



The results of works on optimization and increase of construction solidity of different details and semiproducts of bearing constructions of mobile machines particularly of cargo and passenger equipment of OAO «MAZ» are presented.

А. И. МИХЛЮК ОАО «МАЗ»

УДК 536.46

ИНДУКТОР ТВЧ – ОСНОВНОЙ ИНСТРУМЕНТ ИНДУКЦИОННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Индукционный нагрев нашел широкое применение при термической обработке различных деталей и материалов в машиностроении. Одним из основных элементов индукционного термического оборудования является индуктор, формирующий электромагнитное поле в детали (заготовке) и во многом определяющим качество термообработки. В большинстве случаев достоинства и недостатки технологических процессов и устройств, в которых используется индукционный нагрев, могут быть поставлены в прямую зависимость с особенностями конструкции индуктора, который создан для осуществления данной конкретной технологической операции (закалка, отпуск, плавка и др.). Поэтому каждый специалист, работающий в области промышленного использования индукционной термообработки, должен достаточно хорошо разбираться в основных принципах расчета, конструирования, изготовления и эксплуатации индукторов. В данной статье представлен опыт работы автора на ОАО «МАЗ» по созданию и эксплуатации индукторов ТВЧ. Существует огромное количество типов и конструкций индукторов, применяемых в машиностроении, но при этом все они имеют определенные узлы или системы [1].

Рассмотрим это на примере самого распространенного индуктора – индуктора для закалки деталей. На рис. 1 показан индуктор для закалки профиля детали «кулак разжимной» автомобилей МАЗ. Индуктор состоит из следующих узлов и систем.

1. Колодки (контактные колодки) 1, представляющие собой медные прямоугольные пластины с отверстиями для крепления. Предназначены для надежного крепления индуктора к вторичной обмотке понижающего закалочного трансформатора и передачи энергии от трансформатора на шины.

2. Шины (токопередающие шины) 2, представляющие собой медные пластины. Предназначены

для передачи энергии от контактных колодок к индукционному витку.

3. Индукционный виток 3, представляющий собой замкнутый медный провод полого сечения, охватывающий нагреваемую поверхность с определенным зазором. Является главной деталью индуктора и предназначен для нагрева конкретной поверхности или детали.

4. Система охлаждения 4, представляющая собой медные трубки прямоугольного сечения, припаянные к шинам, с подающими и сливными штуцерами (патрубками). Предназначена для постоянного охлаждения индуктора при передаче энергии к нагреваемой детали.

5. Система закалки (спрейер) 5, состоящая из закрытой полости с подводными штуцерами, наваренной на индукционный виток, и ряда мелких отверстий в индукционном витке. Спрейер предназначен для закалки нагреваемой поверхности и периодического охлаждения индукционного витка.

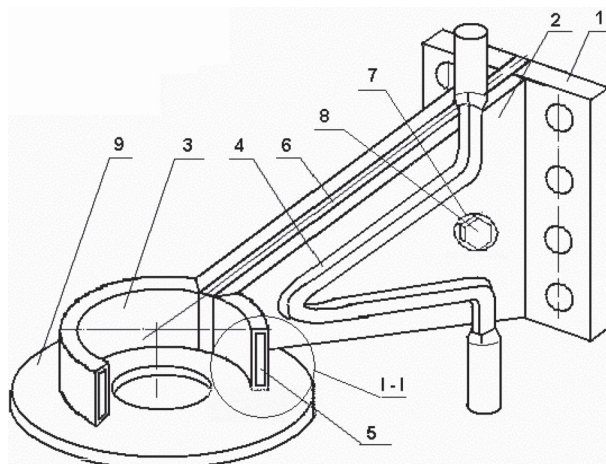


Рис. 1. Индуктор для закалки ТВЧ: 1 – контактная колодка; 2 – токопередающие шины; 3 – индукционный виток; 4 – система охлаждения; 5 – система закалки (спрейер); 6 – система изоляции; 7 – крепежные изделия; 8 – дополнительное устройство

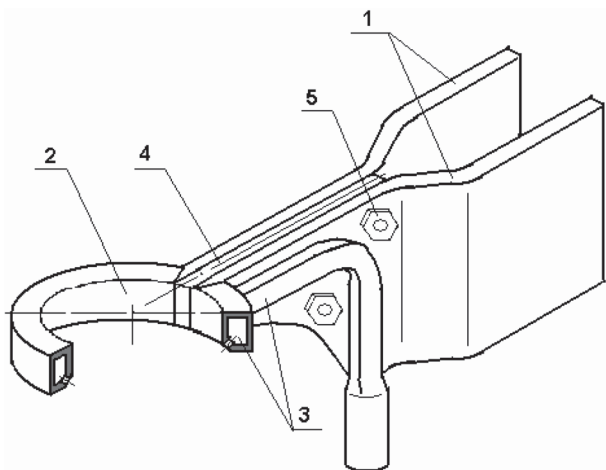


Рис. 2. Индуктор для непрерывно-последовательной закалки деталей типа вал: 1 – шина; 2 – индукционный виток; 3 – система закалки – охлаждения; 4 – изоляция; 5 – крепежные изделия

6. Система изоляции, состоящая из изоляционных пластин 6, расположенных между токопередающими шинами, и изолирующих втулок 7. Предназначена для изоляции токопередающих шин друг от друга.

7. Крепежные изделия 7 предназначены для крепления различных деталей и узлов индуктора. Изготавливаются, как правило, из немагнитных материалов – латуни, меди, бронзы.

8. Дополнительные устройства 8 предназначены для выполнения вспомогательных операций. Для данного индуктора – это текстолитовое кольцо, крепящееся к нижней части индукционного витка и предназначенное для создания необходимого расхода охлаждающей воды во время закалки.

В зависимости от конструкции и назначения индуктора у него могут отсутствовать или совмещаться отдельные системы. Например, на рис. 2 показан легкосъемный индуктор для непрерывно-последовательной закалки деталей автомобиля МАЗ, состоящий из шин 1, индукционного витка 2, системы закалки 3 и изоляции 4, деталей крепежа 5.

В конструкции данного индуктора в отличие от предыдущей роль контактных колодок выполняют шины, имеющие фигурную конфигурацию, а система охлаждения совмещена со спрейером (системой закалки).

На рис. 3 показан индуктор для напайки твердосплавных пластин на резцах при производстве инструмента, состоящий из индукционного витка 2, системы изоляции витка 4 и шин-колодок 1.

Индукционный виток представляет собой круглую медную трубку, изогнутую по размерам нагреваемых резцов, которая одновременно является и системой охлаждения индуктора. В данном индукторе отсутствуют шины, их роль выполняет си-

стема охлаждения, совмещенная с индукционным витком; спрейер, так как данный индуктор не предназначен для операции закалки; крепежные детали и дополнительные устройства.

Система изоляции предназначена только для изоляции индукционного витка от контакта с нагреваемой деталью и представляет собой асбестовый шнур, пропитанный жидким стеклом, и намотанный на индукционный виток.

При конструировании индукторов существуют определенные правила и закономерности, которые необходимо учитывать.

Правило первое. Токи одинакового направления отталкиваются, токи противоположного направления притягиваются. Это правило работает при параллельном расположении шин индуктора на минимальном расстоянии друг от друга, когда вся передаваемая энергия концентрируется по внутренней стороне каждой шины и передается на индукционный виток с наименьшими потерями.

Правило второе. На внутренней стороне проводника ток имеет наибольшую плотность, на внешней стороне ток практически отсутствует (так называемый кольцевой эффект). На рис. 4 показано влияние кольцевого эффекта в кольцевом проводнике прямоугольного сечения. Это правило всегда учитывается при взаимном расположении индукционного витка и нагреваемой детали. Подавляющее большинство индукторов конструируется по принципу охвата индукционным витком нагреваемой детали, что обеспечивает наилучшую эффективность нагрева.

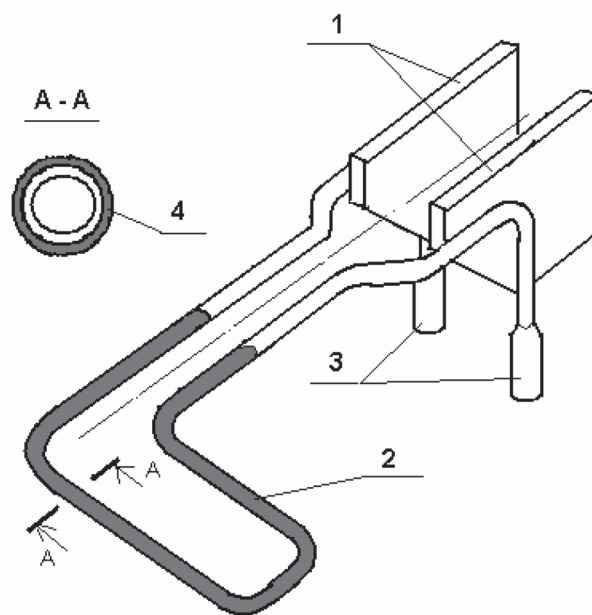


Рис. 3. Индуктор для напайки резцов: 1 – шины-колодки; 2 – индукционный виток; 3 – штуцера; 4 – система изоляции витка

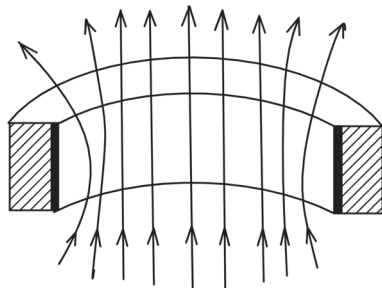


Рис. 4. Распределение тока по сечению кольцевого проводника прямоугольного сечения

Правило третье. Ток в своем движении всегда выбирает самый короткий и легкий путь. На рис. 5 показано распределение зоны закалки ТВЧ на шейках детали «кулак разжимной» грузового автомобиля при симметрично и несимметрично расположенных витках. При симметричном расположении витков (рис. 5, а) путь тока одинаков как по верхнему, так и нижнему витку, соответственно и одинаковым будет качество закалки (твердость, глубина, распределение зоны). Для несимметричного расположения витков (рис. 5, б) основной ток будет двигаться по верхнему витку, так как этот путь короче и, как следствие, качество закалки будет неодинаковым для верхней и нижней закаливаемых зон.

Правило четвертое. Интенсивность нагрева при прочих равных условиях будет наибольшая в местах максимального приближения индукционного витка к нагреваемой детали. На рис. 6 показано распределение зоны нагрева стального цилиндра в одновитковом индукторе прямоугольного сечения и прямоугольного сечения с буртиками по краям витка. Это правило учитывается при расчете зазоров между индукционным витком и нагреваемой деталью. За счет изменения формы индукционного витка изменены зазоры между витком и нагреваемой деталью. Благодаря этому происходит перераспределение плотности проходящего по витку тока и соответственно изменяется картина нагреваемой зоны ТВЧ.

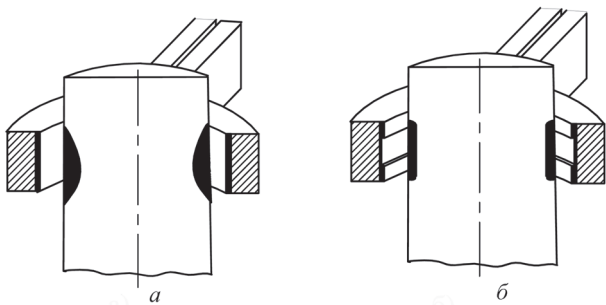


Рис. 6. Распределение зоны нагрева при изменении зазора между деталью и индукционным витком: а – прямоугольное сечение индукционного витка; б – прямоугольное сечение с буртиками по краям индукционного витка

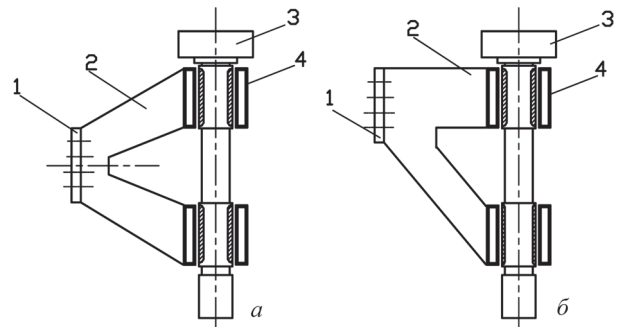


Рис. 5. Схема одновременного нагрева шеек детали «разжимной кулак» автомобиля МАЗ: а – расположение индукционных витков симметричное к контактными колодкам; б – расположение индукционных витков несимметрично к контактными колодкам; 1 – контактные колодки; 2 – шина; 3 – деталь; 4 – индукционный виток

Правило пятое. Нагреваются в первую очередь поверхности с наилучшими условиями теплоотвода. Это правило учитывается при конструировании индукторов для нагрева деталей, имеющих в зоне нагрева различные концентраторы нагрева (отверстия, острые кромки, резкие переходы диаметров и т. д.). На рис. 7 показано распределение зоны нагрева цилиндра в одновитковом индукторе при нагреве средней части и края цилиндра.

За счет равномерного теплоотвода (из металла в металл) при нагреве средней части зона располагается равномерно по длине. При нагреве края цилиндра за счет плохого теплообмена (из металла в воздух) зона нагрева получается искаженной, при этом происходит перегрев острой кромки по краю цилиндра.

Соблюдение перечисленных выше правил конструирования индукторов позволит избежать ошибок при проектировании и создать конструкции высокоэффективных индукторов.

Наряду с общими правилами для конструирования индукторов к конструкции отдельных узлов и систем индуктора также предъявляются определенные требования [2].

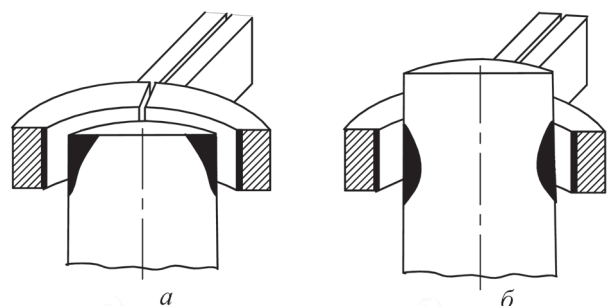


Рис. 7. Распределение зоны нагрева ТВЧ при нагреве: а – средней части; б – края цилиндра

Контактные колодки. Конструкция колодок индуктора должна обеспечивать надежный контакт и необходимый теплоотвод. При наличии нескольких установок ТВЧ на предприятии и широкой номенклатуре термообрабатываемых деталей размеры колодок и крепежных отверстий в них должны быть унифицированы.

Шины. Конструкция шин должна обеспечивать необходимый теплоотвод, требуемую жесткость индуктора, оптимальное размещение системы охлаждения.

Индукционный виток. К конструкции индукционного витка предъявляется два основных требования: размеры и конфигурация витка должны обеспечивать два основных условия: выполнение операции индукционной термообработки с высоким качеством и долговечность в работе.

Например, при закалке ТВЧ высокое качество термообработки достигается, когда индукционный виток совмещает две функции: передает мощность, необходимую для нагрева, и служит спреером для подачи на деталь охлаждающей среды для закалки.

Специальный или дополнительный спреер может быть также выполнен отдельно и закреплен на индуктирующем проводе. По опыту работы на МАЗ для спреера оптимальными параметрами являются отверстия диаметром 1,8–2,0 мм, просверленные с шагом 4 мм для одного ряда отверстий, и 6 мм – для многорядных спрееров при расстоянии между рядами 3 мм и сверлении отверстий в шахматном порядке. При этом для индукционных витков с толщиной стенки более 3 мм спреерные отверстия делаются ступенчатыми: сначала сверлом диаметром 2,8–3,3 мм сверлится большая часть толщины витка, а оставшаяся толщина (около 1 мм) – сверлом диаметром 1,8–2,0 мм. Спреерное охлаждение обеспечивает высокую и равномерную твердость поверхности, обладает высокой производительностью.

Долговечность в работе достигается следующими способами: увеличением толщины индукционного витка, применением дополнительного охлаждения индукционного витка, уменьшением количества сварных соединений (точеный виток или из гнутой трубки).

Система охлаждения. Конструкция системы охлаждения должна обеспечивать достаточное охлаждение узлов индуктора при передаче энергии. Для этого следует обеспечить плотный контакт охлаждающих трубок с шинами и другими охлаждающими элементами индуктора; отсутствие резких поворотов и перегибов по пути движения охлаждающей воды:

размеры и конструкция штуцеров должны обеспечивать надежность и легкость крепления подводящих шлангов.

Спрейер (система закалки). Так как основное назначение спреера – это выполнение закалки детали непосредственно в индукторе, то к конструкции спреера предъявляются следующие требования:

- площадь поперечного сечения водоподводящих шлангов, патрубков, полостей по которым охлаждающая жидкость поступает к камере со спреерными отверстиями, должна быть не менее чем в 2 раза больше суммарной площади этих отверстий;
- в конструкции системы не должно быть полостей, в которых жидкость может оставаться после окончания охлаждения.

Система изоляции. Основное требование к данной системе – обеспечение изоляции между токопередающими деталями индуктора при температурах до 100–150 °С и периодическом попадании на изолирующие материалы охлаждающей жидкости.

Крепежные изделия. К конструкции крепежных изделий предъявляются следующие требования: изготавливаться из немагнитного материала (медь, латунь, бронза, жароупорные марки стали, диэлектрик текстолит, асбестоцемент и т. д.) и по резьбовому соединению не должен проходить ток, который вызывает быстрый нагрев и расплавление резьбовых поверхностей.

На рис. 8 показан разрез по месту крепления изоляционных пластин между шинами с изоляционными втулками и соединительными крепежными деталями, характеризующий конструкцию двух последних систем индуктора. Данный тип крепления изоляции применяется для большинства типов индукторов и является достаточно надежным.

Рассмотрим выполнение перечисленных выше требований на примере, характеризующем жесткость конструкции. Как известно, индуктор изготавливается из меди, которая является довольно пластичным материалом. В процессе работы при

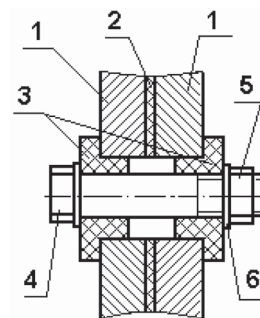


Рис. 8. Сечение по крепежным деталям индуктора: 1 – шина; 2 – изоляционная пластина; 3 – изоляционная втулка; 4 – болт; 5 – гайка; 6 – шайба

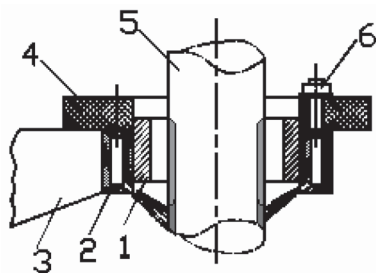


Рис. 9. Индукционный виток индуктора для закалки трубы гидроцилиндра подъема платформы самосвала МАЗ-5551 с закрепленным на нем кольцом жесткости: 1 – индукционный виток; 2 – трубка охлаждения; 3 – шина; 4 – кольцо жесткости; 5 – закаливаемая деталь; 6 – детали крепежа кольца жесткости

многократной передаче значительных объемов энергии, постоянном термическом воздействии происходит многократное силовое воздействие на детали индуктора, в первую очередь индукционный виток, который подвержен значительным деформациям. Поэтому индуктор должен обладать необходимой жесткостью. Это достигается прежде всего выбором определенной толщины колодок, шин и индукционного витка или установкой на индукционный виток дополнительного устройства, являющегося элементом жесткости. На рис. 9 показан индукционный виток для непрерывно последовательной закалки трубы гидроцилиндра подъема платформы самосвала МАЗ с закрепленным на нем кольцом жесткости. В процессе закалки трубы из-за большой передаваемой мощности,

интенсивной работы, теплового воздействия происходит деформация витка 1 (эллипсность) с наваренной на него трубкой охлаждения. Повышение жесткости витка за счет увеличения его толщины приводит к увеличению его габаритов и, как следствие, к увеличению глубины нагрева и короблению закаливаемой детали 5. Поэтому для обеспечения жесткости индукционного витка на него устанавливается текстолитовое кольцо 4, которое крепится с помощью четырех шпилек 6, приваренных к трубке охлаждения 2, и поддерживает необходимую форму витка.

При широком применении индукционной термообработки на предприятии целесообразно выполнить унификацию их конструкции по определенным элементам в зависимости от технологии применения. В табл. 1 приведены рекомендации по унификации конструкции индукторов для различных операций.

Например, на Минском автомобильном заводе все применяемые индукторы для закалки (каталог спроектированных, используемых и использовавшихся индукторов более 3 тыс. наименований) по способу крепления унифицированы следующим образом.

1. Крепление к закалочному трансформатору через переходник с резьбовым соединением по одному типоразмеру (рис. 10). Размеры h , H и L практически для всех индукторов (за исключением специальных) унифицированы.

Таблица 1. Рекомендуемая унификация индукторов для индукционной термообработки

Технологическая операция	Унифицируемый элемент	Преимущества
Закалка, нагрев под горячее выдавливание, изготовление инструмента (напайка, отпайка)	Размеры и конструкция креплений индуктора к закалочному трансформатору. Расстояние от плоскости крепления индуктора до оси вращения (расположения) детали в индукторе. Диаметр и конструкция штуцеров системы охлаждения и закалки. Номенклатура круглой медной и размеры сечения при профилировании медной трубки. Размеры спрейерных отверстий.	Использование одного индуктора на нескольких установках. Быстрота и легкость замены. Ремонтопригодность. Технологичность в изготовлении.
Нагрев под ковку	Длина индуктора. Диаметр штуцеров и конструкция системы охлаждения. Размеры спрофилированного сечения медной трубки. Способ и конструкция изоляции (размеры керамики). Размеры и способ крепления водоохлаждаемых направляющих. Размеры и расположение контактных колодок индуктора.	Удобство в настройке режимов нагрева. Использование одного индуктора на нескольких установках. Быстрота и легкость замены. Ремонтопригодность. Технологичность в изготовлении.

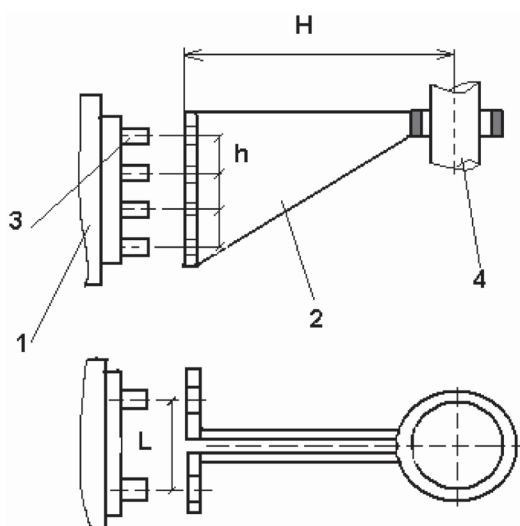


Рис. 10. Схема унификации индукторов по способу крепления к закалочному трансформатору: 1 – закалочный трансформатор; 2 – индуктор; 3 – переходник со шпильками крепления индуктора; 4 – деталь

2. Крепление к закалочному трансформатору через переходник с пневматическим соединением по длине и высоте шины (рис. 11). Размеры A –

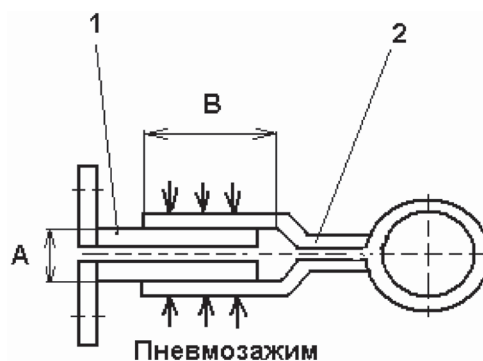


Рис. 11. Схема унификации быстросъемных индукторов креплением к переходнику трансформатора с помощью пневмозажима: 1 – переходник; 2 – индуктор

расстояние между шинами; B – длина шины и высота шины (на рис. не показан) унифицированы.

Эксплуатация и ремонт индукторов. В процессе эксплуатации индукторы подвергаются воздействию нескольких неблагоприятных факторов, приводящих к потере работоспособности. Основная причина выхода индуктора из строя – неисправности системы охлаждения. Опыт эксплуатации индукторов позволил выделить ряд характер-

Т а б л и ц а 2. Характерные неисправности индукторов ТВЧ

Неисправность	Причина	Способ устранения
1. Прогорание индукционного витка	Длительная и неправильная эксплуатация: отсутствие охлаждения, механическое повреждение (сдавливание медной трубки), загрязнение системы охлаждения, износ витка за счет касания детали при вращении	Заменить индукционный виток. Проверить точность механизмов приспособления для вращения детали и при необходимости выполнить ремонт
2. Плохое охлаждение водой витка или элементов системы охлаждения	Загрязнение в результате длительной эксплуатации (накипь на внутренних стенках системы охлаждения) Механическое повреждение (сдавливание медной трубки) Попадание грязи в систему охлаждения	Отжечь индуктор в печи или протравить в химическом растворе, продуть сжатым воздухом. Заменить неисправный элемент или восстановить проход в трубках системы охлаждения
3. Потеря геометрии индукционного витка или элементов индуктора	Длительная эксплуатация. Механическое воздействие. Работа без охлаждения или при недостаточном охлаждении	Отрихтовать и восстановить геометрические размеры Заменить неисправный элемент. Проверить и отремонтировать систему охлаждения
4. Неравномерное или недостаточное охлаждение через спрейерные отверстия индукционного витка	Длительная эксплуатация (накипь на внутренних стенках системы охлаждения). Износ («зализывание») спрейерных отверстий на индукционном витке от касания детали при вращении. Повреждение (сдавливание) в подводящих каналах или штуцерах	Выполнить ремонт по п.2
5. Выгорание металла на контактных поверхностях шин или колодок	Слабый контакт при установке. Недостаточное охлаждение контактных поверхностей. Большая потребляемая мощность. Загрязнение, деформация, окисление контактных поверхностей	Проверить надежность крепления, работу системы охлаждения, соответствие мощности конструкции индуктора. Очистить и отрихтовать контактные поверхности
6. Точечное прогорание индукционного витка	Попадание окалины или стружки на виток за счет нарушения изоляции	Запаять индукционный виток, отремонтировать изоляцию индуктора
7. Потеря контакта трубок системы охлаждения (отпайка) к шинам индуктора	Загрязнение в результате длительной эксплуатации (накипь на внутренних стенках системы охлаждения). Механическое повреждение (сдавливание) в подводящих каналах или штуцерах. Неправильная эксплуатация (работа без воды)	Выполнить ремонт по п.2

ных для индукторов неисправностей (табл. 2). Большинство неисправностей связано с индукционным витком, так как в процессе работы он подвергается максимальному воздействию неблагоприятных факторов.

Следует отметить, что при правильном конструировании и изготовлении индуктора конструкция его вполне ремонтпригодна. Как правило, при эксплуатации индуктора первым выходит из строя индукционный виток, поэтому в конструкции индуктора должна предусматриваться его замена. Большинство индукторов непрерывно по-

следовательной закалки (до 90%), все индукторы для нагрева под пластическую деформацию, специальные индукторы и часть (до 40%) индукторов одновременной закалки вполне пригодны для дальнейшей эксплуатации после замены индукционного витка. Неисправности, связанные с другими элементами индуктора (шины, колодки, система охлаждения), как правило, плохо подвергаются ремонту и требуют изготовления нового индуктора. В целом при правильной эксплуатации срок службы индуктора исчисляется годами [3].

Литература

1. Гордиенко А. И., Гурченко П. С., Михлюк А. И., Вегера И. И. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева. Мн.: Беларуская навука. 2009.
2. Гурченко П. С., Михлюк А. И. Типовые индукторы для закалки деталей автомобилей // Грузовик. 2003. № 10. С. 31–35.
3. Гурченко П. С., Демин М. И., Михлюк А. И. Оборудование индукционного нагрева в кузнечном производстве // Грузовик. 2001. № 9. С. 31–36.