

## ЭЛИКСИР ДОЛГОВЕЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ

Первые опыты по использованию токов высокой частоты для нагрева стальных изделий с целью их последующей сквозной закалки проводились в 1926 году профессором Вологдиным В.П. и инженером Кировского завода Беляевым Н.М. в лаборатории высокочастотной электротехники при Ленинградском электротехническом институте. В 1935г. профессором Вологдиным В.П. и инженером Романовым Б.Н. были начаты работы по применению индукционного нагрева для закалки рельсов. В январе 1936 года на ЗИЛе работниками завода Рыскиным С.Е. и Шепеляковским К.З., которые впоследствии стали авторами многих научно-исследовательских работ по индукционному нагреву деталей, были получены положительные результаты закалки шеек коленчатых валов двигателя автомобиля ЗИЛ при нагреве от генераторов Октябрьской, а затем Минской радиостанций. В 1940 году на ЗИЛе и ГАЗе уже эксплуатировались промышленные высокочастотные установки для закалки деталей автомобилей. Начиная с 1942 года на ряде заводов – ЗИЛ, ГАЗ, УралАЗ, Челябинском тракторном заводе были созданы специализированные цехи электронагрева. В 1947 году на базе вышеназванной лаборатории высокочастотной электротехники под руководством В.П. Вологодина был организован Институт токов высокой частоты в дальнейшем преобразованный во ВНИИТВЧ им Вологодина.

Поверхностный характер нагрева, выявленный в первых работах, был оценен в качестве крупного недостатка метода и стал тормозом для его промышленного применения. Сдерживающим фактором внедрения высокочастотного нагрева были также дороговизна, ненадежность и недолговечность преобразователей частоты. Их амортизация ложилась тяжелым бременем на стоимость эксплуатации индукционных установок. Стоимость тока высокой частоты в несколько десятков раз превышала стоимость токов частотой 50 Гц.

Когда же под руководством выдающихся ученых Вологодина В.П., Головина Г.Ф., Кидина И.Н., Гриднева В.Н., Лозинского М.Г., Шамова А.Н., Замятина М.М., Шепеляковского К.З., Слухоцкого А.Е. и других были созданы теоретические и технологические основы индукционного нагрева и поверхностной закалки с использованием токов высокой частоты; созданы недорогие и надежные преобразователи частоты, преимущества индукционного нагрева стали неоспоримыми и он начал свое стремительное распространение. Выявились основные преимущества индукционного нагрева: неограниченная возможность регулирования температуры и скорости нагрева, отсутствие обезуглероженного



**П.С. Гурченко**  
д.т.н., начальник  
центральной  
заводской  
лаборатории РУП  
"МАЗ"

слоя и окалины, резкое уменьшение термических деформаций, высокая культура производства, экономия топливно-энергетических ресурсов.

В республике Беларусь ведущее место в развитии теории скоростного индукционного и электроконтактного нагрева для упрочнения деталей машиностроения принадлежит созданной в Физико-техническом институте НАНБ школе чл. корр. АН Б Бодяко М.Н и академика НАНБ Астапчика С.А. В ФТИ НАНБ под руководством чл.кор. НАНБ Гордиенко А.И. и при участии Ивашко В.В. и др. были исследованы особенности структурных превращений при скоростном нагреве

в титановых сплавах и создана технология упрочнения титановых деталей.

С первых лет применения ТВЧ и до последних лет советского периода среди промышленных предприятий ведущая роль в развитии индукционных технологий принадлежала Московскому и Горьковскому автомобильным заводам (ЗИЛ и ГАЗ), которые наряду с ВНИИТВЧ определяли уровень высокочастотной электротермии. На этих заводах разработано и изготовлено большое количество закалочных станков, трансформаторов и других устройств, способствовавших быстрому освоению индукционного нагрева. Так, на ЗИЛе впервые были созданы технология и оборудование для поверхностной закалки деталей автомобиля, установка и технология цементации шестерен при индукционном нагреве, разработаны технология, устройства и стали пониженной прокаливаемости для объемно-поверхностной закалки. Большой объем работ в области электротермии выполнен на ГАЗе Натанзоном Е.Б. и Глинером Р.Е. В 1987 году на ЗИЛе и ГАЗе относительный объем деталей, подвергаемых упрочнению при индукционном нагреве составлял более 60% от общей массы упрочняемых деталей. Широкое распространение нашел этот метод на Ярославском моторном заводе, АЗЛК, и Минском тракторном заводе. Так в 1999 году на МТЗ эксплуатировали 94 машинных преобразователя общей мощностью 33250 кВт и 31 ламповый генератор общей мощностью 1955 кВт. Большой объем опытно-исследовательских работ здесь выполнен к.т.н. Космовичем Л.С., Барановым В.С., Прицевым В.И. Был создан и внедрен ряд оригинальных технологий, универсальных нагревательных станций, специализированных станков для непрерывно-последовательной, контурной закалки шестерен с подогревом в печи, последовательной закалки полусей с импульсно-периодическим охлаждением, пайки масляного радиатора и др.

Интенсивно в этот период начались работы по использованию ТВЧ на Минском автомобильном

заводе. Уже в 1956 году индукционному нагреву под закалку на МАЗе подвергали 23 наименования деталей. Освоение выполнили энтузиасты - Михайловский В.И., Андрущенко Н.Ф., Попова М.А., Волчек В.Ф., Френкель Р.Б., Мартынович Н.З., Варакса А.С. В 1969 году уже 250 наименований деталей подвергались закалке с индукционного нагрева, в 1982 г. – 400 и в настоящее время – 700. Мощность высокочастотного оборудования выросла до 10000 кВт. При этом индукционной закалке подвергают более 200 деталей, нагреву под ковку, штамповку и высадку в кузнечном и агрегатном цехах - более 400 наименований, более 100 наименований инструмента проходит индукционный нагрев под напайку и отпайку твердосплавных пластин в термическом цехе штампового производства. Около 100 наименований осевого инструмента проходит закалку хвостовиков с нагревом ТВЧ. Более 1000 тонн в год точного стального литья по выплавляемым моделям выплавляется в цехе спецлития с использованием ТВЧ. В ремонтно-механическом цехе используется установка ТВЧ для закалки дисков роторов дробебетных аппаратов. Только на МАЗе общая мощность высокочастотных генераторов составляет 12820 кВт. Кроме выше названных, большое число деталей (около 250 наименований), ранее освоенных на МАЗе, переданы на Минский завод колесных тягачей (МЗКТ). Переданы установки и детали на автоагрегатные заводы в г.Осиповичи, Бобруйск, Кобрин, Барановичи, Белорусский автомобильный завод и кузнечный завод тяжелых штамповок в г. Жодино, а также на автоагрегатные заводы СНГ, выпускающие комплектующие и запчасти к автомобилям “МАЗ” - Калининград (РФ), Мироновка (Украина) и другие заводы. Универсальная закалочная установка, разработанная специалистами МАЗ, эксплуатируется на Минском подшипниковом заводе для упрочнения запчастей к легковым автомобилям.

На Минском рессорном заводе (МРЗ) с помощью специалистов МАЗ освоены 4 индукционные установки общей мощностью 1200 кВт. Из них две мощностью по 500 кВт используются для нагрева под прокатку переменного профиля листа малолистовой рессоры. Общий объем проката здесь составляет 80 тонн в месяц или 300 – 400 листов в смену.

Большой вклад в развитие технологий индукционного нагрева на МАЗе внесли и вносят Быков В.М., Майсюк Ф.Г., Кондратович Н.Б., Хомич Г.П., Михлюк А.И. и другие. Обзор исследований, выполненных на МАЗе с участием и под руководством автора в период с 1972 по 1999 год приведен в работе [1]. В настоящее время по уровню создаваемых технологических процессов и оборудования для обработки деталей при индукционном нагреве Минский автозавод вышел в число лидирующих предприятий автомобильной и тракторной промышленности СНГ. Это засвидетельствовано на научно-технической конференции, посвященной теории, технологии и оборудованию индукционного нагрева, проведенной на МАЗе совместно с НИ-

ИТВЧ в июне 1999 года и впервые за послеперестроечный период собравшей ведущих специалистов СНГ в этой области.

Индукционное оборудование и технологии, созданные на МАЗе обеспечивает нагрев под кузнечную обработку заготовок и термообработку сварных швов, чизельного зуба длиной более 2 м, (Кобринский автоагрегатный завод), прутков под навивку и закалку пружин (КЗТШ), рессорной полосы под прокатку листов малолистовой рессоры (МРЗ), отжига кольцевых сварных швов картера заднего моста и др. Создан ряд оригинальных установок для нагрева под высадку и гибку заготовок вала стабилизатора и стремянок; концевой нагрева заготовок под высадку головок.

Детали простой цилиндрической формы, составляющие 70% от общего числа упрочняемых, требуют только разработки индуктора и режимов закалки. Их обработку производят на универсальных закалочных станках. С целью автоматизации процесса для ряда деталей созданы специальные установки: станок-полуавтомат для закалки сферы шаровых пальцев производительностью 500 шт/час; станок-полуавтомат для закалки пальцев рессор, производительностью 300 шт/час; установки для закалки поворотных кулаков; установка для закалки шкворней с глубинного нагрева.

Для деталей, имеющих сложную форму зоны закалки – внутренние и наружные зубчатые венцы, шлицевые поверхности, галтели (всего около 6%) и окончательная механическая обработка которых затруднена, представляют проблему закалочные деформации и трещины. Для их предотвращения созданы и освоены технология и устройства программного прерывистого охлаждения водяным спрейером [1, 2].

Установлено, что кратковременные паузы в процессе интенсивного охлаждения водяным спрейером при жестком регулировании давления, расхода и длительности импульсов охлаждения и перерывов между ними обеспечивают отсутствие трещин и деформаций. При этом реализовано комбинированное упрочнение одной нагретой детали по двум видам закалки. В поверхностном слое упрочняемой зоны происходит закалка с самоотпуском на твердость 47–50 HRC, а в слоях, расположенных на расстоянии 0,5–1 мм, происходит ступенчатая закалка на твердость 50–52 HRC. Использование технологии прерывистой закалки при индукционном нагреве для шлицевых деталей и поворотных кулаков полностью исключило образование термических трещин. На рис. 1 показано распределение зоны закалки в сечении деталей: а - поворотный кулак, б – ступица ведущего моста.

На Минском автозаводе, и заводе колесных тягачей внедрена бездеформационная закалка шестерен модулем от 4 до 12 мм из сталей 40X и 40XH [1, 3]. Особенностью технологии является то, что закалку выполняют непрерывно-последовательно под слоем проточной воды при движении индуктора от вершины зуба к его впадине и далее к вершине сосед-

него зуба. Скорость перемещения изменяют от наибольшей на вершине до наименьшей на впадине, что обеспечивает получение равномерной толщины закаленного слоя на вершинах и впадинах зубьев. Благодаря тому, что нагреву не подвергается даже сердцевина зуба, термические деформации при закалке полностью отсутствуют. Скорость нагрева при индукционной закалке достигает 10000 °C/с, а охлаждения - 6000 °C/с

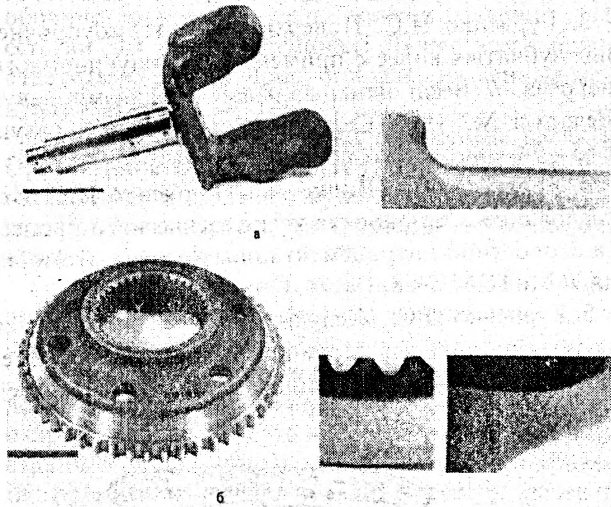


Рис.1 Детали автомобиля МАЗ, упрочняемые прерывистой закалкой и распределение зоны закалки в сечении этих деталей: а - поворотный кулак, б - ступица ведущего моста

Для сталей 40Х и 40ХН на обрабатываемых поверхностях достигнута твердость 56–62 HRC при толщине упрочненного слоя 1,5–2,0 мм.

По сравнению с действовавшей ранее технологией печного упрочнения новая технология позволила более, чем в 300 раз сократить длительность упрочнения (3 минуты вместо суток), в десятки раз уменьшить затраты электроэнергии и термические деформации. Отпала необходимость в жаропрочных и жароупорных материалах, закалочном масле, экологически вредном асбесте, устранены выбросы в окружающую среду тепла и вредных веществ.

Разработка отмечена премией министерства промышленности РБ в области науки и техники за 1995 год. На рис. 2 а и б показаны индукционная установка для закалки шестерен, а на рис.3 - распределение закаленной зоны в сечении зубьев закаливаемых шестерен.

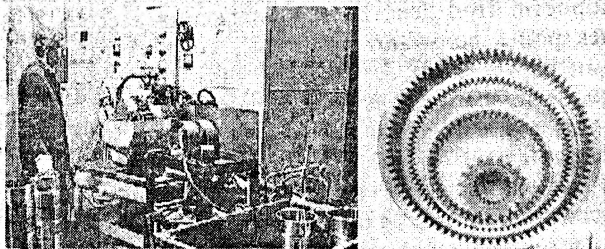


Рис.2 Индукционная установка для закалки шестерен колесной передачи МАЗ - а и шестерни - б, подвергаемые поверхностной индукционной закалке.

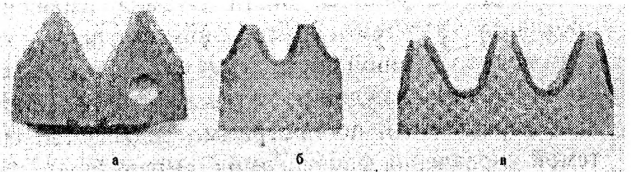


Рис.3 Расположение зоны закалки в сечении зубчатой поверхности шестерен колесной передачи: а - автомобиля МАЗ, б - автомобиля МЗКТ, в, - трактора МТЗ

Совместно с ФТИ НАН Б разработан способ скоростной нитроцементации в парах триэтанолamina до температур 1050–1100 °C в течение 3 минут [1, 4]. Стендовыми и дорожными испытаниями образцов и деталей автомобилей МАЗ установлено, что в результате скоростной нитроцементации с последующей поверхностной закалкой сталей 45, 40Х, 40ХН их износостойкость по сравнению с обычной поверхностной закалкой повышается в 1,7-3,5 раза и в 1,3-1,7 раза выше по сравнению с цементованными сталями 25ХГТ и 20ХН3А. С 1986 года работают три установки для нитроцементации при индукционном нагреве, содержащие по две рабочие позиции каждая. Создан технологический процесс и оборудование для нитроцементации при индукционном нагреве пальцев рессоры и пальцев реактивной штанги задней подвески автомобилей МАЗ.

Совместно с сотрудниками АНК Института тепломассообмена НАН Б Желудкевичем М.С., Германом М.Л., Ознобишиным А.Н. и другими создана и в кузнечно-термическом цехе инструментально-штампового производства МАЗ внедрена производственная установка для управляемой водородной закалки штампов весом до 8 тонн и габаритами до 1 метра [1, 5]. В 2000 году этим же творческим коллективом аналогичные установки внедрены на заводе специального инструмента и технологического оборудования (СИиТО ПО МТЗ), а в 2001 году на Курганском машиностроительном заводе. Установка для закалки штампов МАЗ показана на рис.4.

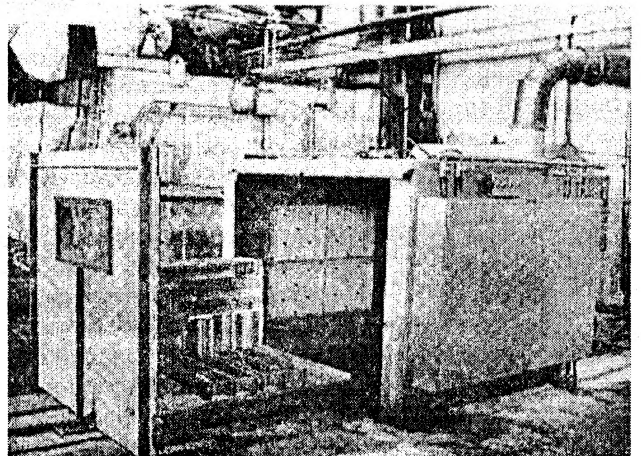


Рис. 4. Установка для закалки штампов МАЗ водородной смесью.

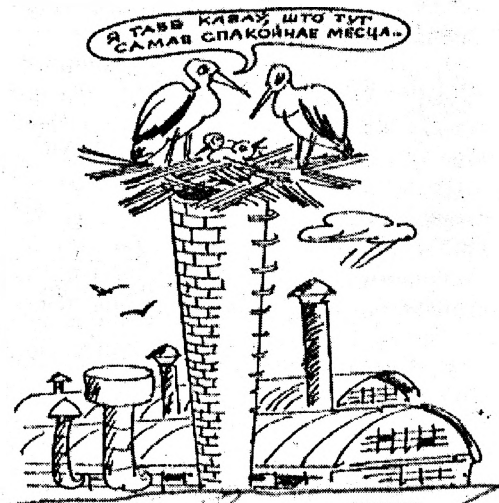
Охлаждение рабочей части штампа (гравюры) производится путем направленной импульсной подачи водовоздушной смеси через управляемые форсунки блока на каждой из которых установлен клапан, управляемый по программе, задаваемой системой управления форсунками. Температура и давление подаваемых к форсункам воды и воздуха контролируются и стабилизируются в блоках системы контроля и регулирования. По созданной технологии упрочняют молотовые штампы из стали 5ХНМ после печного нагрева до 860 °С. Охлаждение производят только со стороны гравюры. Режим охлаждения заранее рассчитывают на ЭВМ путем математического моделирования закалочного охлаждения с расчетом распределения температурных полей по поверхности и сечению штампа по специальной методике. Охлаждение продолжают до тех пор, пока расчетное количество тепла, оставшегося в штампе не станет соответствовать заданной средней температуре самоотпуска. После достижения заданного значения охлаждение прекращают и производят самоотпуск. При этом через 5 минут температура по всему сечению штампа выравнивается за счет теплопроводности до заданной. В процессе принудительного закалочного охлаждения гравюры штампа хвостовик охлаждается за счет теплообмена с окружающим воздухом и путем теплопроводности через тело штампа.

*Задача ученых заключается не только в развитии научных исследований, но и в борьбе за их использование на благообщества, на благо всех людей мира.*  
И.И. Артоболевский

*...с внедрением установок ТВЧ устранены выбросы в окружающую среду тепла и вредных веществ.*

*Использованная литература:*

1. Гурченко П.С. Упрочнение при индукционном нагреве и управляемом охлаждении.- Гомель: ИММС НАНБ, 1999.-236 с,ил.
2. Гурченко П.С. Исследование процесса прерывистой закалки деталей сложной конфигурации при индукционном нагреве. // Весті нацыянальнай акадэміі навук Беларусі №2 1999, Серыя Фізіка-тэхнічных навук, с. 34 – 40.
3. Гурченко П.С. Поверхностное термоупрочнение зубчатых колес с применением индукционного нагрева. // Весті нацыянальнай акадэміі навук Беларусі №2 1999, Серыя Фізіка-тэхнічных навук, с.65 – 74.
4. Бодяко М.Н., Шипко А.А. Гурченко П.С. Исследование и разработка технологического процесса скоростной нитроцементации деталей автомобиля. // МиТОМ, № 8, 1986 г. С.11-15.
5. Гурченко П.С., Желудкевич М,С, Управляемая закалка молотовых штампов водовоздушной смесью. // Весті нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, № 1, 1999. С. 51 – 57.



## ЧТО ВЫ ЗНАЕТЕ ОБ ИСКРАХ?

1. Воздух при атмосферном давлении выдерживает электрическое напряжение не больше 30 000 В на сантиметр (при хорошо отполированных электродах диаметром не меньше 1 см). При острых электродах электрическая "прочность" воздуха имеет меньшее значение. При расчесывании волос гребешком могут возникать искры длиной в несколько миллиметров. Для возбуждения таких искр необходимо напряжение в несколько тысяч вольт; при таком же напряжении работают и мощные гидро- и турбогенераторы. Но ток искры, возникающий при трении, мал, и длится он миллионные доли секунды. Поэтому работа, производимая искрами, возникающими на гребешке, ничтожна. Эти искры не способны зажечь даже самый легковоспламеняющийся материал.

2. Температура газа определяется скоростью движения молекул этого газа. Под влиянием электрических сил электроны и молекулы, несущие электрические заряды, приобретают очень большие скорости. Под действием напряжения всего в 1 В электроны получают скорость, соответствующую температуре 7600°С. Частицы газа в искре имеют скорости, соответствующие температурам в несколько раз более высоким, чем та, что царит на поверхности Солнца. Такой же космической температурой обладает и светящийся газ в неоновых и аргоновых лампах, в ртутных выпрямителях и т. п." Но так как в искре от гребешка огромными скоростями обладает только небольшое число молекул, то эта искра не может ни оплавить, ни поджечь гребешок.