ, накопленных к настоящему времени. В рамках этих теорий вообще не обсуждается вопрос о пинч-эффекте как важнейшей компоненте электропластической деформации металла. Не объяснено влияние на величину кооперативного явления примесей, особенно парамагнитных, а также роль длительности импульсов тока τ и наличие порога в этой зависимости на уровне 10^{-4} с. Поэтому с годами стал ощущаться дефицит на новые теоретические представления об ЭПЭ и роли ПЭ в электропластической деформации металла (ЭПДМ) при больших амплитудных значениях плотности тока J_m. Ситуация исправилась после появления теоретических работ А.М. Рощупкина и И.Л. Батаронова [14, 15, 22, 23].

Как известно, собственное магнитное поле B тока напряженностью H действует на линии тока, оттесняя их от поверхности вглубь деформируемого проводника. Для образцов круглого поперечного сечения возникают механические напряжения в радиальном направлении, находимые по формуле $p = \mu \frac{H^2}{8\pi}$ [дн/см^2] или $p \approx 1{,}6 \cdot 10^{-2} \mu (J_m r)^2$, где J_m – плотность тока и r – радиус образца. Возникает вибрация всего образца и узлов кристаллической решетки. В этом состоит основное проявление действия динамического пондеромоторного ПЭ, который вызывает дополнительную пластическую деформацию, стимулирует перемещение дислокаций и интенсифицирует работу источников дислокаций. Из приведённого выражения для p следует, что при одной и той же плотности тока, например, $J_m = 10^5$ А/см^2, ПЭ будет выражен тем меньше, чем меньше радиус используемых образцов. Этим воспользоваться американцы [11–13], которые пытались выделить в суммарном кооперативном эффекте вклад «электронного ветра» тока, только эту часть ЭПЭ. Действие ПЭ они игнорировали, утверждая, что при радиусе образцов ~ 0,25 мм ПЭ не оказывает какого-либо действия на деформацию титана. Однако это не так. В наших опытах в 70-е годы прошлого столетия применялись датчики типа аксельрометры. Они и сейчас применяются, поскольку позволяют фиксировать вибрация в трёх направлениях, эффективны в работе при компьютерной обработке данных и надежны. Влияние ПЭ на пластическую деформацию металла было доказано нами экспериментально [9, 10]. ПЭ при электропластической деформации в условиях фиксированной плотности тока $J_m = 10^5$ А/мм^2 выражен тем ярче, чем больше радиус используемых образцов. На протяженных образцах большого диаметра указанной плотности тока практически достигнуть невозможно. Потребуется подключать к волочильным и прокатным станам электростанцию. Но на тонких образцах этого можно достигнуть. Например, на проволоках диаметром меньше 1 мм при волочении указанную плотности тока $J_m = 10^5$ А/мм^2 легко достигнуть. То же самое при прокатке тонких полос или листов.

Возникает также вопрос о сопутствующем нагреве металла током. Чтобы он был несущественным и допустимым в том или ином технологическом процессе требуется применять короткие по времени импульсы тока, длительностью не более 10^{-4} с, а так-

же интенсивное жидкостное охлаждение зоны деформации металла с током. За короткие времена деформируемый металл не будет успевать нагреваться. Возник ещё вопрос о скважности импульсного процесса, поскольку каждый участок заготовки должен быть обработан током.

Скважность, как известно, определяется отношением периода повторения импульсов T к длительности импульсов τ. Период T является обратной величиной частоты следования импульсов F. В применяемых в настоящее время технологических процессах прокатки и волочения с импульсным током в зоне деформации используются обычно частоты в сотни Гц (600–700 Гц). Если τ считать фиксированной величиной порядка 10^{-4} с, то для скважности получается значение $Q = \frac{T_n}{t_u} >> 1 = (6–7)\cdot 10^{-2} / 10^{-4} = 14–17$, т.е. относительно невысокие значения. При деформации кристаллов растяжением в жидком азоте и желании зафиксировать отдельные пики ЭПЭ применяют существенно большие значения скважности, а именно $Q = \frac{T_n}{t_u} >> 1$ численно от $2\cdot 10^2$ до 10^4. Пинч-эффект (ПЭ), как известно, квадратично зависит от силы тока (или от его плотности), поэтому не является полярным эффектом, как и джоулевый эффект. Но ПЭ ничего общего с тепловыми процессами не имеет. Он всегда возникает в проводнике, особенно если он круглого сечения, безразлично в статическом или в деформируемом состоянии. Под нагрузкой выше предела текучести, если ток I (или плотность тока J_m) имеют большую величину, ПЭ оказывает на пластическую деформацию стимулирующее действие, как действие ультразвука.

ПЭ пространственно обратен скин-эффекту (СЭ), возникающему, как известно, при больших частотах тока. ПЭ оттесняет линии тока от поверхности вглубь проводника, а СЭ наоборот выталкивает их на поверхность. Оба эффекта органически свойственны действию импульсного тока большой величины и нра его фронтах, как фактор частоты, но не е частоты посылок импульсов тока. ПЭ также квадратично зависит от радиуса r или диаметра образца а также,конечно. От амплитудной плотности тока J_m. На рис. 9 было приведено соотношение ПЭ (кривая 1) и ЭПЭ при действии «электронного ветра» (кривая 2) в зависимости от плотности тока J_m для кристаллов цинка диаметром 1 мм, длиной 16 мм. В наших опытах по электропластической деформации кристаллов цинка [7, 8] образцы имели радиус ~ 0,5 мм, что относится к малым размерам образцов. При пороговых значениях плотности тока 400–500 А/мм^2 на поверхности образцов механическое давление в радиальном направлении составляло $p = 0{,}9\cdot 10^4$ Па. Такие механические напряжения могли вызывать усиление пластической деформации кристаллов цинка, растягиваемых или сжимаемых с постоянной скоростью в испытательной машине Istron. Пинч-эффект тем больше, чем больше проводимость металла.

По величине ПЭ на первом месте стоит серебро, на втором медь, на третьем цинк, а на четвёртом сталь. По величине ЭПЭ на токе, т.е. действий «электронного ветра» тока и пинч-эффекта импульсов тока на первом месте, несомненно, стоят металлы и сплавы, обладающие высокой проводимостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий О.А., Лихтман В. И., Об анизотропии действия электронного и гамма-облучения на процесс деформации монокристаллов цинка в хрупком состоянии, ДАН СССР. – 1963. – Т. 148. – N° 2. – С. 332.

2. Лихтман В.И., Щукин Е.Д., Ребиндер П.А. Физико-химическая механика металлов, Изд-во “Наука” М.. – 1963.
3. Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Демин В.А. Внешние электронное и электростатическое воздействия на материалы» (Упрочнение и разупрочнение, изменение структуры и уменьшение хрупкости под влиянием облучения и полей), РИЦ МГИУ, Москва. – 2002. – 373 с.
4. Предводителев А.А., Троицкий О.А. Дислокации и точечные дефекты в гексагональных металлах, Атомиздат, Москва. – 1973. – С. 200.
5. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С. и Шляпин А.Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы, М.: МГИУ. – 2001. – 843 с.
6. Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Авраамов Ю.С. и Шляпин А.Д. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технологии, структура и свойства). Ижевск: РХД, АНО ИКИ. – 2004. – т. I. – 590 с. – т. II. – 467 с.
7. Троицкий О.А. Электромеханический эффект в металлах. Письма в ЖЭТФ. – 1969. – Т. 2. – N° 10. – С. 18–22.
8. Троицкий О.А., Розно А.Г., Электропластическая деформация в металлах. Физика твердого тела. – 1970. – Т. 12. – N°1. – С. 203–209.
9. Троицкий О.А. Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом, Известия АН СССР. – 1977. – Сер. N° 6. – С. 118–122.
10. Спицын В.И., Троицкий О.А. Моделирование теплового и пинч-эффекта импульсного тока на пластическую деформацию металла, Доклады АН СССР. – 1975. – N° 5. – С. 1070–1073.
11. Okazaki K., Kagava M., Conrad H. Electroplastic effect in metals, Scr. Met. – 1978. – 12. – 1063.
12. Okazaki K., Kagava M., Conrad H., Scr. Met. – 1979. – 13. – 277.
13. Okazaki K., Kagava M., Conrad H., Scr. Met. – 1979. – 13. – 473.
14. Батаронов И.Л., Рощупкин А.М. Электропластическая деформация металла и динамический пинч-эффект, Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1993. – N° 8. – С. 57–61.
15. Батаронов И.Л., Рощупкин А.М. К электронной теории динамического пинч- эффекта в металлах, Известия высших учебных заведений, Черная металлургия. – 1993. – N° 8. – С. 61–64.
16. Багаутдинов А.Я., Громов В.Г., Головин Ю.И., Троицкий О.А. и др. Структура и свойства перспективных металлических материалов. Томск: НТЛ. – 2007. – 575 с.
17. Zuev L.B., Gromov V.E., Gurevich L.I. The Effect of Electrie Current Pulses on the Dislocation Mobility in Zine Single Grystals //Phys. Stat. Sol(a). – 1990. – 121. – 437 p.
18. Зуев Л.Б., Громов В.Е., Курилова И.Ф. Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 239. – N°1. – С. 84–87.
19. Громов В.Е., Зуев Л.Б., Батаронов И.Л., Рощупкин А.М. Развитие представлений о подвижности дислокаций при токовом воздействии, ж. Физика твердого тела. – 1991. – т 33. – N° 10. – С. 3027–3032.
20. Molotskii M., Fleurov V. J Phys. Chem., B. – 2000. – 104. – 3812–3816.
21. Molotskii M. Philosophical Magazine. – 2003. – V 83. – N° 12. – 1421.
22. Roschupkin A.M., Bataronov I.L., Troitskii O.A., Moiseenko M.M. Electric current effect on metal surface layers // Phys. Stat. sol(b). – 1989. – Vol. 151. – N°1. – P. 121–126.
23. Рощупкин А.М., Батаронов И.Л. Физические основы электропластической деформации металлов, Известия высших учебных заведений. Физика. – 1996. – N° 3. – С. 57–65.
24. Троицкий О.А. Исследования электропластической деформации металлов, ж. Проблемы прочности. – 1976. – N°12. – с 36–40.
25. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука. – 1975. – С. 335.

26. Molotskii M., Fleurov V. Magnetic effect in electroplasticity og metals // Physical Review B. – 1995. – Vol. 52. – N°22. – P. 1582.
27. Троицкий О.А., Спицын В.И., Сташенко В.И. Влияние основных параметров тока на величину электронно-пластического эффекта, Доклады АН СССР. – 1981. – Т. 256. – С. 1134–1137.
28. Сташенко В.И., Троицкий О.А., Яновский Ю.Г., Ульянов Л.П. Оценка влияния электрического тока на подвижность дислокаций в кадмии, Известия АН СССР. Металлы. – 1981. – N°2. – С. 176–178.
29. Кравченко В.Я. Взаимодействие направленного потока электронов с движущимися дислокации, ж. Экспериментальная и теоретическая физики. – 1966. – Т. 51. – С. 1676–1681.
30. Фикс В.Д., ЖЭТФ, Увлечение и торможение подвижных дефектов в металлах электронами проводимости. Роль закона дисперсии электронов. – 1981. – Т. 80. – N° 4. – С. 1539–1542.

REFERENCES

1. About .And. Troitskii, Likhtman V.I. The anisotropy of the electron and gamma – irradiation on the deformation of single crystals of zinc in a fragile state, DAN SSSR. – 1963. – Vol. 148. – No. 2. – P. 332.
2. Likhtman V.I., Shchukin E.D. and Rebinder P.A. Physicochemical mechanics of metals, Izdvo “Nauka”, M. – 1963.
3. Troitsky Yu., Baranov V., Demin V.A. External electronic and electrostatic effects on materials" (the Hardening and softening, changes in the structure and umenshenie brittleness under the influence of irradiation and fields), RITS MGIU, Moscow. – 2002. – 373 p.
4. Predvoditelev A., Troitskii O.A. Dislocations and point defects in hexagonal metals, Atomizdat, Moscow. – 1973. – P. 200.
5. Baranov Yu. V., Troitsky O. A., Avramov Yu. S. and Shlyapin A.D. Physical bases of electropulse and electroplastic treatments and new materials, Moscow: MGIU. – 2001. – 843 p.
6. Troitsky O. A., Baranov Yu. V., Avraamov Yu. S. and Shlyapin A.D. Physical bases and technologies of processing of modern materials (theory, technologies, structure and properties). Izhevsk: RKHD, ANO IKI. – 2004. – T. I. – 590 p. – t. II. – 467 p.
7. Troitsky O. A., Electromechanical effect in metals, Letters in ZhETF. – 1969. – Vol. 2. – No. 10. – P. 18–22.
8. Troitsky O. A., Rozno A. G., Electroplastic deformation in metals, Solid state physics. – 1970. – Vol. 12. – No. 1. – P. 203–209.
9. Troitsky O. A. Plastic deformation of metal caused by the pinch effect, Izvestiya AN SSSR. – 1977. – No. 6. – P. 118–122.
10. Spitsyn V. I.,Troitskii O. A., Modeling of thermal and pinch effect of the pulse current on the plastic deformation of metals, Doklady an SSSR. – 1975. – No. 5. – PP. 1070–1073.
11. Okazaki K., Kagava M. , Conrad H., Electroplastic effect in metals, Scr. Met. – 1978. – 12. – 1063.
12. Okazaki K., Kagava M., Conrad H., Scr. Met. – 1979. – 13. – 277.
13. Okazaki K., Kagava M., Conrad H., Scr. Met. – 1979. – 13. – 473.
14. Bataronov I.L., Roshchupkin A.M. Electroplastic deformation of metal and dynamic pinch effect, Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Iron and steel. – 1993. – No. 8. – P. 57–61.
15. Bataronov I.L., Roshchupkin A.M. On the electronic theory of the dynamic pinch effect in metals, Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, Chernaya metallurgiya. – 1993. – No. 8. – PP. 61–64.
16. Bagautdinov A.Ya., Gromov V.G., Golovin Yu.I., Troitsky O.A., etc. Structure and properties of promising metal materials. Tomsk: NTL. – 2007. – 575 p.
17. Zuev L.B., Gromov V.E., Gurevich L.I. The Effect of Electrie Current Pulses on the Dislocation Mobility in Zine Single Grystals //Phys. Stat. Sol(a). – 1990. – 121. – 437.

18. Zuev L.B., Gromov V.E., Kurilov I.F. Dokl. – 1978. – Vol 239. – No.1. – P. 84–87.
19. Gromov V.E., Zuev L.B., Bataronov L.I., Roshchupkin A.M. The Development of ideas about the mobility of dislocations in the current impact, well. Physics of the solid state. – 1991. – T 33. – No. 10. – P. 3027–3032.
20. Molotskii M., Fleurov V. J Phys. Chem., B. – 2000. – 104. – 3812–3816.
21. Molotskii M. Philosophical Magazine. – 2003. – V 83. – N° 12 – 1421.
22. Roschupkin A.M., Bataronov I.L., Troitskii O.A., Moiseenko M.M. Electric current effect on metal surface layers // Phys. Stat. sol (b). – 1989. – Vol. 151. – No. 1. – P. 121–126.
23. Roshchupkin A.M., Bataronov I. L. Physical bases of electroplastic deformation of metals, Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Physics. – 1996. – No. 3. – P. 57–65.
24. Troitsky O. A. Studies of electroplastic deformation of metals, zh. Problems of strength. – 1976. – No. 12. – P. 36–40.
25. Spitsyn V.I., Troitsky O.A. Electroplastic deformation of metals. – M.: Nauka. – 1975. – P. 335.
26. Molotskii M., V. Fleurov Magnetic electroplasticity og effect in metals // Physical Review B. 1995. – Vol. 52. – No. 22. – P. 1582.
27. Troitsky O.A., Spitsyn, V.I., Stashenko V.I. The influence of the main parameters of the current value of the electron-plastic effect, Dokl. – 1981. – T. 256. – P. 1134–1137.
28. Stashenko V.I., Troitsky O.A., Yanovsky Yu.G., Ulyanov L.P. Evaluation of the influence of electric current on the mobility of dislocations in cadmium, Izvestiya AN SSSR. Metals. – 1981. – No. 2. – P. 176–178.
29. Kravchenko V.Ya. Interaction of a directed electron flow with moving dislocations, zh. Experimental and theoretical Physics. – 1966. – Vol. 51. – P. 1676–1681.
30. Fix V.D., JETF, Entrainment and inhibition of mobile defects in metals by conduction electrons. The role of the law of electron dispersion. – 1981. – Vol. 80. – No. 4. – PP. 1539–1542.

Статья поступила в редакцию 25.01.2021 г.

УДК 621.793.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

А.А. Хоршев, О.В. Стрельцова, А.С. Бондарь, Ф.В. Чмиленко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проведено сравнительное исследование двух нелинейных электротепловых моделей. Одна реализована в конечноэлементном пакете JMAG, другая в специализированной программе Universal 3D. За основу сравнения взяты экспериментальные данные индукционного нагрева тонкой пластины из ферромагнитной углеродистой стали до температуры ковки в индукторе овальной формы. Особое внимание уделено приближению нелинейных магнитных свойств стали при температурах ниже точки Кюри и влияние коррекции кривой B(H) на результат. Также в статье оцениваются скорость и точность моделирования.

Ключевые слова: индукционные нагрев, моделирование связанных полей, нелинейная электротепловая задача, овальный индуктор

INVESTIGATION OF 3D NONLINEAR ELECTROTHERMAL MODELS FOR INDUCTION HEATING PROBLEMS

A.A. Khorshev, O.V. Streltsova, A.S. Bondar, F.V. Chmilenko

Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI»,
St. Petersburg, Russian Federation

A comparative study of two nonlinear electric thermal models is carried out. One is implemented in the JMAG finite element package, the other in the specialized Universal 3D program. The comparison is based on experimental data of induction heating of a thin plate of ferromagnetic carbon steel to forging temperature in an oval-shaped inductor. Particular attention is paid to the approximation of nonlinear magnetic properties of steel at temperatures below the Curie point and the influence of the correction of the B (H) curve on the result. The article also evaluates the speed and accuracy of modeling.

Keywords: induction heating, coupled field simulation, nonlinear electrothermal problem, oval inductor

E-mail: aakhorshev@stud.eltech.ru

Введение

Разработка установок индукционного нагрева на современном уровне невозможна без широкого применения численного моделирования. На рынке представлено большое количество коммерческих пакетов общего назначения способных решать задачи индукционного нагрева. Как правило, они реализуют метод конечных элементов и обладают всеми преимуществами и недостатками, связанными с этим популярным методом. С другой стороны, для областей, где индукционный нагрев более востребован, разрабатывается специализированный софт, который пытается наиболее полно соответствовать запросам разработчиков индукционного оборудования.

В этой статье на основе эксперимента по нагреву тонкой ферромагнитной пластины в овальном индукторе, представлено сравнение результатов моделирования в специализированной программе Unversal 3D [1, 2] и в коммерческом пакете JMAG [3].

Выбор такой задачи для сравнения объясняется тем, что геометрия системы типична для индукционных нагревателей и достаточно проста для того, чтобы использовать программу Unversal 3D, ориентированную на индукционный нагрев тел плоской формы. Однако задача представляет ряд трудностей. Заготовка имеет нелинейные магнитные свойства, которые значительно меняются во время нагрева у точки Кюри. Кроме того прогрев детали по длине происходит неравномерно и большую часть эксперимента поверхность заготовки находится в промежуточном режиме (часть выше точки Кюри, а часть ниже).

Первоначально планировалось провести сравнение с коммерческим пакетом ANSYS [4]. К сожалению, данный пакет имеет ряд сложностей при моделировании 3D систем с нелинейной зависимостью B(H), совмещенной с изменением μ(T). Поэтому наш выбор пал на JMAG, реализующий много удобных функций, для моделирования устройств индукционного нагрева.

1. Описание модели

1.1. Данные для моделирования

Экспериментальные данные, которые использовались в этой работе, взяты из [5]. Геометрия системы «индуктор-заготовка» состоит из индуктора овальной формы с 13 витками и нагреваемой тонкой пластины из ферромагнитной углеродистой стали 45 [6]. Частота тока 8 кГц. Размеры нагреваемой пластины 62×22×300 мм. Индуктор состоит из трубки 10×10 мм. Размеры окна индуктора представлены на рис. 1. Эксперимент проводился в режиме тока I_{rms} = 500 А. Температура с помощью термопар фиксировалась в четырех точках. Их координаты в поперечном сечении по центру длины детали приведены на рис. 1.

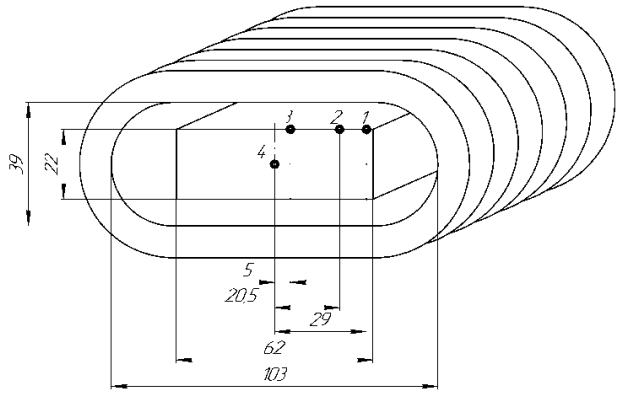


Рис. 1. Геометрические параметры модели

1.2. Подготовка модели в программе JMAG

Коммерческий пакет JMAG легко осваивается и удобен в работе. Он позволяет не только создавать геометрию в собственном редакторе, но и загружать готовые геометрические модели из программных пакетов САПР.

Для создания электротепловой модели были использованы необходимые нелинейные свойства для стали 45 (теплопроводность, теплоемкость, удельное сопротивление) и значение плотности при комнатной температуре [6]. Кривая B(H) для углеродистой стали взята из [7]. Для учета влияния температуры на магнитные свойства ниже температуры Кюри можно использовать уравнение [8]:

$$B_S(T) = B_{S_0}(1 - \frac{T^6}{T_C}),$$

где T_c – температура Кюри в Кельвинах, которое дает хорошие результаты для низколегированных сталей. Следует отметить, что JMAG позволяет аппроксимировать различные законы влияния температуры на магнитные свойства, так как позволяет задавать их в табличной форме.

Так как индукционная система симметрична относительно трех взаимно перпендикулярных плоскостей, имеет смысл моделировать только 1/8 системы.

Первоначально, была построена модель без геометрических упрощений (рис. 2). Такую модель можно назвать «тяжелой» (по причине того, что она требует большое количество вычислительных ресурсов). Это объясняется тем, что для устройств индукционного нагрева особое значение имеет глубина проникновения тока. Для данной модели существуют две разные глубины проникновения тока: одна в деталь, а другая в витки индуктора. Так как в этих областях происходит основное выделение источников тепла, то их необходимо разбивать на мелкую сетку из конечных элементов, что сказывается на времени вычислений. Поэтому была также построена «легкая» модель, где витки индуктора задавались полосами с толщиной, равной глубине проникновения тока в индуктор, а в них задавался равномерный по сечению ток (рис. 3).

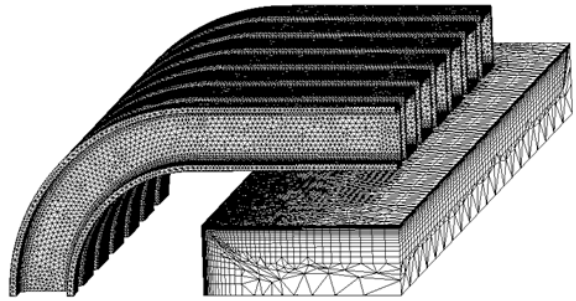


Рис. 2. «Тяжелая» модель

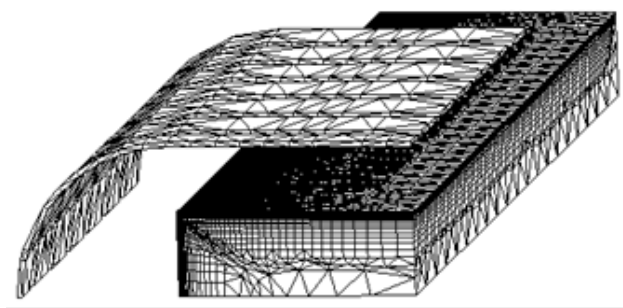


Рис. 3. «Легкая» модель

«Тяжелая» модель в работе использовалась для определения сопротивления витков индуктора, которое необходимо для «легкой» модели. Оно было усреднено из двух расчетов для холодного и горячего режимов. Первый рассчитывался для температуры детали равной 20 °C, а второй – для 900 °C. Разница с аналитическим расчетом оказалась около 36 %. Такое большое различие объясняется влиянием краевого эффекта индуктора, которое не учитывается при аналитическом расчете. Также «тяжелая» модель использовалась для оценки ошибки «легкой» модели при расчете интегральных параметров для начала и конца эксперимента.

Пакет JMAG позволяет связать геометрическую модель с электрическими цепями. Для моделирования нагрева в режиме тока была построена последовательная цепь с источниками и сопротивлениями, имитирующими сопротивление витков индуктора (получены из «тяжелой» модели). Сопротивления витков представлены в табл. 1, где R_7 — сопротивление полного среднего витка (в модели используется половина среднего витка).

Табл. 1

Активные сопротивления витков

i	1	2	3	4	5	6	7
$R_{i,}$ μΩ	137,2	107,9	109,5	120,0	147,0	116,2	117,0

Хотелось обратить внимание, что с точки зрения индукционного нагрева частота тока в эксперименте не оптимальна, а завышена. Следовательно, глубина проникновения тока в заготовке меньше оптимальной, что ведет к сильному сгущению сетки. Еще одна трудность по разбиению детали на элементы вызвана тем, что во время нагрева часть детали нагрета выше точки Кюри, а другая значительно ниже.

1.3. Подготовка модели в программе Universal 3D

Программа Universal 3D разработана для моделирования индукционного нагрева тел плоской формы и реализует комбинированный принцип построения электротермической модели, смысл которой заключается в разделении общей задачи на внешнюю электромагнитную и внутреннюю электротепловую. Внешняя электромагнитная задача включает расчет воздуха и индуктора методом интегральных уравнений. Внутренняя электротепловая задача включает внутреннюю электромагнитную и внутреннюю тепловую и решается с использованием методов конечных элементов и метода конечных разностей. Внешняя и внутренняя задачи связаны импедансными граничными условиями на поверхности детали. Такой подход делает программу экономичной с точки зрения вычислительных ресурсов. Настроить решение электротермической задачи, включая сетку детали, в Universal 3D проще и быстрее, чем в JMAG, так как многие настройки выполняются автоматически.

2. Результаты моделирования

Моделирование в Universal 3D и JMAG проводилось на одном компьютере, что также позволяет сравнивать скорость вычислений для двух программ. Здесь стоит отметить, что на скорость расчета влияет вид кривой *B(H)*. Особенно это критично для JMAG, поэтому кривую необходимо сгладить. Расчет в Universal 3D проводился за 1 час 20 минут на одном ядре процессора, расчет в JMAG для «легкой» модели проводился за 70 часов на 12 ядрах.

Для расчета нелинейных электромагнитных полей расчет по первой гармонике не является строго математически обоснованным, так как в нелинейной задаче поля

B и *H* не могут быть одновременно синусоидальными. Поэтому JMAG предлагает скорректировать кривую *B(H)* [9] с учетом синусоидальности поля *H* (синусоидальный ток). Чтобы сравнить влияние этой коррекции проводилось два расчета с корректировкой кривой *B(H)* и без корректировки.

В эксперименте кроме значения температур контролировалось напряжение на индукторе. Это важный параметр, который определяет согласование индуктора с источником питания. Изменение напряжения во время нагрева показано на рис. 4. Кривая, полученная JMAG с коррекцией *B(H)*, значительно лучше соответствует эксперименту, чем без нее. Поэтому этот расчет будем считать основным.

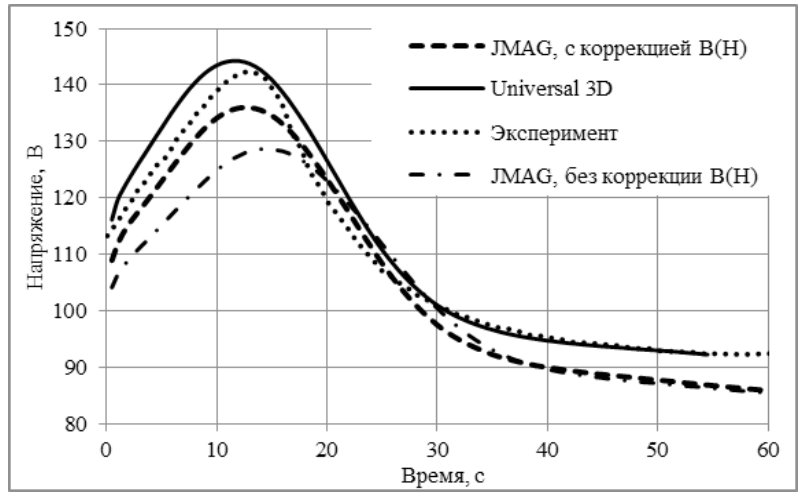


Рис. 4. Зависимость напряжения от времени. JMAG, Universal 3D и эксперимент

На рис. 5 представлено распределения температуры на поверхности заготовки в конце нагрева, полученное в JMAG.

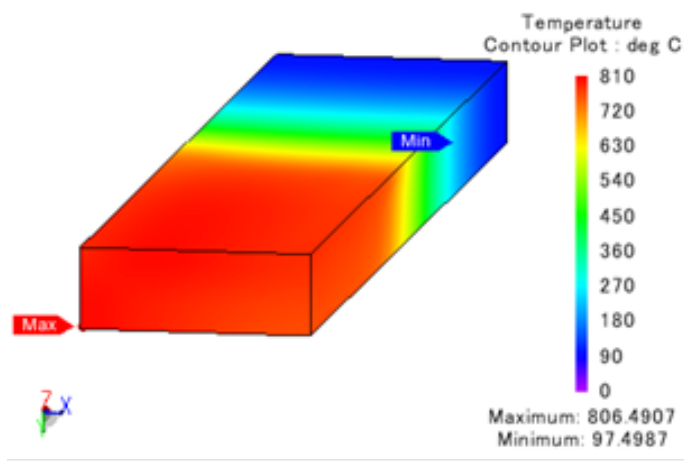


Рис. 5. Распределение температуры на поверхности заготовки

На рис. 6 изображены кривые температур в контрольных точках для двух расчётов: в JMAG и Universal 3D. Нагрев заготовки в Universal 3D происходит несколько быстрее, чем в JMAG, при этом в обеих моделях наблюдается длительный промежуточный режим, связанный с переходом через точку Кюри. На рис. 7 представлено сравнение экспериментальных графиков температуры с моделью в Universal 3D, на рис. 8 – с моделью в JMAG.

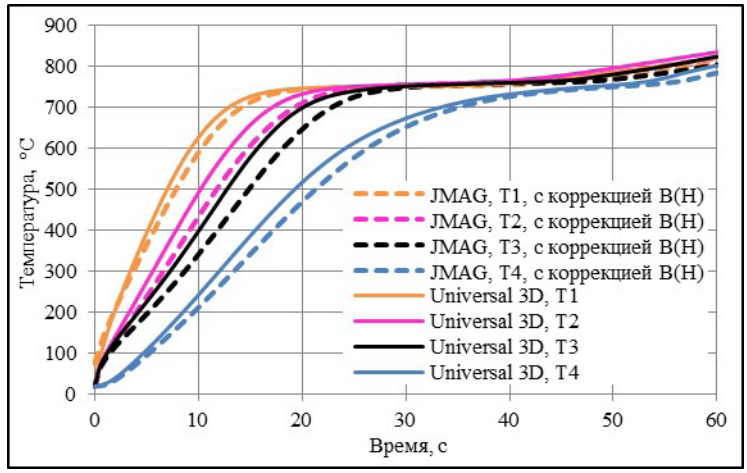


Рис. 6. Зависимость температуры от времени. JMAG и Universal 3D

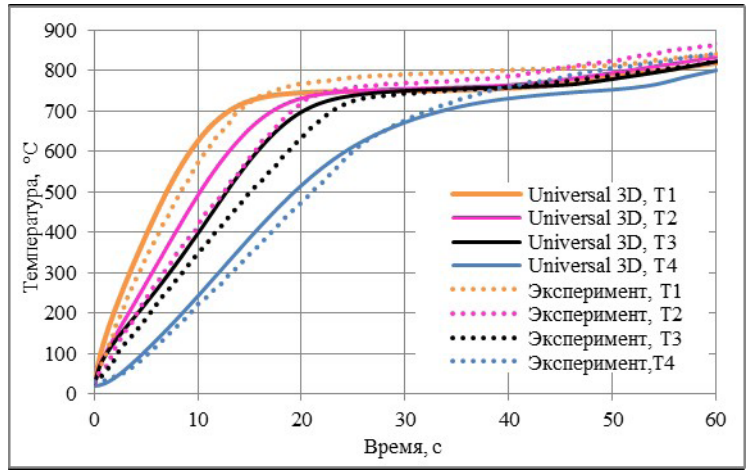


Рис. 7. Зависимость температуры от времени. Эксперимент и Universal 3D

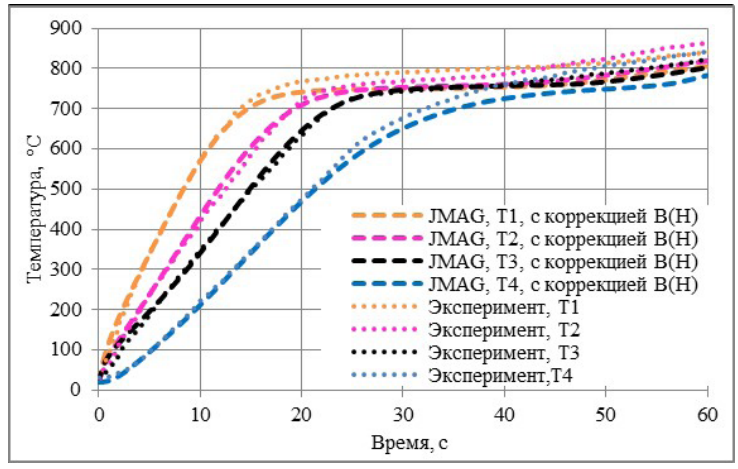


Рис. 8. Зависимость температуры от времени. JMAG и эксперимент

Из сравнения результатов, представленных на рис. 7 и 8 следует, что до точки Кюри температурные кривые, полученные в программе JMAG, совпадают с экспериментальными результатами. После температуры Кюри результаты Universal 3D и JMAG аналогичны, а значение температуры ниже эксперимента. Возможно, это объясняется

упрощенным расчетом потерь на излучение. В обеих программах использовалась простая модель излучения в пространство и не учитывалось переоблучение с индуктором.

Для самопроверки в работе оценивался баланс мощности между мощностью, выделяемой в элементах системы, и в цепи, подключенной к индуктору. Высокое значение невязки говорит о плохом построении сетки или неверно заданных граничных условиях. Изменение мощности системы от времени в JMAG и в Universal 3D представлено на рис. 9. На рис. 10 представлено изменение невязки мощности от времени.

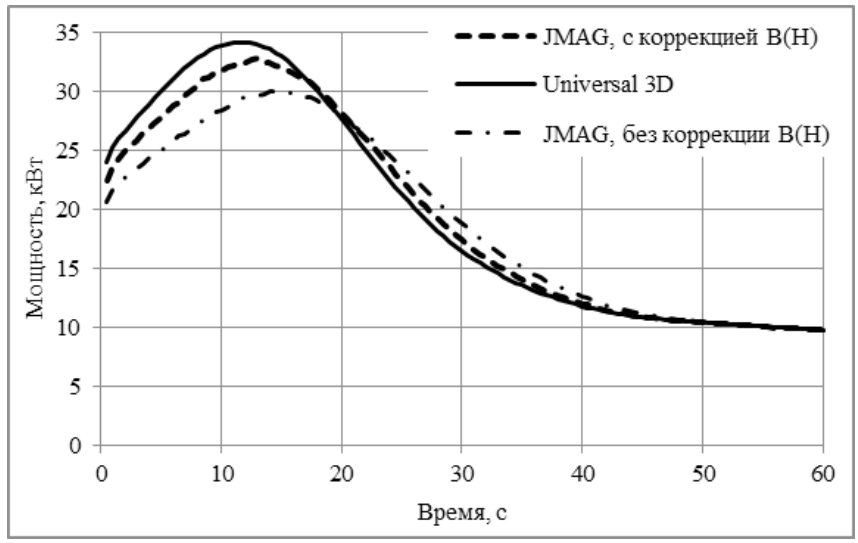


Рис. 9. Зависимость мощности системы от времени. JMAG и Universal 3D

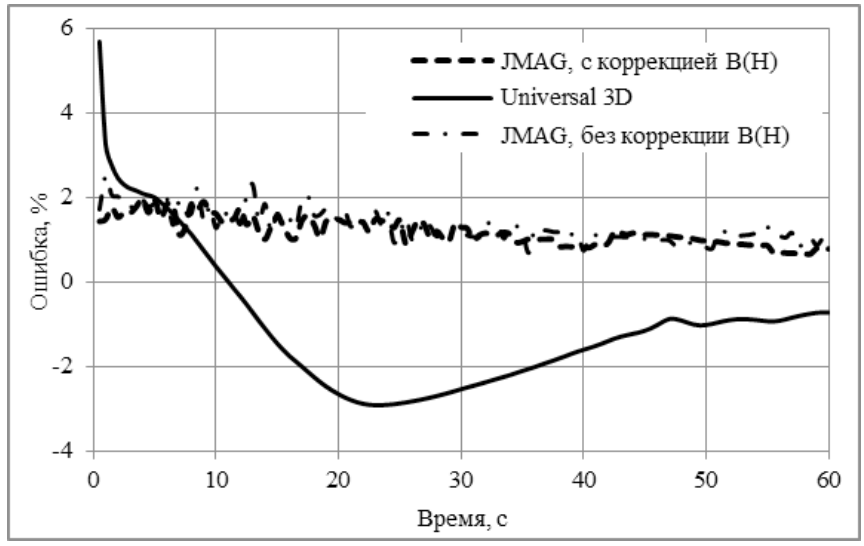


Рис. 10. Зависимость погрешности мощности от времени. JMAG и Universal 3D

При проектировании устройств индукционного нагрева уделяется особое внимание КПД, а также cos φ индукционной системы: его значение необходимо знать для согласования индуктора с генератором. На рис. 11 приведено изменение cos φ во времени, а на рис. 12 графики электрического КПД. Две кривые соответствуют расчетам в Universal 3D, в одном случае использовалось сопротивление индуктора, посчитанное аналитически, средствами Universal 3D, а во втором сопротивление каждого витка, рассчитанное в «тяжелой» модели в JMAG (табл. 1).

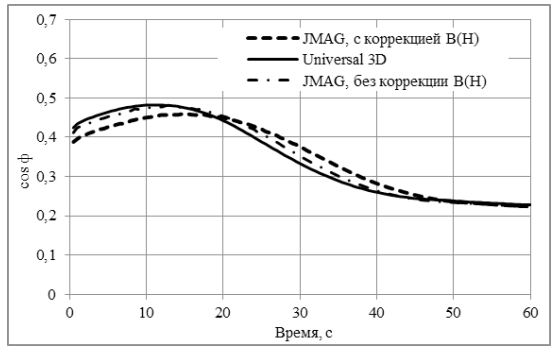


Рис. 11. Зависимость cos φ от времени. JMAG и Universal 3D

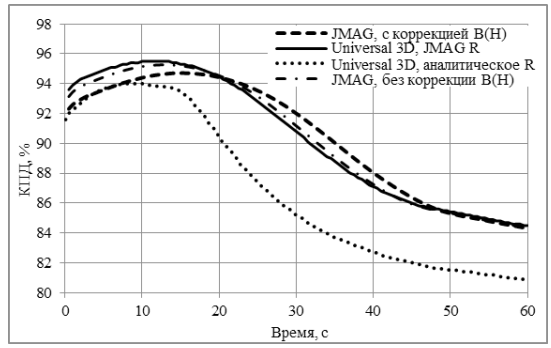


Рис. 12. Зависимость КПД от времени. JMAG и Universal 3D

Заметно, что значение КПД оказывается чуть ниже, чем при использовании сопротивлений, рассчитанных по «тяжёлой» модели в JMAG. Это наглядный пример совместного использования специализированного и универсального программных пакетов для достижения лучшего результата с точки зрения точности расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расхождение результатов моделирования с экспериментом объясняется неполной информацией о марке стали, из которой сделана нагреваемая заготовка, и пренебрежением взаимным облучением индуктора и заготовки. Результаты расчетов отличаются друг от друга из-за использования различных числительных методов.

Программа JMAG лучше подходит для расчета индукционных систем сложной формы. Однако яркий поверхностный эффект приводит к чрезмерному увеличению количества элементов сетки, что приводит к дилемме: приемлемое время расчета или точность результата. Чтобы добиться компромисса, имеет смысл проверять баланс мощности конечноэлементной задачи и внешних электрических цепей. При решении поставленной задачи мы посчитали приемлемой невязку мощности в районе 2 % от мощности, выделяемой в системе.

Universal 3D относится к узкоспециализированным программам. Она предназначена для простых форм индукторов и деталей. В ней реализована попытка совместить приемлемую точность с удобством использования и временем расчета. Ведь не секрет, что для проектирования и конструирования требуются десятки, а иногда и сотни расчетов.

Неправильно считать, что перед исследователем стоит выбор между описываемыми программными продуктами. В данном случае они идеально дополняют друг друга. К примеру, для более точного расчета сопротивление индуктора оценивалось в пакете JMAG, а программа Universal 3D позволила быстро выбрать оптимальный шаг

по времени. Кроме того, метод кросс проверки результатов дает возможность получить дополнительную уверенность при принятии решений во время проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Demidovich V.B., Chmilenko F.V., Andrushkevich V.V., Rastvorova I.I. 3D-simulation of electromagnetic and temperature fields in the continuous induction heaters. Coupled problems 2015 – proceedings of the 6th international conference on coupled problems in science and engineering. – 2015. – PP. 976–984.
2. Демидович В.Б. Численные методы в теории индукционного нагрева [Текст] / В.Б. Демидович, Ф.В. Чмиленко – СПб.: Технолит. – 2008. – С. 219.
3. JMAG. Доступно по адресу: https://www.jmag-international.com/ (дата обращения 10 ноября 2020 г.).
4. ANSYS. Доступно по адресу: https://www.ansys.com/ (дата обращения 10 ноября 2020 г.).
5. Демидович В.Б. Теория, исследование и разработка индукционных нагревателей для металлургической промышленности. Докт. дисс.Санкт-Петербург. – 2002. – 319 с.
6. Richter. Die Wichtigsten Physikalishen Eigenschaften von 52 Eisen-werkstoffen. Verlag Stahleisen GmbH, Dusseldorf. – 1973.
7. Taylor Lyman. Metals Handbook, 8th edition, Volume 1, American Society for Metals. – 1966. – 1236 p.
8. JMatPro. Доступно по адресу: http://jmatpro.ru/ (дата обращения 10 ноября 2020 г.).
9. Demerdash N.A. and Gillott D.H. A New Approach for Determination of Eddy Currents and Flux Penetration in Nonlinear Ferromagnetic Materials. IEEE Trans. on Magnetics. – 1974. – Vol. 10. – PP. 682–685.

REFERENCES

1. Demidovich V.B., Chmilenko F.V., Andrushkevich V.V., Rastvorova I.I. 3D-simulation of electromagnetic and temperature fields in the continuous induction heaters. Coupled problems 2015 – proceedings of the 6th international conference on coupled problems in science and engineering. – 2015. – PP. 976–984.
2. Demidovich V.B. Numerical methods in the theory of induction heating [Text] / V.B. Demidovich, F.V. Chmilenko - SPb .: Technolit. – 2008. – P. 219. (in Russian)
3. JMAG. Available at: https://www.jmag-international.com/ (accessed 10 November 2020).
4. ANSYS. Avalible at: https://www.ansys.com/ (accessed 10 November 2020).
5. Demidovich V.B. Teoriya, issledovanie i razrabotka induktsionnykh nagrevateley dlya metallurgicheskoy promyshlennosti. Dokt, Diss. [Theory, research and development of induction heaters for the metallurgical industry. Doct. Diss.].Saint-Petersburg. – 2002. – 319 p. (in Russian)
6. Richter. Die Wichtigsten Physikalishen Eigenschaften von 52 Eisen-werkstoffen. Verlag Stahleisen GmbH, Dusseldorf. – 1973.
7. Taylor Lyman. Metals Handbook, 8th edition, Volume 1, American Society for Metals, – 1966. – 1236 p.
8. JMatPro. Available at: http://jmatpro.ru/ (accessed 10 November 2020).
9. Demerdash N.A. and Gillott D.H. A New Approach for Determination of Eddy Currents and Flux Penetration in Nonlinear Ferromagnetic Materials. IEEE Trans. on Magnetics. – 1974. – Vol. 10. – PP. 682–685.

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 22.01.2021 г.

УДК 621.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РАСПЛАВОВ ПРИПОЕВ ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКЕ

П.Ю. Цыкунов, А.М. Кузей, В.Я. Лебедев, А.И. Маталыго

Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

С использованием программ численного моделирования представлены режимы нагрева под пайку режущего инструмента с различном взаимном расположением индуктора и детали. Представлены согбенности нагрева инструмента при полуавтоматическом и автоматизированном производстве с локальной и общей концентрацией зон тепловыделения. Установлено, что локальный нагрев требует дополнительного контроля температуры и прерывистого режима нагрева в связи с повышенным температурным перепадом в зоне шва, что может приводить к разупрочнению твердого сплава. Методами оптической, сканирующей микроскопии изучены процессы формирования расплавов и микроструктуры припоев при пайке режущего инструмента, оснащенного пластинами твердых сплавов ВК-15, ВК-8. Показано, что введение никеля, железа в порошки припоев марок Л62, ПП-63, ЛНМц – 68-4-02 позволяет в процессе пайки формировать припои с повышенной концентрацией легирующих элементов при температуре пайки 1176–1200 К. Установлено, что процесс формирования припоев протекает через ряд стадий, одной из которых является образование неоднородного по составу расплава; жидкометаллической эмульсии и жидкометаллической суспензии. Следствием этого является изменение микроструктуры припоев и повышение прочности паяного шва.

Ключевые слова: перемешивание жидких металлов, кристаллизация, индукционный нагрев, индукционная пайка

RESEARCH OF CRYSTALLIZATION PROCESSES AND SOLDER MELT WITH INDUCTION SOLDERING

P.Y. Tsykunov, A.M. Kuzey, V.Y. Lebedev, A.I. Matalygo

The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

With the use of numerical simulation programs, heating modes for soldering a cutting tool with different relative positions of the inductor and the part are presented. The flexibilities of

heating the tool in semi-automatic and automated production with local and total concentration of heat generation zones are presented. It was found that local heating requires additional temperature control and intermittent heating due to an increased temperature drop in the weld zone, which can lead to softening of the hard alloy. The processes of formation of melts and microstructure of solders during brazing of cutting tools equipped with plates of hard alloys VK-15, VK-8 have been studied by methods of optical scanning microscopy. It is shown that the introduction of nickel and iron into the powders of L62, PP-63, LNMts - 68-4-02 grades allows the formation of solders with an increased concentration of alloying elements at a soldering temperature of 1176–1200 K during the soldering process. It has been established that the process of formation of solders proceeds through a number of stages, one of which is the formation of a melt of heterogeneous composition; liquid metal emulsion and liquid metal suspension. The consequence of this is a change in the microstructure of the solders and an increase in the strength of the brazed joint.

Keywords: mixing of liquid metals, crystallization, induction heating, induction brazing

E-mail: zamaranthz@mail.ru

Введение

Применение индукционного нагрева при пайке различного материалов в первую очередь требует разумного подхода к выбору энергетических режимов частотного преобразователя, а также взаимного расположения индуктора и паяемых изделий. Оптимизация технологии позволяет в значительной мере повысить скорость и качество, а применение новых многокомпонентных припоев – прочностные характеристики паяных соединений.

На начальном этапе разработки технологического процесса в первую очередь уделяют внимание результаты моделирования. Так, большинство паяемых изделий можно отнести к изделиям сложной формы, в частности – инструмент для обработки металла резанием. Большое количество острых граней из-за краевого эффекта приводит к неравномерному нагреву, что особенно проявляется при пайке изделий, относящихся к термически массивным телам. Особенно это проявляется при индукционном нагреве из-за скин-эффекта [1]. Зоны тепловыделения будут концентрироваться на условно ближайших краях инструмента, что приведет к сильному перепаду температур. В результате припой может частично не перейти в жидкую фазу с известями последствиями. Также неравномерность температурных полей может привести к перегреву, а, следовательно, и разрушению твердого сплава.

Для решения подобных задач обычно оперируют следующими параметрами:

1. Частотой электромагнитного поля и мощностью источника поля. Здесь работает эффект массивности тела, когда для нагрева малых деталей используют повышенную частоту (вплоть до 50 кГц), а для крупных – средние и низкие частоты (на уровне 20 кГц и ниже).

2. Взаимным расположением нагреваемой детали и индуктора [2]. В этом случае оптимизация положения позволяет снизить продолжительность нагрева и сконцентрировать зоны тепловыделения в требуемой части детали, что уменьшить ее объемный перегрев и снизит возможный эффект самоотпуска. Также концентрация нагрева позволит защитить твердый сплав от перегрева.

Следующим способом оптимизации процессов индукционной пайки и повышение эффективности металлообрабатывающего инструмента обеспечивается как применением более совершенного оборудования, так и использованием новых марок инструментальных материалов – пластин из твердых сплавов, сверхтвердых материалов.

Ужесточение режимов резания, применение новых инструментальных материалов сделало необходимым повысить прочность и надежность неразъемных соединений инструментальный материал – корпус. Несмотря на расширение применения инструмента с механическим закреплением пластин инструментальных материалов к корпусу, пайка является эффективным и распространенным способом изготовления инструмента. Основными проблемами при получении неразъемных соединений из разнородных материалов пайкой являются: низкие физико-химические характеристики припоев, обусловленные их составом, дефектами микроструктуры паяного шва, и взаимодействием расплава с соединяемыми материалами. Повышение физико-механических характеристик припоев и обеспечение равномерной прочности паяных соединений может быть достигнуто как изменением состава припоев, увеличением концентрации легирующих элементов в базовых сплавах, так и снижением температуры и длительности процесса пайки. Увеличение концентрации (и числа) легирующих элементов в базовой системе (например, Cu–Zn) приводит к повышению температуры пайки и интенсифицирует процессы контактного взаимодействия на границе раздела расплав – твердая фаза, что снижает прочность соединения. Увеличение концентрации легирующего элемента в припое может быть достигнуто не только при его получении, металлургическим методом, но и введением легирующего элемента в форме порошка в шихту из легкоплавкого компонента (базового сплава) и флюса. Образование припоя будет протекать в процессе пайки при контактном взаимодействии в системе легкоплавкий базовый сплав – легирующий элемент – флюс.

Постановка задачи и методы исследований

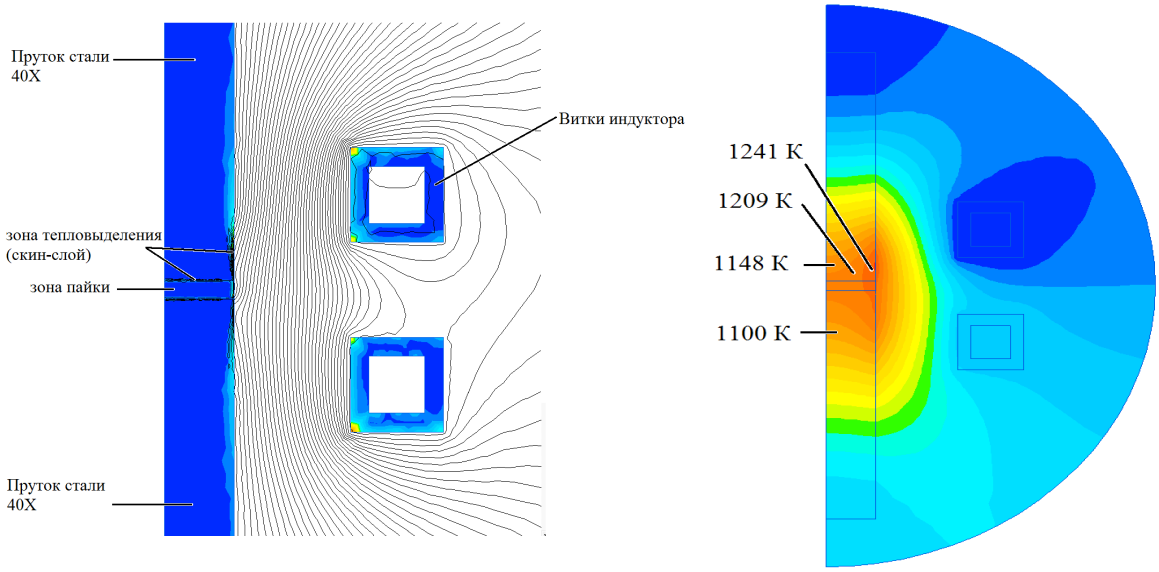
Моделирование электромагнитных и тепловых полей при заданных параметрах нагрева проводили с использованием программного комплекса Elcut. В результате были получены картина зоны тепловыделения в образце и картина магнитных силовых линий, а также температурные поля при различных режимах нагрева.

Нагрев образцов осуществлялся на установке ФТИ 3.148 укомплектованной преобразователем частоты мощностью 120 кВт и рабочей частотой 30–80 кГц. Для нагрева использовался двухвитковой индуктор внутренним диаметром 60 мм и рамочный одновитковой индуктор 70×180 мм. Образцы фиксировались керамическим цилиндром и дополнительно поджимались грузом массой 120 г. Для фиксации пластин твердого сплава с целью предотвращения их смещения в процессе нагрева применялись керамические распорки горизонтальной поддержки без нагрузки по вертикали.

Морфология поверхностей разрушения исследовалась на растровом сканирующем микроскопе SEM-515 с приставкой для микроанализа. Микроструктура припоя исследовалась на металлографическом комплексе Autoscan. Температуру пайки определяли при помощи пирометра OptrisCT 1M/2M. Одновременно фиксировалось начало испарения флюса и начало растекания припоя по боковой поверхности образца. В качестве припоев использовали смеси из порошков никеля, железа и припоев марок Л62, ПП-63 и ЛНМц–68-4-02. Концентрация порошка никеля в шихте на основе припоя Л 62 составляла 5,20 мас.%, а на основе припоя ПП-63–5 мас.%. В первой серии экспериментов исследовали процессы контактного взаимодействия компонентов припоя при пайке. Стержни из стали марки 40Х диаметром 10 мм и долиной 40 мм устанавливали в индуктор и нагревали со скоростью 35,45 К/с до температуры пайки и выдерживали 1–5 секунд. Затем соединение разрушали на разрывной машине Time WDW-100E и исследовали микроструктуру припоев в зависимости от режимов пайки и состава припоев. Температура пайки составляла 1225 К.

Результаты и обсуждение

Первоначальной задачей моделирования является выбор оптимальных режимов нагрева, обеспечивающих равномерный перепад температур по сечению нагреваемых образцов. Использование высокочастотного генератора обусловлено достаточно малыми размерами образцов и паяемого инструмента. В этом случае с учетом возможных габаритов шин генератора и количества витков индуктора, ориентировочная частота для моделирования применялась в диапазоне 44–48 кГц. В первую очередь исследовалось распределение зоны тепловыделения. Так при нагреве двух цилиндрических образцов с прослойкой припоя между ними отмечается распространение поверхностного эффекта в том числе в зоне пайки (рис. 1 а). В случае нагрева термически малых тел, тепловыделение в этой зоне не играет существенной роли, т.к. количество выделяемого тепла сравнительно мало. Использование многовиткового индуктора приводит к смещению наиболее интенсивной зоны тепловыделения в области под витком. В то же время угловой эффект нагрева все же проявляется в достаточной мере (рис. 2 б).



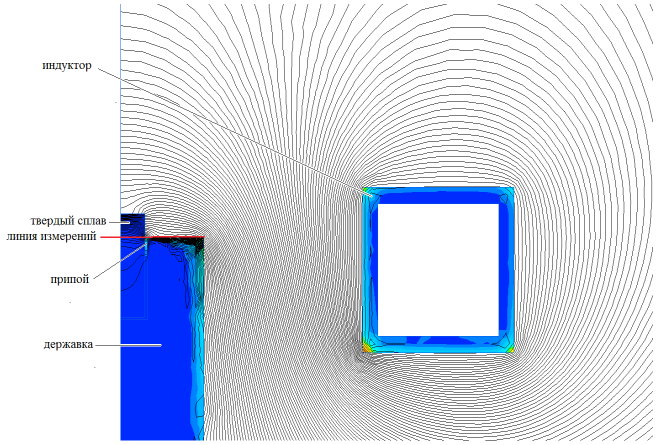
а б

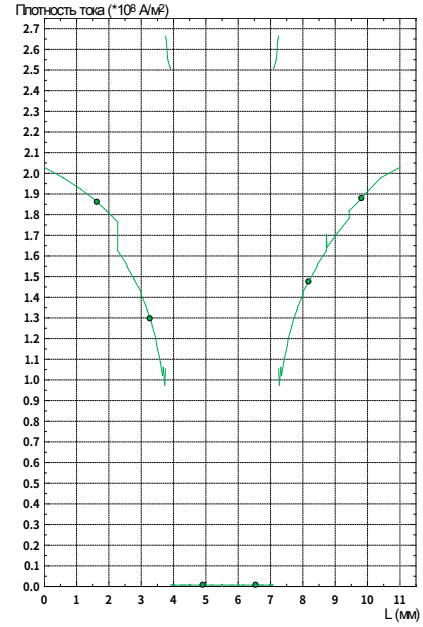
Рис. 1. Распределение электромагнитных и тепловых полей при нагреве экспериментальных образцов стали 40Х диаметром 10 мм при частоте 50 кГц и силе тока 800 А (что примерно соответствует 13 % мощности генератора в 120 кВт)

Из рис. 1 видно, что при заданных параметрах при продолжительности нагрева в 14 с, достигается температурный перепад в 60 К, что слишком много для столь малого образца. Исходя их этого при проведении реальных испытаний для обеспечения полного расплавления припоя потребуется дополнительная выдержка на пониженной мощности с поддержанием температуры. При этом повышение продолжительности нагрева может негативно сказаться на качестве шва. При полученной скорости нагрева ≈ 85 К/с одна лишняя секунда нагрева может привести к пережегу, что негативно сажется на прочности соединения.

Нагрев непостредственно инструмента, например, сверел диаметром до 15 мм не требует двухвиткового индуктора. При достаточной мощности и скорости до 85 К/с на пайку одного образца потребуется не более 12 с. При этом следует учитывать форму державки и размер твердого сплава. В отличие от экспериментальных образцов, при пайке

сверел наблюдается повышение тепловыделения на горизонтальной поверхности, где размещается твердый сплав (рис. 2 а). Однако плотность тока по мере приближения к геометрическому центру снижается (рис. 2 б). Также требуется учитывать, что наличие острых граней, формируемых пазами для отведения стружки, накладывает значительные ограничения на интенсивность нагрева. Поэтому рекомендуется снижать скорости нагрева подобного инструмента соразмерно увеличению диаметра сверла для компенсации углового эффекта.



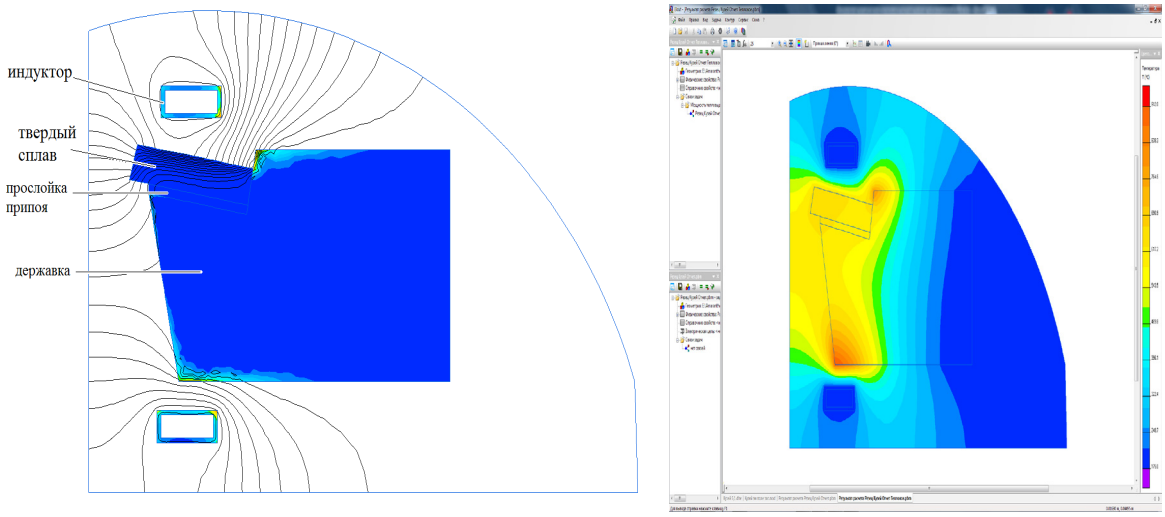


а б

Рис. 2. Распределение электромагнитного поля и зон тепловыделения при нагреве под пайку сверла диаметром 11 мм, и скоростью нагрева 85 К/с

При нагреве резцов в прямоугольном индукторе следует уделять внимание форме и расположению индуктора относительно паяемого изделия. В первую очередь это связано с тем же угловым эффектом. При достаточно малом воздушном зазоре между державкой и индуктором возможен локальный перегрев. Из-за этого распределение тепла в державке будет направлено не в требуемую зону, а вглубь крепежного конца. Что не желательно по причине техники безопасности и энергоемкости процесса [3]. Требуется также учитывать тот факт, что подобные резцы паяются группами по несколько штук в одном индукторе. Взаимное расположение индуктора и зоны пайки накладывает определенные ограничения на продолжительность нагрева. В первую очередь это касается возможности перегрева твердого сплава с его последующим разупрочнением.

Наиболее распространенный вариант нагрева предполагает ровный прямоугольный индуктор, охватывающий не только локальную зону пайки, но и часть державки под ней. Такой нагрев будет наиболее плавным и наиболее длительным (рис. 3). Главной особенностью такого расположения индуктора и резца является более равномерное температурное поле по сечению державки (рис. 3 б). По своей сути это полноценный нагрев внутренним полем индуктора. Такой нагрев подразумевает невысокую концентрацию тепловыделения в зоне пайки, что обеспечивает более равномерную температуру, в том числе и в твердом сплаве.



а б

Рис. 3. Электромагнитное и температурное поля при нагреве отрезного резца при вертикальном расположении индуктора. Интенсивность нагрева 60 К/с

Применение «местного» нагрева позволяет снизить продолжительность нагрева примерно на 5–0 %. Ускорение процесса обработки (пайки) в этом случае в большей степени оправдывает себя при полной автоматизации процесса. Здесь также требуется расширенный контроль температуры для предотвращения большого температурного перепада и перегрева. Индуктор расположен таким образом, чтобы поле в большей степени охватывало саму зону пайки, а тепловыделение под витками было как можно ближе друг к другу (рис. 4 а). Основным преимуществом такого расположения индуктора является локализация нагрева, что приводит к сниженью продолжительности пайки и перегреву объема остальной державки. Недостатком такого подхода является повышенный температурный перепад в зоне расположения твердого сплава (рис. 4 б), что может приводить к разрушению последнего. Для компенсации этого эффекта и требуется дополнительный контроль температуры и переход к прерывистому режиму нагрева с дополнительной паузой для обеспечения выравнивания температур [4].

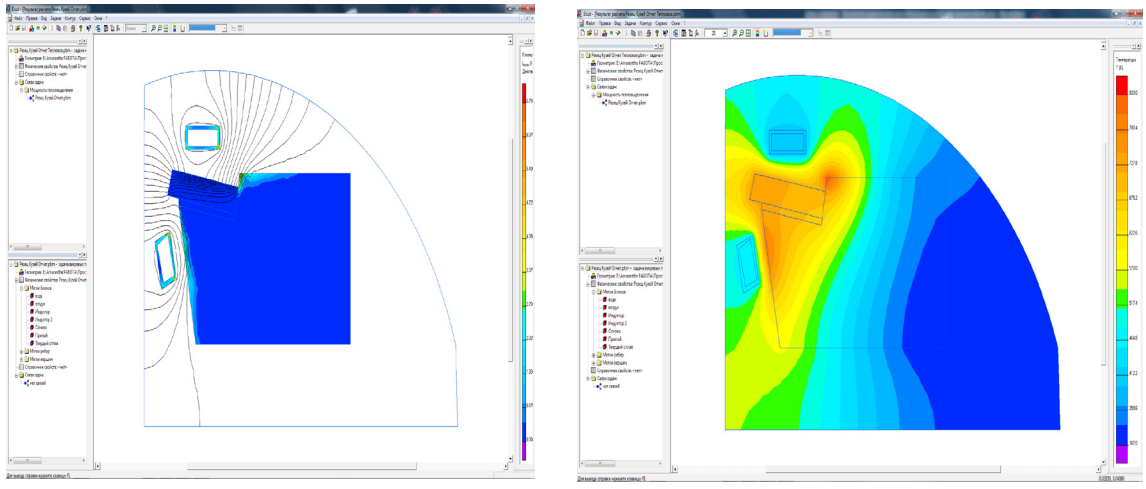


Рис. 4. Электромагнитное и температурное поля при нагреве отрезного резца при «местном» расположении индуктора. Интенсивность нагрева 60 К/с

Микроструктура припоев, формирующихся в паяных швах из шихты припой марки Л62–20 мас.% Ni, определяется длительностью выдержки при температуре пайки и скоростью нагрева стержней в зоне соединения (рис. 5).

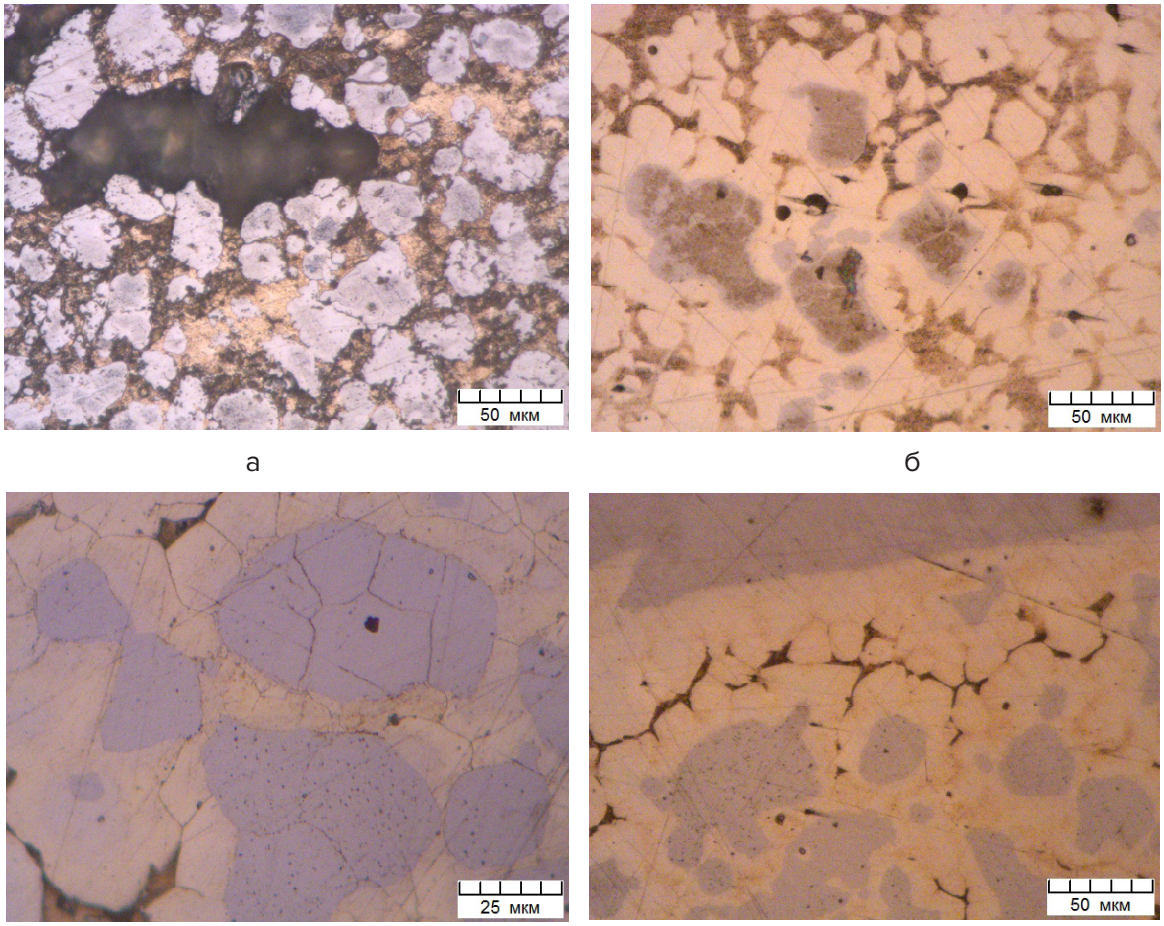


Рис. 5. Микроструктура припоев Л62–20 мас.% Ni. Скорость нагрева:
а, б, в – 45 К/с, г – 35 К/с. Температура пайки 1225 К.
Длительность нагрева: а – 21 с; б, г – 23 с; в – 25 с

После секундной выдержки шихты из припоя Л62–20 мас.% Ni при температуре пайки, микроструктура образовавшегося сплава представляет собой частицы никелевого сплава, разделенные прослойками сплава медь–цинк–никель с меньшей концентрацией никеля, чем в частицах. В структуре сплава присутствуют включения частиц флюса. Частицы никелевого сплава имеют неоднородную структуру: центральная часть имеет иной состав, чем периферия (рис. 5 а). Увеличение длительности выдержки (3 с) шихты при температуре пайки сопровождается гомогенизацией структуры образовавшегося сплава, однако в зернах присутствуют области иного состава, чем на их периферии (рис. 5 б). После 5 секундной выдержки шихты формируется сплав, структура которого представляет собой зерна размерами 20–60 мкм, разделенные прослойками эвтектики. В зернах присутствуют области с иным составом, чем окружающий их сплав. Между этими областями отсутствует четко выраженные границы (рис. 5 в). Снижение скорости нагрева зоны пайки не приводит к формированию гомогенной структуры припоя даже после 5 секундной выдержки (рис. 5 г).

Микроструктура припоев, формирующихся в паяных швах при плавлении шихты (ПП-63)–5 мас.% Ni и (ЛНМц–68-4-02)–5 мас.% Ni в интервале времен выдержки при температуре пайки 1225 К также неоднородна (рис. 6).

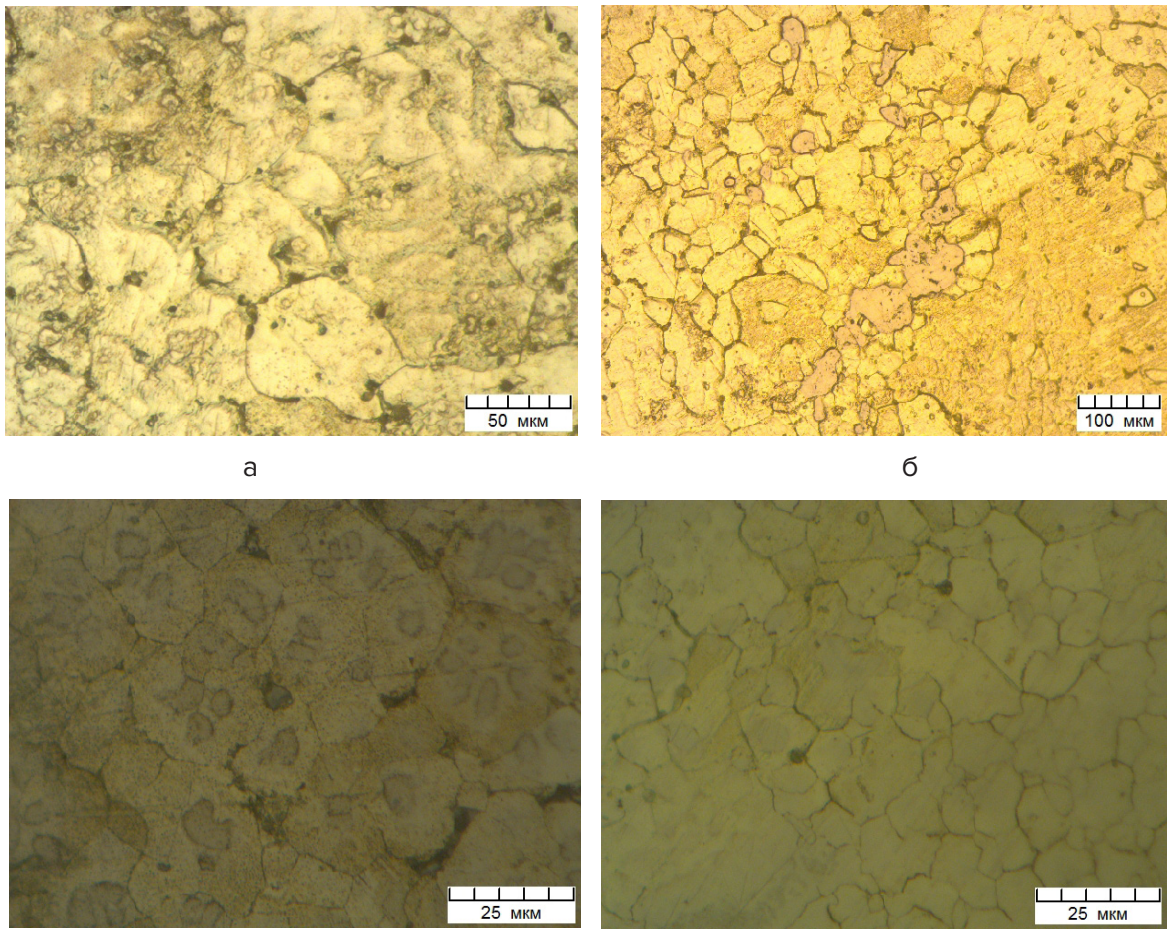


Рис. 6. Микроструктура припоев (ПП-63)–5 мас.% Ni (а, б)
и (ЛНМц–68-4-02)–5 мас.% Ni (в, г).
Скорость нагрева до температуры пайки а, б, в – 45 К/с; г – 35 К/с.
Длительность выдержки: а – 1 с; б – 3 с; в, г – 5 с

После секундной выдержки шихты припоя (ПП-63)–5 мас.% Ni при температуре пайки, образующийся сплав имеет зеренную структуру со слабо выраженными прослойками эвтектики между отдельными зернами (рис. 6 а).

В зернах присутствуют области иного состава, чем области на периферии зерен. Увеличение длительности выдержки шихты (до 3 секунд) не приводит к гомогенизации структуры зерен: в них также как при секундной выдержке шихты присутствуют области иного состава, чем остальная часть зерна (рис. 6 б). Области неоднородного состава в зернах отмечаются и в структуре сплавов, полученных при нагревах шихты (ЛНМц–68-4-02)–5 мас.% Ni (рис. 6 в, г). Эти области расположены как в зернах, так и между зернами (рис. 6 г). Подобные области иного состава присутствуют в зернах сплавов, образующихся при выдержках шихты припоев (ПП-63)–10 мас.% Fe и (ЛНМц-68-4-02)–10 мас.% Fe (рис. 7).

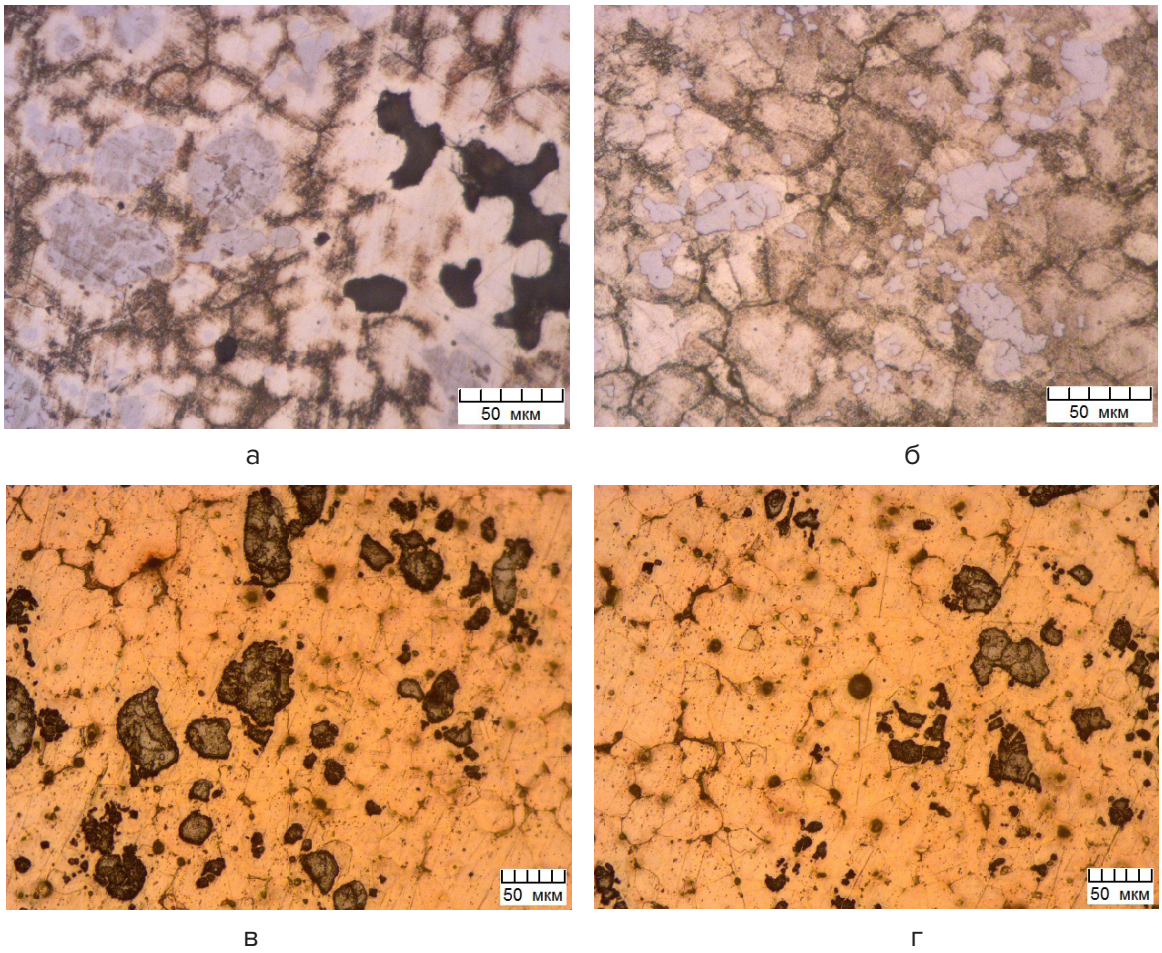


Рис. 7. Микроструктура припоев (ПП-63)–10 мас.% Fe (а, б)
и (ЛНМц-68-4-02)–10 мас.% Fe (в, г). Скорость нагрева: а, б, в – 45 К/с; г – 35 К/с.
Длительность выдержки: а – 1 с; б, г – 3 с; в – 5 с

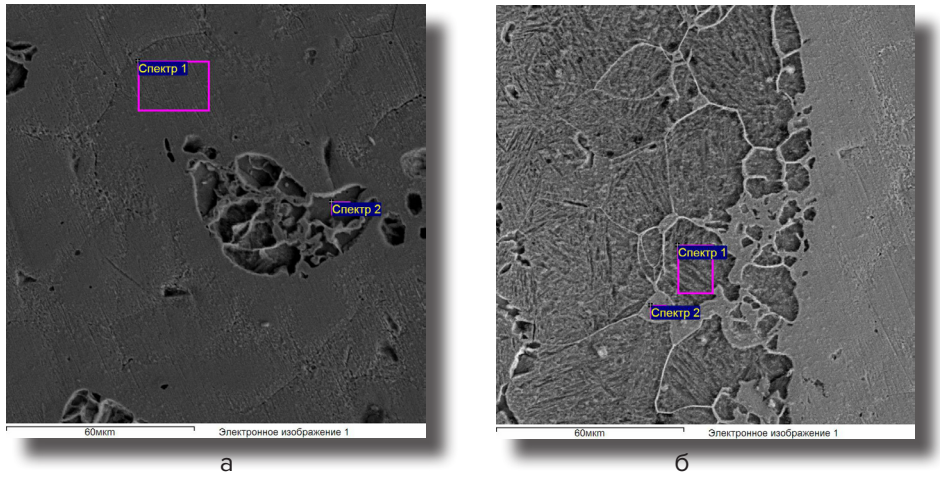
Микроструктура припоев, образовавшихся при плавлении шихты припоев (ПП-63)–10 мас.% Fe в интервале времени выдержки 1–3 секунды представляет собой совокупность зерен размерами 5–50 мкм со слабо-выраженными межзеренными границами (рис. 7 а, б, г). Увеличение длительности выдержки до 5 секунд (или снижение скорости нагрева стержня до 35 к/с) изменяет микроструктуру припоя в шве (рис. 7 в, г). Микроструктура припоев представляет собой матрицу из зерен сплава медь – цинк – железо (или медь – цинк – железо – марганец (рис. 7 в, г), в которой расположены частицы железа либо сплава на его основе (рис. 8 а, б; табл. 1, 2). Прослойки эвтектики между зернами присутствуют на отдельных участках межзеренных границ (рис. 7 в, г).

Частицы железа присутствующие в припое имеют явные признаки растворения в медно-цинковом расплаве (рис. 7, 8; табл. 1, 2). Однако, по данным энергодисперсионного анализа меди и цинка в частицах не обнаружено (табл. 1). Последнее обстоятельство обусловлено методикой приготовления образца. Контактное взаимодействие частиц железа с медно-цинковым расплавом протекает как растворение частицы и диффузия меди, цинка в частицы железа и сталь (рис. 7, 8; табл. 1, 2). Одновременно имеет место и взаимодействие частиц железа с поверхностью стали в паяном шве (рис. 5).

Табл. 1

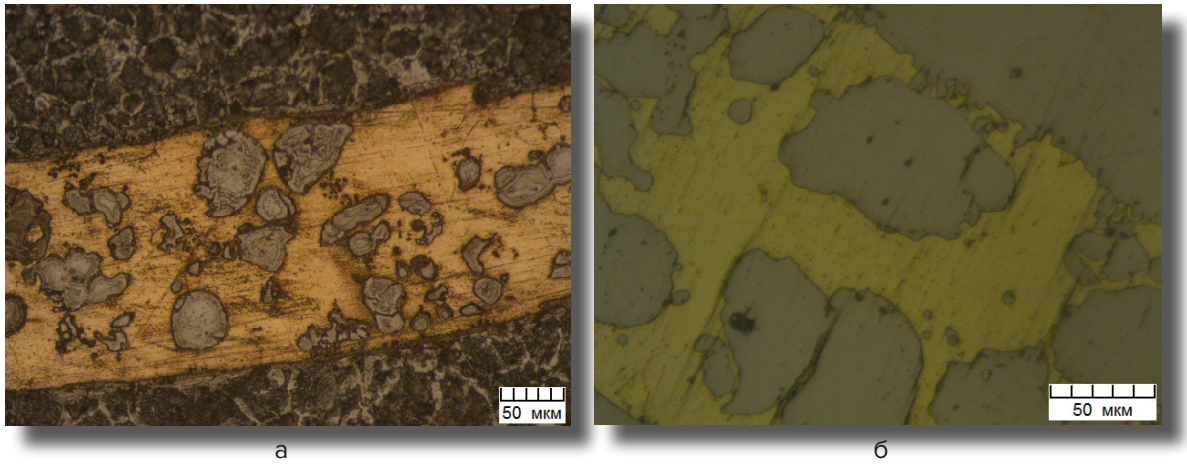
Элементарный состав участка припоя (ЛНМц-68-4-02)–10 мас.% Fe. Скорость нагрева 35 К/с. Длительность выдержки 3 с

Элемент	O	Fe	Ni	Cu	Zn	Итого
C_1, мас. %	4,93	2,42	9,21	51,25	32,19	100,00
C_1, мас. %		100,00				100,00



а б

Рис. 8. Микроструктура границы раздела сталь – припой в шве (а) и микроструктура участка шва (б)



а б

Рис. 9. Микроструктура паяного шва: а – припой (ПП-63)–10 мас.% Fe, длительность выдержки 3 с. б – припой (ЛНМц-68-4-02)–10 мас.% Fe, длительность выдержки 5 с

Табл. 2

Элементный состав участка границы раздела сталь – припой в шве

Элемент	Fe	Ni	Cu	Zn	Итого
C_1, мас. %	97,19	0,00	2,81	0,00	100,00
C_1, мас. %	12,80	11,28	48,58	27,34	100,00

Характер изменения микроструктуры припоев, формирующихся в паяном шве при плавлении шихты Л62–15 мас. % Ni показывает, что процесс образования сплава медь – цинк – никель начинается уже при образовании жидкой фазы (1150–1175 К). После секундной выдержки при 1225 К вокруг частиц никеля образуется оболочка медь – цинк – никелевого сплава (рис. 5 а). Последующее увеличение длительности выдержки сопровождается растворением частиц никеля в медно-цинковом расплаве, однако, образования гомогенного расплава не происходит: об этом свидетельствует микроструктура сплавов (рис. 5 в, г). Растворение твердых металлов в жидких протекает в диффузионном режиме, лимитирующей стадией которого является диффузия атомов тугоплавкого металла через диффузионный пограничный слой [5, 6]. Размеры диффузионного пограничного слоя определяются гидродинамическими условиями на границе раздела твердый металл–расплав. В процессе растворения твердого металла в жидком, на границе раздела твердый металл–расплав (жидко-металлический раствор) протекает два конкурирующих процесса: диффузия атомов растворяемого металла в расплав и диффузия атомов расплава в растворяемый металл [8]. В зависимости от физико-химических характеристик компонентов системы твердый металл–расплав, гидродинамических условий на границе раздела твердый металл–расплав на границе раздела, возможно образование прослоек интерметаллидов. Образование прослойки (диффузионной зоны) обусловлено диффузией атомов расплава в твердую фазу. Структура, состав диффузионной зоны определяются значениями коэффициентов диффузии атомов в твердой и жидкой фазах и металлохимическими характеристиками взаимодействующих элементов [5, 8]. Такие прослойки присутствуют как на поверхности, так и в объеме частиц никеля (рис. 5 а, б). Морфология поверхности прослоек дает основание полагать, что они образовались не в результате реакционной диффузии меди (цинка) в никель, а при охлаждении расплава диффузионной зоны при охлаждении расплава в паяном шве (рис. 5 б). Морфология, размеры частиц присутствующих в структуре припоя показывают, что более крупные (50–70 мкм) образовались путем объединения (слияния) более мелких частиц (рис. 5 г).

По данным энергодисперсионного анализа частицы представляют собой медно-цинк-никелевый сплав с концентрацией никеля 20–29 мас. %. Концентрация никеля в окружающем частицы растворе достигает 11–13 мас. %. Форма, различные размеры, состав этих частиц, отсутствие диффузионных прослоек на границах раздела, характер изменения микроструктуры припоя при увеличении длительности выдержки, показывают, что эти «частицы образовались в результате кристаллизации неоднородного по составу расплава, представляющего собой жидкометаллическую эмульсию. Формирование подобной структуры расплава и ее достаточно высокая устойчивость обусловлены механизмом контактного взаимодействия в системе медно-цинковый расплав–никель. Скорость растворения твердых металлов в жидких зависит не только от коэффициента диффузии атомов растворяющегося металла в жидком, но и от величины растворимости твердого металла в жидком [6, 8]. Растворимость никеля в медно-никелевом расплаве при 1225 К достаточно высока [9]. Растворение никеля в медно-цинковом расплаве сопровождается снижением скорости растворения, что делает возможным диффузию меди, цинка в никель. Изменение состава нерастворившейся частицы никеля снижает температуру ее плавления. Снижение температуры плавления нерастворившейся частицы приводит и к снижению ее прочности. В расплаве такая частица ведет себя как область расплава с большей вязкостью, чем окружающий расплав, и способна деформироваться при воздействии конвекционных потоков расплава (рис. 5). Формирование припоев с подобной микроструктурой в результате контактного взаимодействия легкоплавкого и тугоплавкого компонентов, в кратковременном (3–5 секунд) процессе

пайки, указывает на высокие скорости растворения частиц никеля в медно-цинковом расплаве, которые не могут быть обеспечены только высокой растворимостью никеля в медно-цинковом расплаве. Другим условием высокой скорости растворения частицы никеля является перемещение расплава в шве. Однако, перемещение (течение) расплава в узких зазорах затруднено [6]. Контактное взаимодействие компонентов припоя начинается в момент образования расплавов флюса и легкоплавкого компонента. При образовании расплава легкоплавкого компонента в жидкометаллической суспензии присутствуют капли флюса. Течение флюса из шва и сопутствующее ему газовыделение, приводят к перемещению расплава в локальных областях шва и увеличению скорости растворения частиц (никеля).

В отличие от системы (медь–цинк)–никель, в системе (медь–цинк)–железо растворимость железа в медно-цинковом расплаве меньше, чем никеля и нерастворившиеся частицы железа присутствуют в расплаве как компонент суспензии, формируя при охлаждении расплава структуру, представляющую собой матрицу из медно-цинк-железного сплава, в которой расположены частицы.

Предел прочности на разрыв паяных швов получено с использованием припоя ЛНМц с содержанием Ni 5% масс составляет 400–480 МПа, что сравнимо с пределом прочности паяных швов, полученных с использованием припоя ЛНМц 48-9-02, но при более низких температурах пайки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование процессов контактного взаимодействия легкоплавкого и тугоплавких компонентов припоев при пайке инструмента показало, что формирование припоя в паяном шве протекает через ряд стадий и не приводит к формированию микроструктур, характерных для сплавов на основе систем медь–цинк–никель, медь–цинк–никель–железо, медь–цинк–железо. Высокие скорости растворения частиц никеля в расплавах медь–цинк, медь–цинк–никель–марганец обусловлены двумя факторами: перемещением расплава легкоплавкого компонента в зазоре и высокими значениями растворимости никеля в медно-цинковых расплавах и растворимостью меди в никеле при температуре пайки. Высокие начальные скорости растворения частиц никеля в медно-цинковых расплавах и растворимость меди, цинка в никеле приводят к образованию в расплаве квазижидких частиц никелевого сплава при охлаждении расплава формирующихся частиц иного, чем окружающий сплав состава и морфологически связанные с зеренной структурой припоя. Образующийся сплав (припой) имеет структуру композиционного материала, в котором частицы сплава, обогащенные никелем, играют роль армирующего элемента. Контактное взаимодействие расплавов медь–цинк, медь–цинк–никель с частицами железа из-за низких значений растворимости железа в медно-цинковых расплавах не приводит к полному растворению частиц железа. Частицы железа присутствуют в структуре сплава как дисперсная фаза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Немков В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. Л.: Энергоатомиздат. – 1988. – 280 с.
2. Бузуев А.Н. Разработка и исследование системы индукционного нагрева для пайки многослойных изделий: диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.10. – Самара. – 2006. – 136 с.
3. Новосадов В.С. Влияние термического цикла пайки на структуру и механические

свойства сталей / В.С. Новосадов, С.В. Дьяченко, И.Н. Пашков // Пайка-2008. – Тольятти: ТГУ. – 2008. – С. 15–24.
4. Поведение материалов в электрическом поле : учебное пособие / А.П. Королёв, Д.М. Мордасов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ». – 2012. – 80 с.
5. Никитин В.Н. Физико-химические явления при воздействии жидких металлов на твердые // М: Атомиздат, 1967. – 441 с.
6. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика // М: Изд. АН СССР. – 1952. – 537 с.
7. Аксельруд Г.А., Можанов А.Д. Растворение твердых веществ // М: Химия. – 1977. – 272 с.
8. Иванов Л.И., Земсков В.С., Кубасов В.Н. Плавление, кристаллизация и фазообразование в невесомости // М: Наука. – 1989. – 256 с.
9. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. // Под. ред. Шухардина С. В. Наука.: 1979. – 248 с.

REFERENCES

1. Nemkov V.S., Demidovich V.S. Teoriya i raschet ustroystv induktsionnogo nagreva [Theory and calculation of induction heating devices] L.: Energoatomizdat. – 1988. – PP. 280. (in Russian)
2. Buzuev A.N. Razrabotka i issledovaniye sistemy induktsionnogo nagreva dlya payki mnogosloynykh izdeliy[Development and research of the induction heating system for soldering multilayer products]: dissertation ... candidate of technical sciences: 05.09.10. – Samara. – 2006. – 136 p. (in Russian)
3. Novosadov V.S., D'yachenko S.V., Pashkov I.N. Vliyaniye termicheskogo tsikla payki na strukturu i mekhanicheskiye svoystva staley [Effect of thermal soldering cycle on the structure and mechanical properties of steel] Payka-2008; Tol'yatti: TGU. – 2008. – PP. 15 (in Russian)
4. Korolov A.P., Mordasov D.M. Povedeniye materialov v elektricheskom pole: uchebnoye posobiye [Behavior of materials in the electric field: study guide.] Tambov: FGBOU VPO «TGTU». – 2012. – PP. 80. (in Russian)
5. Nikitin V.N. Fiziko-khimicheskiye yavleniya pri vozdeystvii zhidkikh metallov na tverdyye [Physicochemical phenomena under the influence of liquid metals on solid ones] // Moscow: Atomizdat. – 1967. – 441 p. (in Russian)
6. Levich V.G. Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika [Physicochemical hydrodynamics] // Moscow: Izd. Academy of Sciences of the USSR. – 1952. – 537 p. (in Russian)
7. Axelrud G.A., Mozhanov A.D. Rastvoreniye tverdykh veshchestv [Dissolution of solids] // M: Chemistry. – 1977. – 272 p. (in Russian)
8. Ivanov L.I., Zemskov V.S., Kubasov V.N. Plavleniye, kristallizatsiya i fazoobrazovaniye v nevesomosti [Melting, crystallization and phase formation in weightlessness] // Moscow: Nauka. – 1989. – 256 p. (in Russian)
9. Dvoynyye i mnogokomponentnyye sistemy na osnove medi [Double and multicomponent systems based on copper] // Under. ed. Shukhardina S.V. Science .: 1979. – 248 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 03.02.2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Вологдин В.В. Вклад профессора В.П. Вологдина в развитие радио и электротехнологий 7
Демидович В.Б., Михлюк А.И., Вегера И.И. История и развитие промышленных технологий индукционного нагрева 12
Демидович В.Б., Михлюк А.И., Вегера И.И. Состояние и перспективы развития индукционного нагрева в научно промышленном комплексе союзного государства 22
Лопух Д.Б., Вавилов А.В., Мартынов А.П., Скриган И.Н. Индукционная плавка в холодном тигле для обеспечения безопасности ядерной энергетики и реализации других уникальных технологий 32
Вегера И.И., Голубев В.С. Опыт применения современных методов поверхностного упрочнения на основе лазерной и ТВЧ обработки 44
Вечер А.К., Говор Г.А., Демиденко О.Ф., Вегера И.И., Зизико А.В. Специальные магнитные материалы и практика их применения при высокочастотном индукционном нагреве 59
Винтер Э.Р., Тимофеев В.Н. Электромагнитные силы в расплаве при магнитогидродинамическом перемешива с системой питания импульсными токами 73
Гайлевич Э.В., Полысаев А.В., Ходюш В.Е., Алейников Д.С. Применение технологии ускоренного индукционного нагрева при модернизации нагревательного оборудования 85
Демидович В.Б., Андрушкевич В.В., Ситько П.А., Перевалов Ю.Ю., Оленин В.А. Автоматизированные индукционные установки непрерывного нагрева заготовок перед пластической обработкой 94
Завойчинская Э.Б. Моделирование много- и гигацикловой усталости материалов рабочих лопаток газотурбинных двигателей при осевом нагружении с несимметричным циклом 105
Кожевников В.Ю., Калганова С.Г., Коваленко О.О. Разработка технологии производства сорбентов из отходов растениеводства с применением СВЧ-энергоподвода 117
Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б., Лепешкин С.А. Исследования нагрева вращающихся дисков в магнитном поле 123
Луганцев В.М., Свистунов Ю.С., Демидович В.Б., Перевалов Ю.Ю. Высокотемпературная индукционная печь для графитации углеродных волокон 129
Сташенко В.И., Троицкий О.А. Совместное действие СВЧ-излучения и импульсов тока на пластическую деформацию нержавеющей стали 139
Троицкий О.А., Савенко В.С. Электронные и решёточные механизмы электропластического эффекта 145
Хоршев А.А., Стрельцова О.В., Бондарь А.С., Чмиленко Ф.В. Исследование трёхмерных нелинейных электротепловых моделей для задач индукционного нагрева 164
Цыкунов П.Ю., Кузей А.М., Лебедев В.Я., Маталыго А.И. Исследование процессов формирования и кристаллизации расплавов припоев при индукционной пайке 173

CONTENT

Vologdin V.V. Contribution of professor V.P. Vologdin in development of radio and electrotechnologies 7
Demidovich V.B., Mihlyuk A.I., Vegera I.I. History and development of industrial induction heating technologies 12
Demidovich V.B., Mihlyuk A.I., Vegera I.I. State and prospects for the development of induction heating in the industrial complex of the cis 22
Lopukh D.B., Vavilov A.V., Martynov A.P., Skrigan I.N. Induction melting in a cold crucible to ensure the safety of nuclear power and the implementation of the other unique technologies 32
Vegera I.I., *Golubev V.S.* Experience of application of modern methods of surface hardening based on laser and induction treatment 44
Vetcher A.K., Govor G.A., Demidenko O.F., Vegera I.I., Zizika A.V. Special magnetic materials and experience of using them for highfrequency induction heating 59
Vinter E.R., Timofeev V.N. In-melt electromagnetic forces at mhd-stirring with pulsed current supply 73
Gajlevich E.V., Polysaev A.V., Hodjush V.E., Alejnikov D.S. Application of accelerated induction heating technology during the modernization of the heating equipment . . . 85
Demidovich V.B., Andrushkevich V.V., Sitko P.A., Perevalov Yu., Olenin V. A. Module induction installations for continuous heating of billets before to pressure treatment . . 94
Zavoychinskaya E.B. Modelling of multi- and hygacycle fatigue of gas turbine engine blade materials at axial asymmetric loading 105
Kozhevnikov V.Y., Kalganova S.G., Kovalenko O.O. Development of technology for the production of sorbents from crop waste using microwave energy supply 117
Lepeshkin A.R., Kuvaldin A.B., Lepeshkin S.A. Investigations of heating of rotating disks in magnetic field 123
Lugantsev V.M., Svistunov Y.S., Demidovich O.V., Perevalov Y.Y. High temperature induction furnace for carbon fiber graphitation 129
Stashenko V.I., Troitsky O.A. The combined effect of microwave radiation and current pulses on the plastic deformation of stainless steel 139
Troitsky O.A., Savenko V.S. Electronic and lattice mechanisms electroplastic effect . . 145
Khorshev A.A., Streltsova O.V., Bondar A.S., Chmilenko F.V. Investigation of 3d nonlinear electrothermal models for induction heating problems 164
Tsykunov P.Y., Kuzey A.M., Lebedev V.Y., Matalygo A.I. Research of crystallization processes and solder melt with induction soldering 173

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Акула И.П. I – 235
Акулич В.В. I – 235
Алейников Д.С. II – 85
Алифанов А.В. I – 127
Анисович А.Г. I – 264
Андрушкевич В.В. II – 94
Бабич В.Е. I – 273
Багаев С.И. I – 250
Бакаев А.Г. I – 285
Баханович Л.В. I – 235
Белый А.В. I – 39
Бондарь А.С. II – 164
Бондаренко А.С. I – 60, 81
Бондаренко С.А. I – 60, 81
Босяков М.Н. I – 60, 81
Бр̣ новицкий А.М. I – 382
Бучик Т.Ю. I – 333
Вавилов А.В. II – 32
Винтер Э.Р. II – 73
Вегера И.И. II – 12, 22, 44, 59
Вечер А.К. II – 59
Волочко А.Т. I – 105
Вологдин В.В. II – 7
Гайлевич Э.В. II – 85
Говор Г.А. II – 59
Голубев В.С. II – 44
Гордиенко А.И. I – 6
Горельчик А.Н. I – 235
Горчанин А.И. I – 127
Дементьев В.А. I – 382
Демиденко О.Ф. II – 59
Демидович В.Б. II – 12, 22, 94, 129
Дувалов П.Ю. I – 382
Жук Д.В. I – 60, 81
Завойчинская Э.Б. II – 105
Зеленин В.А. I – 188, 208
Залесский В.Г. I – 60, 81, 154
Зизико А.В. II – 59
Изобелло А.Ю. I – 30
Ильюшенко В.М. I – 382
Калганова С.Г. II – 117
Кебец А.В. I – 333
Коваленко О.О. II – 117
Козлов А.А. I – 60, 81
Кожевников В.Ю. II – 117
Кожевникова Г.В. I – 306
Комаровская В.М. I – 348
Коногорских А.А. I – 357
Кривонос Ю.И. I – 333
Кувалдин А.Б. II – 123
Кузей А.М. I – 393, II – 173
Купреева О.В. I – 250
Луганцев В.М. II – 129
Ласковнев А.П. I – 23
Латушкина С.Д. I – 338, 348
Лазарук С.К. I – 250
Лебедев В.Я. II – 173
Лебединский Ю.А. I – 382
Лепешкин А.Р. II – 123
Лепешкин С.А. II – 123
Лопух Д.Б. II – 32
Лях А.А. I – 127
Маркевич М.И. I – 188
Мартынов А.П. II – 32
Маталыго А.И. II – 173
Матусевич П.А. I – 60, 81
Матяс А.Н. I – 127
Милюкова А.М. I – 127
Михлюк А.И. II – 12, 22
Моисеенко А.Н. I – 60, 81

Обухов В.Е I – 188
Оленин В.А. II – 94
Онысько С.Р. I – 235
Панов А.Г. I – 357
Перевалов Ю.Ю. II – 94, 129
Пигаль Р.В. I – 348
Полысаев А.В. II – 85
Поболь И.Л. I – 6, 60, 81, 154
Подболотов К.Б. I – 105
Поко О.А. I – 23
Покровский А.И. I – 30, 224, 291
Посылкина О.И. I – 338
Предко А.А. I – 338
Рудович А.О. I – 306
Савенко В.С. II – 145
Свистунов Ю.С. II – 129
Садко К.В. I – 306
Ситько П.А. II – 94
Смягликов И.П. I – 250
Сташенко В.И. II – 139
Стрельцова О.В. II – 164
Скриган И.Н. II – 32
Терещук О.И. I – 348
Тимофеев В.Н. II – 73
Толкачева О.А. I – 127, 291
Троицкий О.А. II – 139, 145
Филимонов В.А. I – 366
Хина Б.Б. I – 291
Ходюш В.Е. II – 85
Хоршев А.А. II – 164
Цыкунов П.Ю. II – 173
Чапланов А.М. I – 188
Чекан Н.М. I – 235
Чмиленко Ф.В. II – 164
Шаехова И.Ф. I – 357
Шкробот В.А. I – 338
Шпак Е.П. I – 235
Щукин В.Я. I – 306
Якубовская С.В. I – 336

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Сборник научных трудов

В 2 книгах

Книга 2

Электротехнологии

Ответственный за выпуск:
А.Т. Волочко

Компьютерная верстка:
А.П. Старинская

Подписано в печать 23.03.2021.
Формат 84×108 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл.-печ. л. 19,95. Уч.-изд. л. 18,85.
Тираж 100 экз. Заказ N°100.

ГНУ «ФТИ НАН Беларуси».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий N°1/84 от 13.11.2013.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий N°2/12 от 21.11.2013 г.
ул. Купревича, 10, 220141, г. Минск.