

И. И. Вегера, А. В. Зизико, П. Ю. Цыкунов, В. М. Якович

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

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ НАГРЕВА ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ ВНЕШНИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Аннотация. На основе результатов расчета и моделирования разработана конструкция индукторов с магнито-проводами, предназначенных для закалки длинномерных плоских деталей. На этапе проектирования данного типа индукторов требовалось определить особенности влияния конструкции магнитопровода на распределение температурного поля при нагреве. Для этого выполнено моделирование электромагнитных и температурных полей для оценки концентрации электромагнитного поля при разной высоте «ножки» индуктора. В результате установлено значительное влияние длины «ножек» магнитопровода на интенсивность нагрева и работоспособность системы в целом. Отмечено, что недостаточная высота «ножки» приводит к значительному снижению концентрации поля, что обуславливает недостаточную температуру нагрева и неравномерность распределения зон тепловыделения в нагреваемой детали. В свою очередь, увеличение высоты «ножек» приводит к сужению зоны тепловыделения в детали по сравнению с суммарной шириной витка и магнитопровода. При значительном удлинении «ножек» контур охлаждения индуктора не сможет отводить тепло из магнитопровода, получаемое от детали, что приводит к разрушению магнитопровода. Разработанная конструкция двухвиткового одноконтурного индуктора и новая методика нагрева позволили получить качественный упрочненный слой глубиной до 3 мм с образованием мартенситной структуры требуемой твердости на плоской детали типа «направляющая» без существенных потерь энергии. Обработка детали производилась путем фиксации ее на жестком основании для компенсации эффекта температурного изменения линейных размеров. Для получения равномерного зазора между деталью и индуктором использовался специальный прижимной ролик. Полученная в итоге структура закаленного слоя в должной мере соответствует заявленным требованиям к детали. Результаты выполненных исследований использованы при разработке плоской детали типа «направляющая» для грузоподъемного оборудования (например, направляющая для движения тяговой цепи) и внедрены в производство.

Ключевые слова: индукционный нагрев, магнитопровод, технология, моделирование, микроструктура, свойства, внешнее электромагнитное поле

Для цитирования: Особенности технологии нагрева при индукционной термообработке внешним электромагнитным полем / И. И. Вегера [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 54–61. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-54-61>

Ivan I. Vegera, Aliaksandr V. Zizika, Pavel Yu. Tsykunou, Viktor M. Yakovich

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

FEATURES OF HEATING TECHNOLOGY AT INDUCTION THERMAL PROCESSING WITH EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELD

Abstract. According to the data of performed calculations and modeling of the hardening process, a design of inductors with magnetic cores for hardening long flat parts has been developed. At the design stage of this type of inductors, it was necessary to find out the degree of influence of the magnetic circuit design on the distribution of the temperature field during heating. To do this, we simulated electromagnetic and temperature fields to assess the concentration of the electromagnetic field at different heights of the “legs” of the inductor. As a result, a significant effect of the length of the “legs” of the magnetic circuit on the intensity of heating and the operability of the system as a whole was established. It is noted that insufficient height of the “leg” leads to a significant decrease in the field concentration, which leads to insufficient heating temperature and uneven distribution of heat zones in the heated part. In turn, an increase in the height of the “legs” leads to a narrowing of the heat release zone in the part compared to the total width of the coil and magnetic circuit. With a significant lengthening of the “legs”, the cooling circuit of the inductor will not be able to remove heat from the magnetic circuit obtained from the part, which will lead to the destruction of the magnetic circuit. The developed design of a two-turn single-circuit inductor and the general methodology made it possible to obtain a high-quality hardened layer with a depth of up to 3 mm with the formation of a martensitic structure of the required hardness on a planar-type flat part without significant energy loss. The part was machined by fixing it on a rigid base to compensate for the effect of temperature changes in linear dimensions. To obtain a uniform gap between the part and the inductor, a special pressure roller was used. The resulting structure of the hardened

layer adequately meets the stated requirements for the part. The results of the research were used to develop a flat part of the “guide” type for lifting equipment (for example, a guide for the movement of the traction chain) and were introduced into production.

Keywords: induction heating, magnetic circuit, technology, modeling, microstructure, properties, external electromagnetic field

For citation: Vegera I. I., Zizika A. V., Tsykunou P. Y., Yakovich V.M. Features of heating technology at induction thermal processing with external electromagnetic field. *Vestsi Natsyyanal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 54–61 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-54-61>

Введение. При необходимости нагрева внешних поверхностей деталей, форма которых отлична от цилиндрической, а также для нагрева внутренних поверхностей в конструкцию индуктора добавляют магнитопроводы, которые уменьшают кольцевой эффект и «выдавливают» магнитное поле на поверхность детали. Магнитопровод – это обладающая высокой магнитной проницаемостью конструкция или сложная деталь, которую применяют в практике индукционного нагрева для перераспределения магнитных полей индуктирующего проводника. В качестве магнитопровода используются магнитомягкие материалы. К ним прежде всего относятся ферриты различного состава (Mn–Zn, Ni–Zn), аморфные металлы (Co, Fe), пермаллои, нанокристаллические механические соединения и т. д. Главной характеристикой таких соединений является магнитная индукция насыщения. Данная величина указывает на «энергоемкость» материала, то есть при бесконечном росте напряженности электромагнитного поля значение магнитной индукции в магнитопроводе не превысит допустимой величины, определяемой свойствами материала [1].

Если поместить медный проводник прямоугольного сечения с переменным током в паз магнитопровода из пластин электротехнического железа, то магнитный поток будет стремиться пройти по пути наименьшего сопротивления, то есть по электромагнитному железу, которое обладает более высокой магнитной проницаемостью. Соответственно ЭДС самоиндукции и сопротивление тока будут больше на участках проводника, прилегающих к магнитопроводу. Следовательно, в проводнике произойдет перераспределение плотности тока по сечению, и ток будет стремиться протекать по стороне проводника, наиболее удаленной от магнитопровода. Таким образом, создание вокруг проводника разомкнутой магнитной цепи (магнитопровода) приводит к перераспределению тока по сечению проводника. В индукционном витке, изготовленном в виде кольца, можно заставить ток протекать не по внутренней, а по внешней стороне витка, поместив его в П-образный магнитопровод, открытой стороной обращенный к внешней части витка.

Индукторы, у которых виток помещен в П-образный магнитопровод с целью «выдавливания» электромагнитного поля, применяются для закалки внутренних отверстий непрерывно-последовательным способом. Ключевой особенностью такого метода закалки, является эффект «полосатости» из-за перепада температуры по высоте, связанный с автоколебаниями при переходе точки Кюри [2, 3], что в итоге приводит к неравномерной твердости закаленного слоя по высоте. В качестве вариантов решения данной проблемы можно рассматривать варьирование скорости вращения и скорости перемещения детали, а также увеличение толщины магнитопровода до некоторого предела (зависящего от режима обработки детали).

Наиболее эффективным способом получения равномерного температурного поля по сечению детали является управление скоростью движения детали и частотой ее вращения. При этом важно контролировать саму скорость и задавать ее такой, чтобы она позволяла получать и поддерживать на поверхности нужную температуру при распределении ее на требуемую глубину.

В настоящее время индукторы с магнитопроводом все чаще используются для поверхностного нагрева плоских поверхностей. Данная оснастка позволяет получать закаленные слои, которые отвечают требованиям конструкторской документации, путем создания равномерного температурного поля на поверхности обрабатываемой детали, так как именно от равномерности поля зависит конфигурация и твердость получаемого упрочненного слоя. Однако зачастую применение таких индукторов сдерживается проблемами разработки их оптимальных конструкций, позволяющих нагревать поверхности сложной формы.

Цель данной работы – поиск эффективных решений по разработке предназначенных для закаливания плоских поверхностей индукторов с учетом таких факторов, как: повышение срока службы хрупких элементов индуктора; получение требуемых свойств обрабатываемой поверхности с компенсацией эффекта изменения линейных размеров; получение закалочных структур на нужной глубине без дополнительных средств термообработки.

Методика исследования, материалы и оборудование. Моделирование электромагнитных и температурных полей выполнялось с помощью программы Elcut. Целью моделирования являлась оценка влияния конструкции магнитопровода, в частности высота его «ножек», на распределение электромагнитного поля для получения необходимой концентрации источников тепла в детали. Помимо этого, моделирование требовалось для оценки равномерности температурного поля в детали с применением индуктора предполагаемой конструкции. В качестве экспериментального образца использовалась деталь квадратного сечения 30×30 мм из стали марки 25ХГСА.

Конструирование индуктора авторами произведено с использованием лицензионной программы КОМПАС 3DV17. Для контроля твердости детали применен ультразвуковой твердомер марки ТКМ-459М. Подготовка микрошлифа осуществлена на установке Metcon MICRACUT 125. Структурный анализ полученных шлифов проведен на металлографическом комплексе AutoScan 3.

В качестве материала магнитопровода был выбран ферритовый сердечник марки Epcos E65 с шириной профиля 27 мм, который оптимально подходит для обработки детали шириной 30 мм.

Результаты работы и их обсуждение. Рассмотрим пример создания технологии индукционной термообработки длинномерной плоской детали типа «поперечина». Поперечина изготовлена из стали марки 25ХГСА и представляет собой стандартный профиль квадратного сечения шириной 30 мм и длиной 12 м. Для уменьшения величины изгиба профиля в результате появления послезакалочных сжимающих напряжений деталь приварена к стандартному швеллеру профиля 10П. В соответствии с требованиями чертежа на одной из ее поверхностей шириной 30 мм необходимо получить равномерный закаленный слой твердостью более 40 HRC и глубиной 1,2–2,0 мм.

Ширина профиля магнитопровода сознательно выбиралась меньше ширины обрабатываемой поверхности детали, что позволило исключить перегрев кромок и уменьшить перепад глубины закаленного слоя детали по сечению путем ослабления влияния краевого эффекта. При выборе и изготовлении магнитопровода особое внимание следует уделять величине зазоров между магнитопроводом и витком индуктора, а также между магнитопроводом и деталью. Немаловажным является и расположение магнитопровода на самом витке. Все эти конструктивные особенности влияют на формирование электромагнитного поля и на его концентрацию на поверхности детали.

Для обработки поперечины авторами спроектирован индуктор с магнитопроводом, представленный на рис. 1.

Известно, что высота «ножек» магнитопровода оказывает существенное влияние на концентрацию магнитного поля [4, 5]. На рис. 2, *a* показано, что в случае, когда высота «ножек» магнитопровода (L_1) превышает высоту витка индуктора, магнитные силовые линии обеспечивают необходимую величину магнитного потока в зоне нагрева, а при недостаточной высоте (L_2) происходит заметное рассеивание электромагнитного поля в окружающую среду (рис. 2, *b*), что приводит к снижению плотности тока в нагреваемой детали. В результате снижается интенсивность тепловыделения в обрабатываемой детали и увеличивается продолжительность нагрева.

Температурное поле рассматриваемых случаев представлено на рис. 3. Чрезмерное увеличение высоты ножки приводит к увеличению тепловыделения в зоне значительно меньшей, чем ширина индуктора с магнитопроводом (рис. 3, *a*). В результате при использовании двухвиткового индуктора в промежутке между витками будет наблюдаться падение температуры нагрева детали [5]. Более того, при столь малом зазоре между нагре-

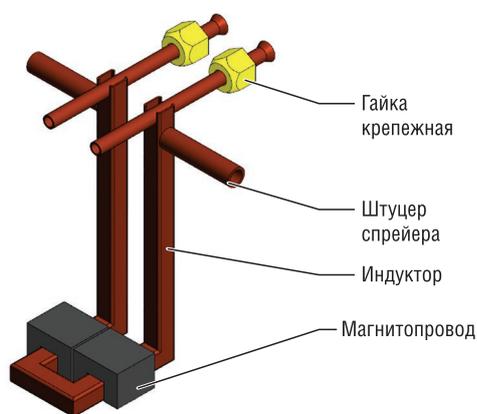


Рис. 1. Индуктор для термообработки детали типа «поперечина»

Fig. 1. Inductor for heat treatment of the cross beam

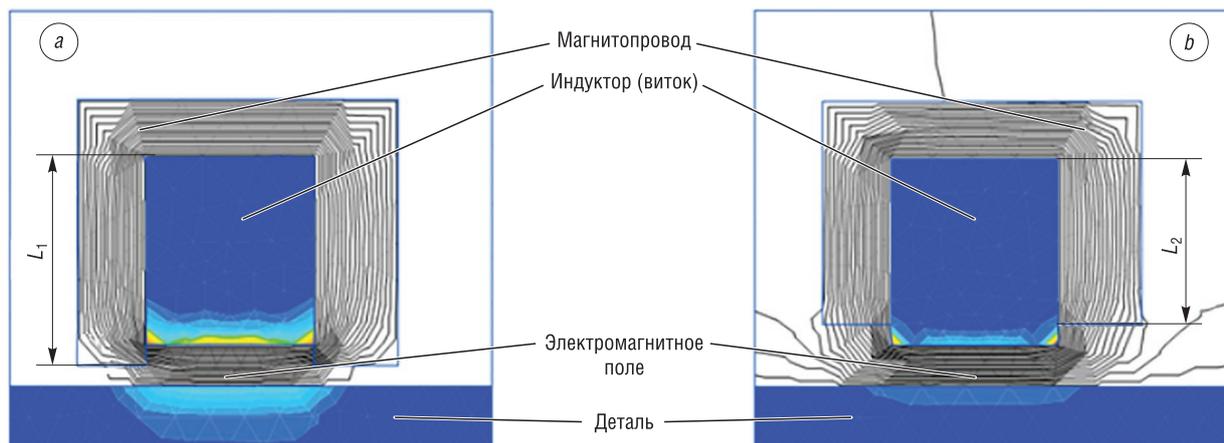


Рис. 2. Распределение электромагнитного поля индуктора при длине «ножки» магнитопровода: *a* – больше высоты профиля индуктора, *b* – меньше высоты профиля индуктора

Fig. 2. Distribution of the electromagnetic field of the inductor when the length of the “legs” of the flux concentrator: *a* – is greater than the height of the profile of the inductor, *b* – is less than the height of the profile of the inductor

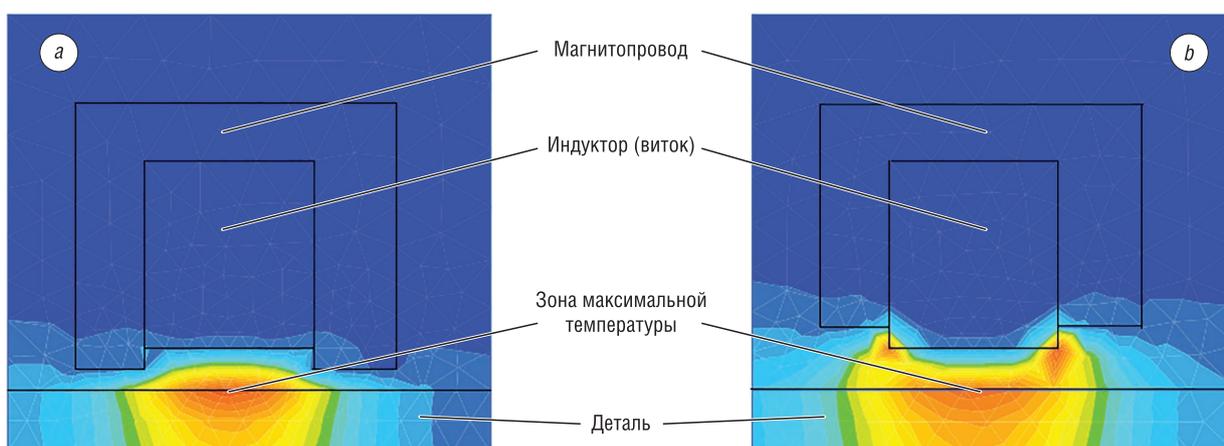


Рис. 3. Температурное поле при индукционном нагреве плоской поверхности при различной высоте ножки магнитопровода. Максимальная температура нагрева на поверхности детали: *a* – 931 °C, *b* – 137 °C

Fig. 3. Temperature field during induction heating of a flat surface at different heights of the legs of the flux concentrator. Maximum heating temperature on the surface of the material: *a* – 931 °C, *b* – 137 °C

ваемой деталью и магнитопроводом последний будет подвергаться излишнему нагреву излучением от детали, а контур охлаждения индуктора не сможет в должной мере отводить тепло. В итоге это приведет к тепловому разрушению магнитопровода.

Уменьшение высоты «ножки» приводит к снижению интенсивности нагрева практически в 5 раз (время нагрева детали одинаковое и равно 5 с). Наблюдается излишняя концентрация тепла на краях индуктора и магнитопровода из-за углового эффекта (рис. 3, *b*). Это может вызвать оплавление краев детали, при этом закаленный слой в середине детали получен не будет. При такой неравномерности электромагнитного поля в результате перегрева и эрозии может выйти из строя индуктор, а также высока вероятность разрушения магнитопровода сильным электромагнитным полем.

Наличие двух витков, осуществляющих нагрев, привело к следующему: первый виток обеспечивал предварительный прогрев детали, а второй виток-спрейер способствовал достижению на поверхности закалочной температуры и охлаждению детали потоком воды (рис. 4).

Если рассмотреть модель температурного поля, формируемого при нагреве данным индуктором, то полученная картина свидетельствует о достаточном прогреве детали на нужную глубину (рис. 5). Перепад температурного поля и уменьшение концентрации электромагнитного поля между ферритами является следствием разнонаправленного движения тока по виткам

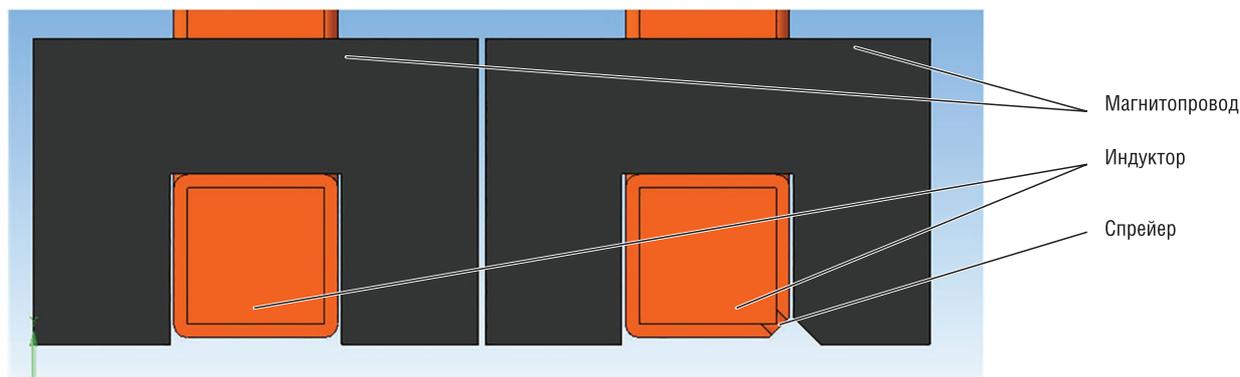


Рис. 4. Расположение витков и спейера в индукторе

Fig. 4. Location of the turns and cooler in the inductor

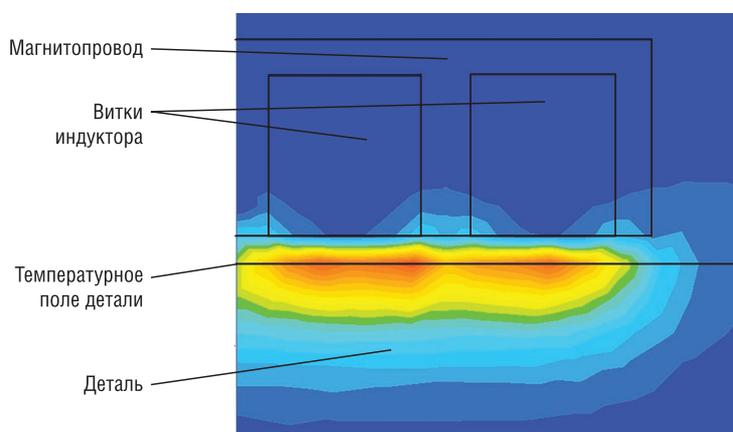


Рис. 5. Температурное поле при поверхностном нагреве поперечины

Fig. 5. Temperature field during surface heating of the cross beam

индуктора. Однако данный температурный градиент нивелируется за счет теплообмена внутренних слоев металла, а также движения заготовки.

Практическое применение результатов работы. На основе результатов расчетов изготовлен новый индуктор, который в своей конструкции имеет два рабочих витка с установленными на них магнитопроводами (см. рис. 1). Это обусловлено необходимостью упрочнения со скоростью не менее 5 мм/с и ограниченной 25 кВт мощностью портативного преобразователя, установленного на резцедержатель строгального станка с ходом станины 12 м, который использовался в качестве устройства, обеспечивающего непрерывно-последовательное перемещение индуктора относительно детали.

Как уже отмечалось, важным фактором стабильности технологии нагрева внешним электромагнитным полем является сохранение зазоров между обрабатываемой деталью и индуктором. В случае уменьшения зазора при обработке длиномерной детали из-за ее кривизны может произойти короткое замыкание витков на деталь, что приведет к выходу из строя оборудования или оплавлению детали. В случае увеличения зазора мы не получим необходимых свойств на поверхности.

Для устранения проблем с неравномерностью нагрева в конструкции индуктора предусмотрены компенсирующие ролики, которые катятся по детали, тем самым обеспечивая равномерный зазор. Кроме того, в конструкцию добавлен приставной спрейер с наклоном рабочей поверхности под углом 40°, позволяющий дополнительно охлаждать не только закаливаемую поверхность, но и боковые кромки, исключая тем самым самоотпуск детали. В итоге изготовлен индуктор, позволяющий получить необходимые свойства поверхности детали в результате процесса термообработки. Рабочий процесс закалки поперечины изготовленным индуктором представлен на рис. 6.

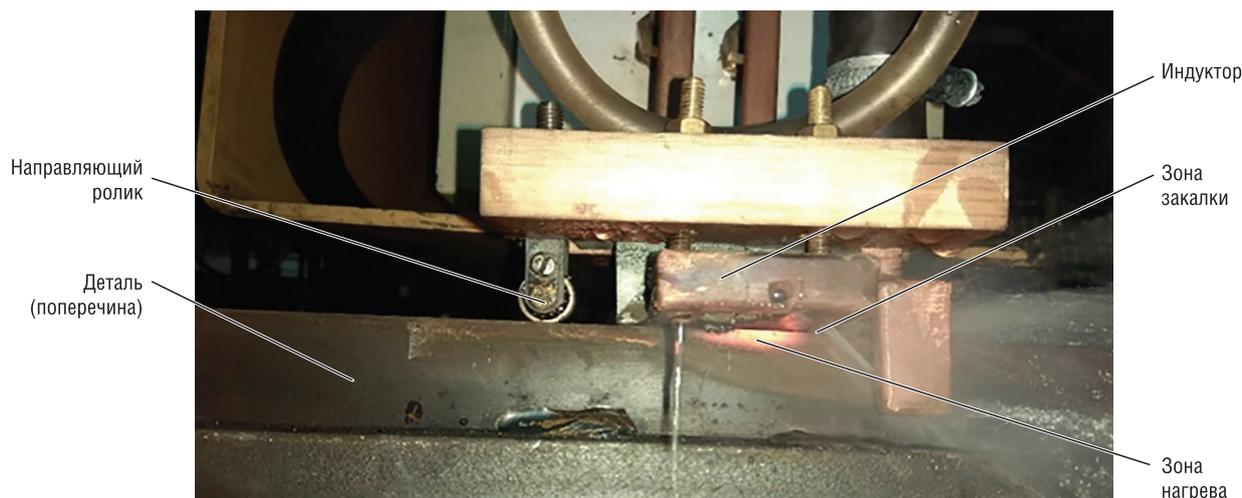


Рис. 6. Процесс закалки детали типа «поперечина» с использованием изготовленного индуктора

Fig. 6. The process of hardening parts of the cross beam type using a manufactured inductor

С использованием новой технологии и оборудования для закалки длинномерных плоских деталей внешним электромагнитным полем на заводе ОАО «Могилевлифтмаш» обработана опытная партия деталей. Макроструктурный анализ упрочненной детали показал, что упрочненный слой имеет равномерную глубину закалки по центру детали не менее 2 мм, на краях – 3,5 мм с твердостью поверхности 46–50 HRC (рис. 7).

Микроструктура упрочненного слоя показана на рис. 8. Упрочненный слой на глубину порядка 0,8–1,0 мм представляет собой гомогенный мартенсит (рис. 8, *b*). На глубине 1,0–1,6 мм в структуре слоя в мартенситной матрице начинают появляться включения нерастворившегося феррита, при этом их количество с глубиной возрастает (рис. 8, *c*). Переходная зона (рис. 8, *d*) представляет собой ферритно-перлитную основу с участком термического влияния и располагается на глубине 1,8–10,0 мм от поверхности детали.

Таким образом, в результате моделирования выявлены особенности нагрева под закалку плоских длинномерных деталей внешним электромагнитным полем методом непрерывно-последовательного индукционного нагрева, которые использованы при создании эффективных технологии и оборудования для получения равномерных по сечению упрочненных слоев с высокой твердостью поверхности.

В 2017 г. в Физико-техническом институте НАН Беларуси совместно с ОАО «Могилевлифтмаш» разработана уникальная технология, спроектирован специальный индуктор с магнитопроводом, изготовлена мобильная индукционная установка мощностью 25 кВт и проведена обработка токами высокой частоты длинномерных направляющих длиной до 12 м. Такие направляющие применяются в новых видах продукции – роторных парковках ПР-10, ПР-12 (рис. 9), на которых возможна парковка соответственно 10 и 12 автомобилей на площади, занимаемой двумя автомобилями.

По обработанным направляющим движется тяговая цепь, к которой закреплены поддоны с автомобилями. Поддоны являются важнейшим элементом безопасности,

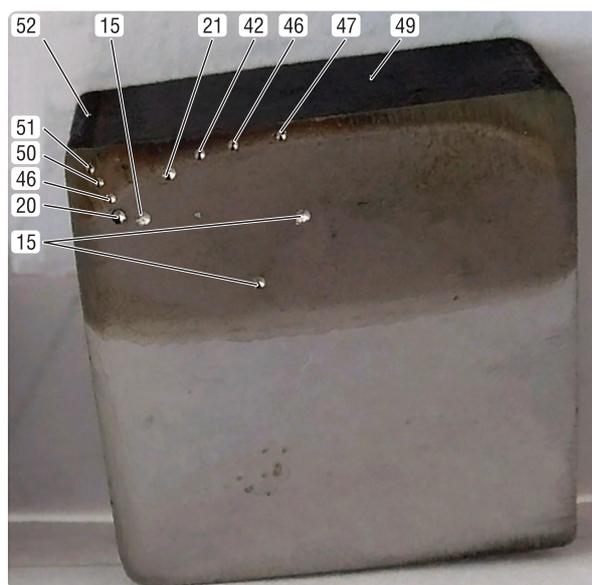


Рис. 7. Распределение твердости (HRC) упрочненного слоя детали «поперечина»

Fig. 7. The distribution of hardness (HRC) of the hardened layer of the part “cross beam”

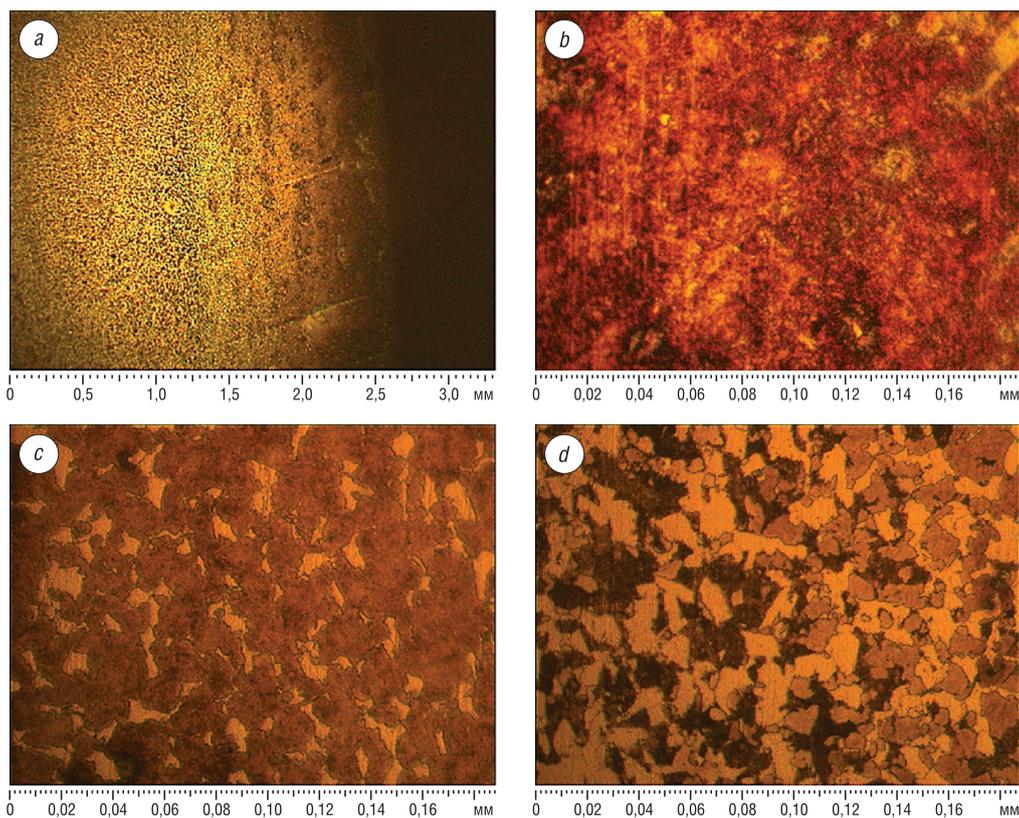


Рис. 8. Микроструктура упрочненного слоя детали: *a* – общий вид, *b* – на глубине 0,8–1,0 мм от поверхности детали, *c* – на глубине 1,0–1,6 мм от поверхности детали, *d* – на глубине 1,8–10,0 мм от поверхности детали

Fig. 8. The microstructure of the hardened layer: *a* – general view, *b* – at a depth of 0.8–1.0 mm from the surface of the part, *c* – at a depth of 1.0–1.6 mm from the surface of the part, *d* – at a depth of 1.8–10.0 mm from the surface of the part



Рис. 9. Парковочный комплекс
Fig. 9. Parking complex

позволяющим сохранить работоспособность парковки даже после разрушения одного звена цепи, поэтому к ним предъявляются высокие требования по прямолинейности (отклонение не более 1 мм на 1 м длины), прочности и износостойкости.

Для обработки партии деталей мобильная индукционная установка мощностью 25 кВт крепилась на резцедержатель строгального станка с ходом станины 12 м для непрерывно-последовательного перемещения детали относительно индуктора. Компьютерное моделирование распределения и концентрации электромагнитного и температурного полей на поверхности деталей обеспечило оптимизацию всех характеристик процесса и позволило создать эффективную технологию и оборудование, позволяющие получать на длинномерных изделиях равномерные по сечению упрочненные слои заданной на чертеже детали глубины и твердостью не менее 46–50 HRC.

Заклучение. На конкретном примере показаны результаты моделирования и конструирования индукторов под нагрев плоских длинномерных поверхностей. Обосновано применение двухвиткового одноконтурного индуктора, оснащенного магнитопроводом. Установлено, что слишком высокая интенсивность нагрева плоских деталей оказывает негативное влияние на прочностные характеристики угловой части деталей, приводящее к скачкообразным изменениям твердости в поперечном сечении детали.

Полученные результаты наглядно показывают полноту требований к технологическому процессу закалки плоских поверхностей. Важно не просто выполнять моделирование нагрева перед изготовлением индуктора, но и выявлять возможные неисправности или ошибки конструирования. Особенно это касается формы магнитопровода. При закалке плоских поверхностей необходимо учитывать деформирование изделия в виде коробления поверхности при отсутствии фиксации необрабатываемой части или же производить симметричную закалку с двух сторон, чем часто на производстве пренебрегают.

Список использованных источников

1. Стародубцев, Ю. Нанокристаллические магнитомягкие материалы / Ю. Стародубцев, В. Белозёров // Компоненты и технологии. – 2007. – № 4. – С. 240–242.
2. Неустойчивость при индукционном нагреве магнитной стали / С. В. Дзлийев [и др.] // Индукционный нагрев. – 2013. – № 1. – С. 36–41.
3. Автоколебания при сканирующем индукционном нагреве магнитной стали / С. В. Дзлийев [и др.] // Индукционный нагрев. – 2013. – № 2. – С. 37–43.
4. Слухоцкий, А. Е. Установки индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
5. Электрические печи и установки индукционного нагрева / И. И. Фомин, Л. М. Залутовский. – М.: Metallurgia, 1979. – 247 с.

References

1. Starodubtsev U., Belozerov V. Electric furnaces and induction heating plants. Nanocrystalline soft magnetic materials. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*, 2007, no. 4, pp. 240–242 (in Russian).
2. Dzljev S. N., Zavorotkin S. V., Zhnakin D. M., Pishalev K. E., Perevalov U. U. Instability during induction heating of magnetic steel. *Induktsionnyi nagrev [Induction Heating]*, 2013, no. 1, pp. 36–41 (in Russian).
3. Dzljev S. N., Zavorotkin S. V., Zhnakin D. M., Pishalev K. E., Perevalov U. U. Self-oscillations in scanning induction heating of magnetic steel. *Induktsionnyi nagrev [Induction Heating]*, 2013, no. 2, pp. 37–43 (in Russian).
4. Slukhotskii A. E., Nemkov V. S., Pavlov N. A. *Induction Heating Plants*. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 328 p. (in Russian).
5. Fomin I. I., Zalutovskii L. M. *Electric Furnaces and Induction Heating Units*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 247 p. (in Russian).

Информация об авторах

Веґера Иван Иванович – кандидат технических наук, доцент, заведующий отделом индукционных технологий и термической обработки, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: smto@tut.by

Зизико Александр Вячеславович – аспирант, заведующий сектором моделирования и опытно-конструкторских работ, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: canr-93@mail.ru

Цыкунов Павел Юрьевич – аспирант, младший научный сотрудник, лаборатория технологий и оборудования индукционного нагрева, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zamaranthz@mail.ru

Якович Виктор Максимович – магистрант, инженер-конструктор, лаборатория поверхностных методов модифицирования материалов, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zrjdbx@mail.ru

Information about the authors

Ivan I. Veģera – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Induction Technologies and Heat Treatments, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: smto@tut.by

Aliaksandr V. Zizika – Master of Engineering, Head of Sector of Modeling and Experimental-Design Works, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: canr-93@mail.ru

Pavel Yu. Tsykunou – Master of Engineering, Junior Researcher, Laboratory of Induction Heating Technology and Equipment, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zamaranthz@mail.ru

Viktor M. Yakovich – Bachelor of Technical Sciences, Design Engineer of the Laboratory Surface Methods of Materials Modification, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zrjdbx@mail.ru