

Развитие технологий индукционного нагрева (к 140-летию со дня рождения Вологодина Валентина Петровича)

ДЕМИДОВИЧ В.Б.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

В 1935 г. профессор В.П. Вологдин и инженер Б.Н. Романов провели успешные опыты по использованию токов высокой частоты (ТВЧ) для индукционной поверхностной закалки. Ошеломительный успех этой технологии на танковых заводах во время Великой Отечественной войны был высоко оценен правительством СССР, и в 1947 г. был создан Всесоюзный научно-исследовательский институт токов высокой частоты (ВНИИТВЧ). В статье с современных позиций рассмотрена организация научных исследований в институте и отмечены особенности учебного процесса на кафедре СПбГЭТУ «ЛЭТИ», показаны достижения последних лет и перспективные направления исследований обработки металлов в переменном электромагнитном поле.

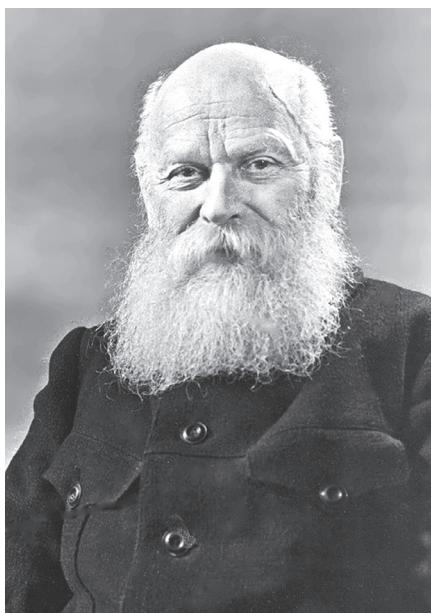
К л ю ч е в ы е с л о в а: поверхностная индукционная закалка, обработки металлов в переменном электромагнитном поле, компьютерное моделирование

В этом году исполняется 140 лет со дня рождения чл.-корр. АН СССР, профессора Валентина Петровича Вологодина (1881–1953). Его имя, возможно, не так хорошо известно, как, например, имя Александра Степановича Попова – изобретателя радио. Хотя на здании Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ) памятные доски этих выдающихся ученых, работавших здесь, располагаются рядом. В.П. Вологдин – первый лауреат Золотой медали им. А.С. Попова АН СССР (1948), один из основателей и сотрудник (1918–1923) Нижегородской ра-

диолаборатории, где были созданы мощные электромашинные генераторы его системы. Однако наибольшее значение приобрели работы В.П. Вологодина по использованию токов высокой частоты в промышленности для упрочнения деталей. Колоссальный толчок в развитии этой технологии произошел во время Великой Отечественной войны, когда на танковых заводах была внедрена поверхностная индукционная закалка деталей. Исключительно важные работы ученого в этой области были высоко оценены правительством СССР, и 1 апреля 1947 г. был создан Всесоюзный научно-исследовательский институт токов высокой частоты (ВНИИТВЧ), который размещался в Шуваловском парке г. Ленинграда и являлся прообразом Академгородка в Новосибирске и современных технопарков.

Наиболее распространенное и известное воздействие сильного переменного магнитного поля на проводящие материалы (металлы, графит и др.) связано с тепловым эффектом при прохождении наведенных этим полем токов. Сам процесс выделения теплоты индуцированными токами получил название «индукционный нагрев» (ИН).

На заре электротехники при разработке генераторов и двигателей, трансформаторов и других электромеханических устройств вихревые токи рассматривались как паразитные и принимались меры для их подавления. Только значительно позднее выделение теплоты индуцированными токами высокой частоты стало использоваться для технологических целей нагрева и плавки. Одним из первых успешных промышленных применений токов высокой частоты в СССР стало предложение в 1935 г. профессором В.П. Вологдиным



Валентин Петрович Вологдин (1881-1953)

и инженером Б.Н. Романовым использовать токи высокой частоты (ТВЧ) для индукционной поверхностной закалки [1–3].

Те поразительные успехи, которых достиг Вологдин как в научном, так и в практическом плане с 1935 г. до ухода из жизни в 1953 г., заставляют осмыслить секреты его достижений. Необходимо проанализировать развитие техники индукционного нагрева до 1991 г. и до нынешних дней, дать прогноз перспектив бесконтактной передачи энергии в материалы как для нагрева металлов перед пластической обработкой, так и модификации, структурных превращений и получения новых свойств материалов.

Прежде всего пример Вологодина показывает, что новые научные результаты, новые технологии и успех достигаются практически всегда на стыке наук.

Еще в 1920-е годы Вологдин пробовал осуществить термообработку токами высокой частоты, но потерпел неудачу [3]: не хватило теоретических и практических знаний в области теплофизики и металловедения. Только к 1935 г. удалось найти точное сочетание электромагнитных характеристик переменного поля (частоты и интенсивности) с теплопроводностью и условиями охлаждения для получения необходимых распределений структур металла с требуемой твердостью и остаточными напряжениями.

Поэтому принципиально важно было, что на кафедре, которую он основал в Ленинградском электротехническом институте (ЛЭТИ) в 1946 г., мультидисциплинарные образовательные программы включали предметы, связанные как с электротехникой, так и с теплофизикой и металловедением. После смерти Вологодина в 1953 г. кафедру возглавил профессор А.Е. Слухоцкий. Он внес неоценимый вклад в теорию индукционного нагрева, создал творческий коллектив преподавателей и довел выпуск инженеров, специалистов в технике индукционного нагрева, до 75 чел. в год. Методами математической физики была разработана аналитическая теория и дан расчет устройств индукционного нагрева [4–6].

Прозорливость такого подхода подготовки кадров в высшей школе ярко проявилась в 1990-е годы, когда открылась возможность широких контактов с университетами и компаниями Запада. Выяснилось, что в США специалистов в области индукционного нагрева не готовят, в то же время более 300 компаний с многочисленными отделениями в Европе, Азии и Южной Америке работали в этой области, включая такие гиганты, как Inductotherm Corp., Inductoheat Inc., Ajax TOCCO Magnethermic Corp., ABP Induction LLC, и остро нуждались в специалистах в области индукционного нагрева.

Во время визита президента Inductoheat Inc. Байрона Тейлора в Ленинград в 1991 г. он приглашал инженеров – выпускников кафедры с опытом работы – к себе в компанию без собеседования. Достаточно было рекомендации кафедры.



Madison Heights, Michigan (USA), 1991 г. Слева направо: президент Inductoheat Inc. Байрон Тейлор, доцент Г.Д. Комракова, профессор В.Б. Демидович

Madison Heights, Michigan (USA), 1991. From left to right: President of Inductoheat Inc. Byron Taylor, Associate Professor G.D. Komrakova, Prof. V.B. Demidovich

Попытка наладить подготовку аналогичных специалистов в США столкнулась с бюрократическими препонами в университетах США. Состыковывать дисциплины на факультетах американских университетов Electrical Engineering and Computer Science и Mechanical Engineering оказалось невозможно. В результате в 1990-е годы многие специалисты РФ выехали в США и Германию.

Наряду с работой на стыке наук залогом успеха являлась глубокая связь науки и практики, эта связь строилась по цепочке университет (вуз) – отраслевой институт – промышленные предприятия.

Детище Вологодина – ВНИИТВЧ был ведущей в СССР научной организацией в области индукционного нагрева, определявшей направления научно-технической политики. Институт регулярно проводил всесоюзные конференции по применению токов высокой частоты в промышленности, и издавались труды ВНИИТВЧ. Вышло также несколько изданий Библиотечки высокочастотника-термиста для производственного персонала.

В 1986 г. в Ленинграде было создано научно-производственное объединение по разработке и производству высокочастотного и ультразвукового электрооборудования (НПО «ВНИИТВЧ») с подчинением ему Таганрогского завода электротермического оборудования и Дагестанского завода электротермического оборудования. В 1989 г. в состав НПО «ВНИИТВЧ» был включен и Арктикский завод вакуумных электропечей (Армянская ССР). Серийно выпускались закалочные трансформаторы, машинные, ламповые и тиристорные преобразователи частоты, согласующие электротермические конденсаторы, высокочастотные приборы и комплектующие. Одновременно решались социальные вопросы и вопросы трудовой занятости в отдаленных районах СССР. В 1975 г. Новозыбковский завод «Индуктор» выпустил первую продукцию. Решение о строительстве нового завода было вызвано необходимостью обеспечения потребности народного хозяйства

СССР установками и механизированными комплексами с использованием индукционного нагрева.

В целом в институте были разработаны для народного хозяйства многие технологии, в том числе с применением токов высокой частоты:

для объемного нагрева заготовок под пластическую деформацию ковкой, штамповкой, прокатом различных машиностроительных деталей автомобилей, тракторов, сельхозмашин и др.;

для индукционной поверхностной закалки широкой гаммы машиностроительных изделий: коленвалы, распредвалы, полуоси, шестерни и т.п.;

для высокочастотной сварки металлов, в том числе труб, профилей, оболочек кабелей из черных и цветных металлов с высокой производительностью (до 120 м/мин) и высоким качеством. Установки обеспечивают производство прямошовных и спирально-шовных труб диаметром от 9 до 530 мм, продольно- и спирально оребренных труб. Сваренные высокой частотой изделия необходимы в подавляющем большинстве отраслей промышленности;

для высокочастотной сварки изделий из термопластичных материалов. Установки обеспечивают сварку изделий длиной от 3000 до 10000 мм при толщине материала 0,3 мм × 2 с производительностью 180–400 шов/ч. Разработаны установки для сварки медицинских одноразовых изделий для инъекций, систем переливания и транспортирования крови;

для объемного высокочастотного нагрева диэлектриков, в том числе пресс-материалов и таблетированных пресс-порошков перед прессованием, широкой гаммы изделий, разогрева эпоксидных смол и других синтетических материалов. Разработаны установки для сушки древесины, порошкообразных материалов, для склейки различных изделий из дерева, а также для вспенивания полистирола с целью изготовления термоизоляции, упаковки и пр.;

для высокочастотных ростовых технологий, в том числе для производства особо чистого монокристаллического кремния с диаметром кристаллов до 120 мм и длиной до 1 м, применяемых для приборов силовой электроники, СБИС и других полупроводниковых устройств. Разработаны технологии и установки для зонной очистки германия, антимонида индия, теллурия висмута, сурьмы и других полупроводниковых материалов, а также алюминия сверхвысокой чистоты, для получения высокотемпературных оксидных материалов типа фианитов и др.;

для высокочастотных плазменных технологий, включая упрочнение металлорежущего инструмента, штамповой оснастки, а также для оплавления строительных панелей и других изделий на основе бетона. Разработана уникальная технология и созданы установки для плазменно-мембранного разложения сероводорода при очистке природного газа;

для высокочастотной термообработки, в том числе для термообработки сварных швов рельсов в условиях рельсосварочных заводов и сварных швов трубопроводов на энергоблоках. Термообработка шва восстанавливает все свойства до исходных значений характеристик основного рельса или трубопровода;

для высокочастотной наплавки твердых сплавов с целью восстановления изношенных тяжело нагруженных деталей подвижного состава ж/д транспорта. Разработаны технологический процесс и оборудование, а также рецептура присадочных порошков, позволяющих повысить срок службы деталей, превышающий первоначальный в 10–15 раз! В отличие от традиционной одной наплавки дугой, высокочастотная наплавка обходится в 2–3 раза дешевле. Этот метод и оборудование могут быть использованы также для восстановления широкой гаммы деталей сельхозмашин и цилиндров двигателей внутреннего сгорания.

Учебный процесс в ЛЭТИ был построен так, что выпускники участвовали в этих разработках, проходили практику на производственных площадках ВНИИТВЧ, Кировском и Ижорском заводах, на Заводе турбинных лопаток.

Несмотря на глубокий спад в 1991 г. промышленности и уничтожение отраслевой науки, ВНИИТВЧ продолжал свою деятельность вплоть до лета 2019 г. В 2011 г. была сделана попытка сохранить ВНИИТВЧ как ведущее предприятие отрасли за счет организации в институте Научно-образовательного центра электромагнитной обработки материалов (НОЦ ЭОМ).

Из деятельности центра:

издание научно-технического журнала «Индукционный нагрев» (входил в перечень ведущих научных изданий из списка ВАК РФ);

проведение трех международных конференций «Актуальные проблемы индукционного нагрева» (АПИН);

в 2012 г. впервые в России организация и проведение в Санкт-Петербурге XVIII Международного Конгресса *UIE (International Union for Electricity Applications)*;

организация и проведение 9 международных и Российских молодежных школ-конференций по тематике «Электромагнитная обработка материалов»;

защищено 3 докторских и 7 кандидатских диссертаций по специальности 05.09.10 «Электротехнология».

В настоящее время функции ведущего предприятия отрасли в Союзном государстве России и Беларуси переходят к Государственному научному учреждению «Физико-технический институт национальной академии наук Беларуси» (ФТИ НАН Беларуси).

Надо признать, что к 1990-м годам наметилось глубокое отставание российских предприятий от западных в источниках питания установок ИН, силовой электроники и систем управления. В то же время в этот период открылось окно возможностей для российских

ученых. Это было связано с переводом на персональные компьютеры (ПК) и использованием их для расчетов и численного моделирования устройств индукционного нагрева, разработанных 10–20 лет назад.

Это уникальное программное обеспечение оказалось востребованным в западных промышленных странах. На рынке моделирования и расчетного проектирования индукционных нагревателей в то время практически не было конкурентов специализированному пакету *INDHEAT* [7]. Программы, базируясь на 2D и 3D электротепловых моделях, реализованных на численных методах, надежно и с высокой точностью позволяли провести расчетное проектирование и оптимизацию мощных индукционных нагревателей без экспериментальной доводки. Были разработаны экономичные комбинированные методы с использованием метода конечных разностей (МКР), метода конечных элементов (МКЭ), метода интегральных уравнений (МИУ) и их комбинации. Доступность ПК, широкое распространение и новые функциональные возможности привели к разработке моделей с «дружественным» интерфейсом, которые давали возможность пользователю, не знакомому с численными методами, на основе только физической постановки задачи легко вводить базовые исходные данные и анализировать результаты расчетов.

Все крупнейшие западные производители индукционного оборудования, такие как *Inductotherm Corp.*, *Inductoheat Inc.*, *Ajax TOCCO Magnethermic Corp.*, *Radynе* и др., использовали это программное обеспечение, которое выгодно отличалось от набирающих в то время силу универсальных пакетов типа ANSYS своей эффективностью, точностью расчетов, простотой подготовки данных и отсутствием необходимости знать численные методы.

В результате в 1996 г. при непосредственном участии российских специалистов была внедрена фирмой *Inductotherm Corp.* самая крупная в мире в то время индукционная установка подогрева слэбов перед прокаткой мощностью 42 МВт. Без использования программного обеспечения для моделирования и проектирования *INDHEAT* не удалось бы реализовать этот проект на заводе *Geneva Steel (Utah, USA)* в течение 8 мес. от начала проектирования до пуска.

Впервые в линиях нанесения антикоррозионных покрытий на ленту индукционные нагреватели мощностью 2 МВт использовались как тепловые безынерционные регуляторы при переходе с одного сортамента ленты на другой при непрерывной работе. Внедрение этой технологии позволило резко сократить брак линии цинкования производительностью 350 000 т/год на заводе *Heartland Steel в Terre Haute (USA)*.

С начала нулевых это программное обеспечение *INDHEAT* вошло в практику использования в ВНИИТВЧ, РЭЛТЕК, ряде компаний Китая и Индии.

Одновременно разработчикам стали доступны коммерческие пакеты общего назначения для расчета электромагнитных полей, разработанные такими кор-



Общий вид индукционной установки для подогрева слэбов мощностью 42 МВт на заводе *Geneva Steel (Utah, USA)*

General view of the 42 MW slab heating induction plant at the *Geneva Steel plant (Utah, USA)*

порациями, как *ANSYS*, *ANSOFT*, *INFOLITICA*, *Cedrat*, *VECTOR FIELDS*, *COMSOL*, *JMAG* и др. В практику проектирования начало входить использование пространственно-трехмерных моделей.

В то же время чрезвычайно важно в настоящем и будущем использование моделей в системах управления ИН. Очевидно, они должны обладать высокой точностью и быстродействием, обеспечивающим работу в реальном масштабе времени. Коммерческие пакеты общего назначения не могут решать такие задачи. Поэтому *INDHEAT* была преобразована и упрощена для использования в реальном масштабе времени. Системы управления ИН по «модели» становятся превалирующими в современных нагревательных комплексах и превращают их в «интеллектуальные» устройства. Первая модульная установка с подобной цифровой системой управления была внедрена на ММК-МЕТИЗ (Магнитогорск) в 2006 г.



Индукционный нагреватель из шести модулей с производительностью 3 т/ч

Induction heater of six modules with a capacity of 3 t/h

Нынешний этап моделирования связан с встраиванием интеллектуальных цифровых моделей в системы проектирования и управления технологическими комплексами в рамках концепции «Индустрия 4.0».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вологдин В.П.** Поверхностная индукционная закалка. М.: Оборонгиз, 1947, 291 с.
2. **Muehlbauer A.** History of Induction Heating and Melting. Essen: Vulkan Verlag, 2008, 212 p.
3. **Рогинский В.Ю.** Валентин Петрович Вологдин, 1881–1953. Л.: Наука, 1981, 215 с.
4. **Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е.** Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974, 264 с.
5. **Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А., Бамунер А.В.** Установки индукционного нагрева. Л.: Энергоиздат, 1981, 328 с.
6. **Немков В.С., Демидович В.Б.** Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат, 1988, 271 с.

7. **Demidovitch V.** Special software IndHeat for modeling induction heating processes Proceedings of 3rd International Workshop on Electric and Magnetic Fields EMF'96, Liege, Belgium, May 1996, pp. 273–278.

[03.03.2021]

Автор: Демидович Виктор Болеславович – доктор техн. наук, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).



DOI:10.24160/0013-5380-2021-5-51-55

Development of Induction Heating Technologies (to the 140th Anniversary of the Birth of Valentin Petrovich Vologdin)

DEMIDOVICH Viktor B. (St. Petersburg State Electrical Engineering University «LETI», St. Petersburg, Russia) – Chief Research Officer, Dr. Sci. (Eng.).

In 1935, Professor V.P. Vologdin and engineer B.N. Romanov conducted successful experiments on the use of high frequency currents (HFC) for induction surface hardening. The overwhelming success of this technology at tank factories during the Great Patriotic War was highly appreciated by the government of the USSR and in 1947 the All-Union Research Institute of High Frequency Currents (VNIITVCH) was created. The article discusses the organization of scientific research at the institute and at the department of Saint. Petersburg State Electrotechnical University (LETI), the features of the organization of the educational process, the achievements of recent years and promising areas of research on metal processing in an alternating electromagnetic field.

Key words: surface induction hardening, metal processing in an alternating electromagnetic field, computer simulation

REFERENCES

1. **Vologdin V. P.** *Poverhnoznaya induktsionnaya zakalka* (Surface induction quenching). M.: Oborongiz, 1947, 291 p.
2. **Muehlbauer A.** History of Induction Heating and Melting. Essen: Vulkan Verlag, 2008, 212 p.
3. **Roginsky V.Yu.** *Valentin Petrovich Vologdin, 1881–1953* (Valentin Petrovich Vologdin, 1881–1953). L.: Nauka, 1981, 215 p.
4. **Sluhotskiy A.E., Ryskin S.E.** *Induktory dlya induktsionnogo nagreva* (Inductors for induction heating). L.: Energiya, 1974, 264 p.

5. **Sluhotskiy A.E., Nemkov V.S., Pavlov N.A., Bamuner A.V.** *Ustanovki induktsionnogo nagreva* (Induction heating installations). L.: Energoatomizdat, 1981, 328 p.

6. **Nemkov V.S., Demidovich V.B.** *Teoriya i raschet ustroystv induktsionnogo nagreva* (Theory and calculation of induction heating devices). L.: Energoatomizdat, 1988, 271 p.

7. **Demidovitch V.** Special software IndHeat for modeling induction heating processes Proceedings of 3rd International Workshop on Electric and Magnetic Fields EMF'96, Liege, Belgium, May 1996, pp. 273–278.

[03.03.2021]