



УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ТОНКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

О. Н. ШАБЛИЙ, д-р физ.-мат. наук, **Ч. В. ПУЛЬКА**, канд. техн. наук (Терноп. гос. техн. ун-т им. Ивана Пулюя),
А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
М. В. ШАРИК, инж. (Терноп. гос. техн. ун-т им. Ивана Пулюя)

Рассмотрены и проанализированы существующие конструкции индукторов для индукционной наплавки тонких плоских деталей, в том числе фасонных дисков. Описаны новые конструкции индукторов и нагревательные системы для индукционной наплавки тонких стальных дисков зубчатой формы, разработанные авторами с целью уменьшения энергоемкости, повышения производительности процесса наплавки и качества наплавленного металла.

Ключевые слова: индукционная наплавка, пайка, конструкции индукторов, нагревательная система, плоские детали, диски, эффективность наплавки, стальные и ферритные магнитопроводы, электромагнитное и тепловое экранирование

В различных областях народного хозяйства, в частности в сельскохозяйственной технике, в качестве рабочих органов землеобрабатывающих машин используют тонкие плоские детали, в том числе тонкие фасонные диски с зубчатой и сплошной рабочей поверхностью. С целью повышения износостойкости их рабочие поверхности наплавляют порошкообразными твердыми сплавами (шихта) с помощью токов высокой частоты. При этом толщина наплавленного металла составляет 0,3...2,5 мм. Для наплавки используют соответствующее оборудование: генераторы, устройства для закрепления деталей, засыпки шихты, механизмы для загрузки и разгрузки деталей до и после наплавки, а также индукторы.

Особые требования предъявляют к конструкциям индукторов, влияющим на энергоемкость, производительность процесса, а также качество наплавленного металла. Чаще всего их подбирают экспериментальным путем отдельно для каждой новой конструкции детали.

Мощность тепловых источников в зоне наплавки можно регулировать, как отмечено выше, путем выбора конструкции индукторов, их размеров и расстояния до детали. Но в некоторых случаях в зависимости от конфигурации поверхности, подлежащей наплавке, регулировать мощность по ширине зоны наплавки путем варьирования только конструкции индуктора очень сложно. Для этого необходимо разрабатывать иные способы и устройства для нагрева, нагревательные системы, с помощью которых возможно регулирование электромагнитного поля (мощности) в зоне наплавки. Анализ существующих конструкций индукторов и разработке новых конструкций и нагревательных систем посвящена данная работа.

Рассмотрим конструкции индукторов для индукционной наплавки и термообработки тонких плоских деталей, в том числе дисков.

В настоящее время существует большое количество разнообразных конструкций индукторов, используемых для нагрева деталей под закалку или наплавку. Тем не менее, постоянно изменяющаяся и увеличивающаяся номенклатура подвергаемых наплавке деталей, непрерывное совершенствование процесса требуют тщательного подбора или разработки специальных индукторов. Размеры и форма индукторов для индукционной наплавки разных деталей, а также параметры режима нагрева для каждой конкретной детали подбираются экспериментально.

Основная рабочая частота тока, при которой осуществляется наплавка тонких плоских деталей (в том числе дисков толщиной 2...6 мм) индукционным способом, составляет 440, а для большей толщины основного металла — 70 кГц.

На рис. 1, а представлен петлевой одновитковый индуктор для одновременной наплавки одного лезвия стрельчатых лап культиваторов при частоте тока 70 кГц. С целью повышения температуры нагрева на участке (толщиной 1,2 мм) лезвия верхняя ветвь индуктора смещена относительно нижней на 6 мм. Носовую часть лапы делают более

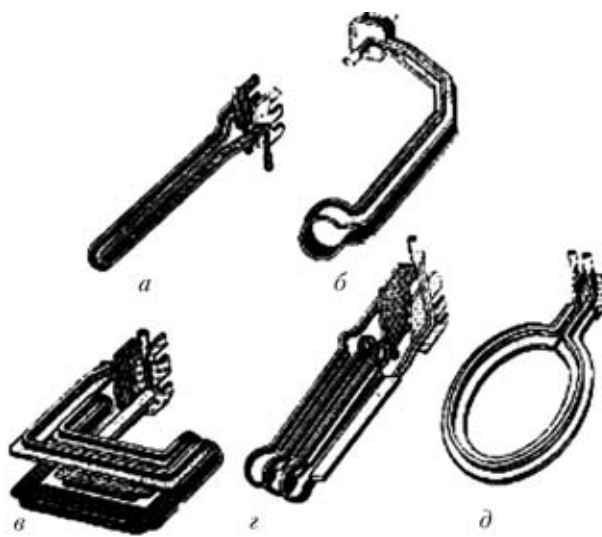


Рис. 1. Конструкции индукторов для наплавки тонких плоских деталей машин [1]

толстой, поэтому на участке для наплавки ее удлиняют. При этом отсутствует смещение веток. Базовой поверхностью для фиксации деталей в индукторе служит асбестоцементная плита.

На рис. 1, б показан петлевой индуктор для наплавки плужных лемехов. Кольцевое расширение служит для выравнивания распределения электромагнитного поля у полевого обреза лемеха и упрощения регулирования индуктора. Проходной индуктор (рис. 1, в) предназначен для наплавки плужных долотообразных лемехов на механизированных установках.

Трехвитковый овалный индуктор (рис. 1, г) используют для непрерывно-последовательной наплавки лопаток мельничных вентиляторов, а кольцевой одновитковый (рис. 1, д) — для наплавки режущих кромок дисков луцильников.

На рис. 2 показаны конструкции индукторов для пайки дисковых фрез, с помощью которых достигают необходимого распределения электромагнитного поля в зоне пайки [2]. Для термообработки и наплавки плоских рабочих поверхностей используют одно- и многовитковые индукторы, витки которых расположены в одной плоскости (рис. 3) [3].

Анализ описанных конструкций индукторов показал, что они имеют невысокий КПД из-за слабой связи электромагнитного поля индуктора и детали. Кроме того, в некоторых случаях из-за сложности геометрической формы поверхности, а также с учетом необходимости автоматизации технологического процесса наплавки регулировать мощность в зоне наплавки только путем варьирования конструкции индуктора (электромагнитного поля) недостаточно или очень сложно.

С целью уменьшения потерь за счет ограничения рассеивания электромагнитного поля и повышения его концентрации в зоне наплавки используют также магнитопроводы, применение которых при наложении на активные части индуктора с одной или двух сторон позволяет концентрировать электромагнитное поле на заданном участке наплавляемой поверхности детали.

Магнитопроводы изготавливают из листов трансформаторной стали или из ферритов. Сечение

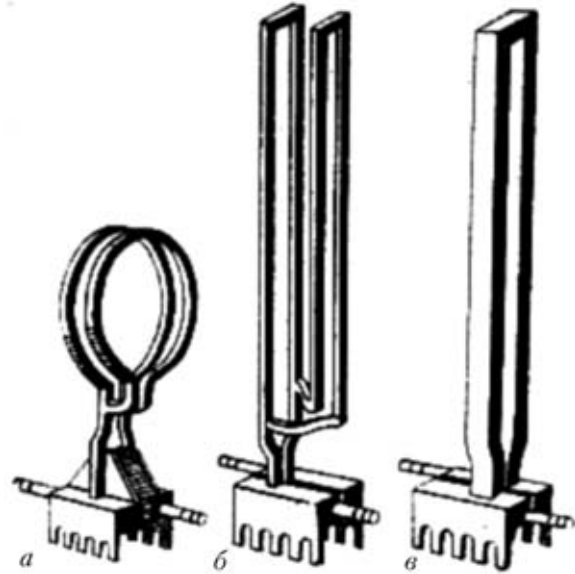


Рис. 2. Индукторы для пайки дисковых фрез [2]: а — с двумя витками, соединенными параллельно; б — прямоугольный с перевернутым параллельным витком (магнитные потоки в витках направлены встречно); в — петлевой

индуктирующего провода с магнитопроводом, изготовленным из трансформаторной стали, показано на рис. 4. Если применить такую индукционную систему, то концентрация тока под индуктором значительно повышается.

В работе [4] предложена новая конструкция магнитопровода, применение которого при наложении на активные части индуктора с одной или двух сторон позволяет концентрировать магнитное поле на заданном участке нагрева наплавляемой детали и повысить скорость наплавки более чем на 20 % по сравнению с наплавкой без магнитопровода.

При наплавке долотообразных лемехов в индукторах без магнитопроводов процесс расплавления шихты на носке отстает от такового на лезвии на 3...5 с. При наплавке с магнитопроводом зафиксировано опережение расплавления шихты на носке лемеха, что дает возможность механизировать или автоматизировать процесс наплавки лемехов.

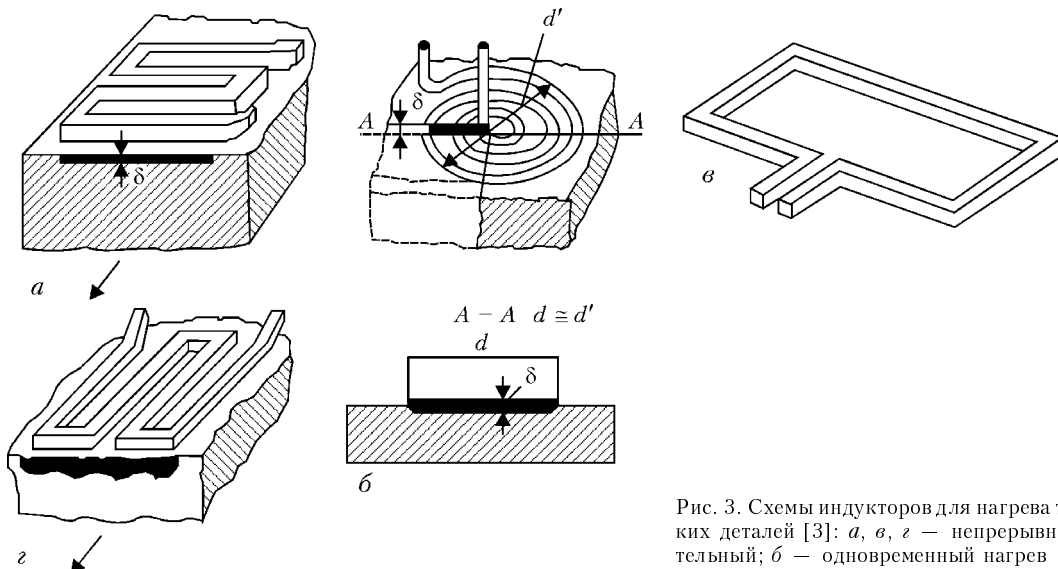


Рис. 3. Схемы индукторов для нагрева тонких плоских деталей [3]: а, в, г — непрерывно-последовательный; б — одновременный нагрев

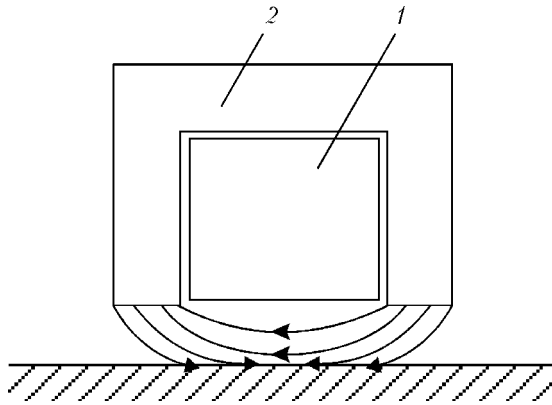


Рис. 4. Сечение индуктирующего провода (1) с магнитопроводом (2) из трансформаторной стали [4]

В данном случае магнитопроводы изготавливают в виде пакетов, собранных из пластин электротехнической тонкой листовой стали марки Э44 толщиной 0,1 мм. Принципиальная схема индуктора с магнитопроводом представлена на рис. 5. Использование такого магнитопровода позволяет значительно увеличить выпуск наплавляемых деталей при уменьшении потерь электроэнергии и сокращении времени на наплавку.

Магнитопроводы могут успешно применяться в оборудовании заводов тракторного и сельскохозяйственного машиностроения.

Технология индукционной наплавки тонких стальных дисков с использованием ферритного и стального магнитопроводов описана в работах [3, 4, 6]. На рис. 6 показана схема устройства для наплавки сплошных дисков с помощью ферритного магнитопровода [7]. Однако регулировать мощность в зоне наплавки тонких дисков зубчатой формы с шириной наплавки большей, чем высота зуба, с применением магнитопроводов также очень сложно.

Применение одновитковых кольцевых индукторов без магнитопровода и с магнитопроводом (рис. 1, *д*; 2, *в*; 6) для одновременной наплавки по всей рабочей поверхности тонких стальных дисков зубчатой формы с целью повышения производительности процесса вызывает сложности в обеспечении равномерности распределения электромагнитного поля в области наплавки, что негативно влияет на качество (равномерность) толщины наплавленного металла.

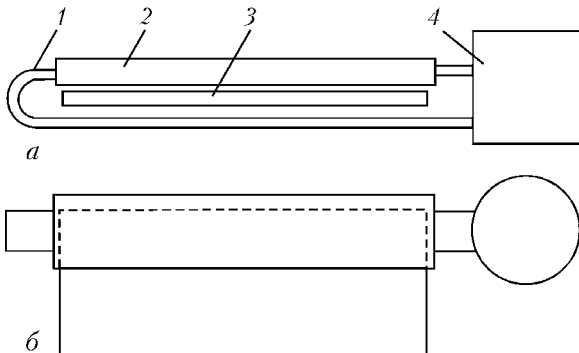


Рис. 5. Схема индуктора с магнитопроводом [5] сбоку (а) и сверху (б): 1 — петля индуктора; 2 — магнитопровод; 3 — деталь; 4 — высокочастотный генератор

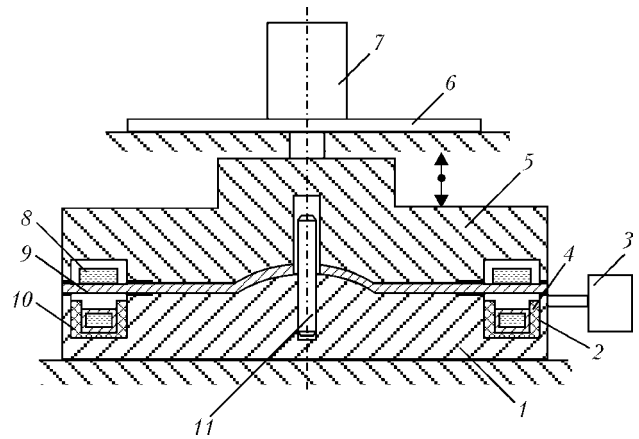


Рис. 6. Схема устройства для наплавки дисков с использованием ферритного магнитопровода [7]: 1, 5 — соответственно нижняя и верхняя прижимные плиты; 2 — медный электромагнитный экран; 3 — высокочастотный генератор; 4 — ферритный магнитопровод; 6 — верхняя опора; 7 — пневмопривод; 8 — порошкообразный твердый сплав; 9 — сплошной тонкий диск; 10 — кольцевой одновитковый индуктор; 11 — направляющая

Недостатками двухпетлевого индуктора, как и сегментного, являются: сравнительно низкая производительность, коробление детали из-за местного нагрева, а также невозможность использования его для одновременной наплавки по всей рабочей поверхности тонких дисков зубчатой формы с шириной наплавки большей, чем высота зуба.

Известные двухвитковые (см. рис. 2, *а*) индукторы с одинаковым диаметром колец не позволяют использовать их при механизации процесса наплавки фасонные диски зубчатой формы с выступом в средней его части.

Авторами разработаны двухвитковые кольцевые индукторы (рис. 7) [8, 9] с разными диаметрами кольцевых витков и площадями их поперечных сечений прямоугольной и круглой формы. При этом диаметр нижнего витка расположен под, а верхнего — над наплавляемой поверхностью (рис. 7). Соответственно диаметр нижнего витка меньше, а верхнего больше диаметра диска; площадь поперечного сечения нижнего витка

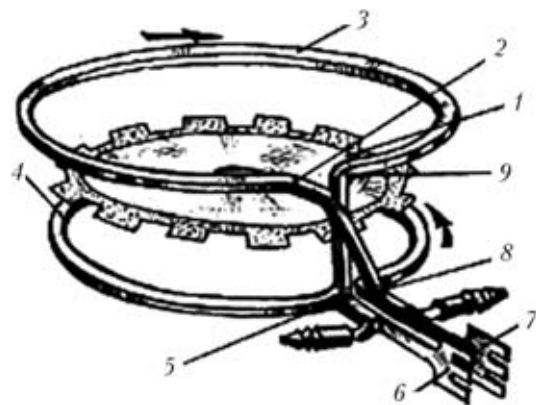


Рис. 7. Двухвитковый кольцевой индуктор для наплавки тонких дисков зубчатой формы с прямоугольным одинаковым поперечным сечением и разными диаметрами витков [8, 9]: 1 — диск; 2 — место соединения конца верхнего витка 3 с нижним витком 4; 5 — место соединения нижнего витка со штуцером для подачи воды; 6, 7 — соответственно левая и правая клемма; 8 — место соединения нижнего витка со штуцером для отвода воды; 9 — место соединения верхнего витка с нижним

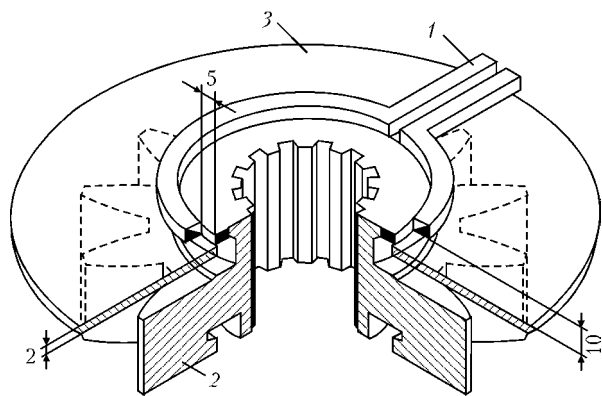


Рис. 8. Схема взаимного расположения индуктора (1), шестерни (2) и электромагнитного экрана (3) в процессе индукционного нагрева буртика шестерни для отпуски [3]

ка больше площади поперечного сечения верхнего витка. Это создает возможность для автоматизации процесса подачи заготовок сверху при засыпке шихты и наплавке диска.

Разработаны математическая модель и алгоритм, построены графические зависимости и табличные данные, по которым подбираются конструктивные размеры двухвиткового кольцевого индуктора для произвольных диаметров дисков и ширины зоны наплавки с учетом требований технологии. Проведены инженерные результаты расчетов, опубликованные в работах [10, 11].

Как показали теоретические и экспериментальные исследования, при наплавке тонких дисков зубчатой формы с шириной большей, чем высота зуба, с помощью двухвиткового кольцевого индуктора происходит перегрев торца диска и наплавленного металла, что сказывается в целом на качестве изделия.

В практике индукционного нагрева с целью обеспечения необходимого распределения мощности по ширине зоны наплавки, а также для защиты отдельных участков детали от перегрева при воздействии электромагнитного поля используют экраны. Их изготавливают, как правило, из красной меди с высокими значениями электро- и теплопроводности и успешно используют, например, при высокочастотном нагреве для отпуски буртиков шестерен коробки смены передач [3]. На рис. 8 показано взаимное расположение индуктора 1, шестерни 2 и экрана 3 в процессе индукционного нагрева.

Технология индукционного нагрева с использованием экранирования электромагнитных полей использована авторами при разработке технологии индукционной наплавки тонких дисков зубчатой формы для уменьшения выделения мощности на торце диска и равномерного ее распределения по ширине зоны наплавки [12]. В работе [12] проведены теоретические исследования системы по оптимизации конструктивных размеров двухвиткового кольцевого индуктора с учетом только экранирования электромагнитных полей при принятых значениях коэффициентов экранирования $K = 1$, $K = 0,25$, $K = 0$.

С целью регулирования мощности в зоне наплавки тонких дисков авторами предложено применение экранирования электромагнитного поля,

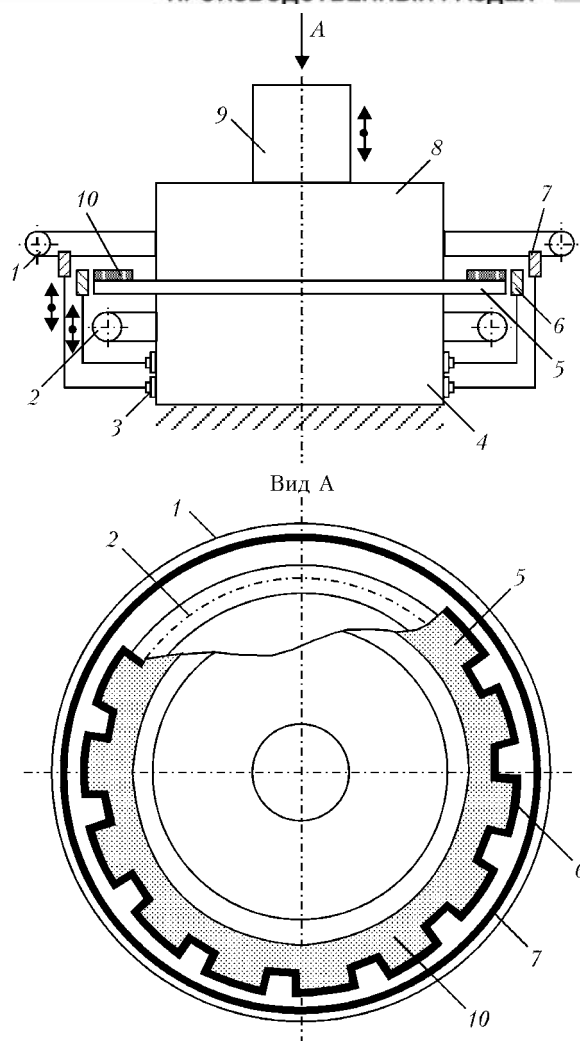


Рис. 9. Схема устройства для регулирования мощности в зоне наплавки с одновременным экранированием электромагнитных и тепловых полей [13]: 1, 2 – верхний и нижний виток индуктора; 3 – механизм перемещения экранов; 4 – нижняя плита; 5 – диск; 6, 7 – соответственно тепловой и электромагнитный экраны; 8 – верхняя плита; 9 – пневмопривод; 10 – шихта

создаваемого индуктором, для достижения равномерного распределения мощности в зоне наплавки [12]. Однако, как показали теоретические и экспериментальные исследования, наиболее эффективное распределение мощности по ширине зоны наплавки достигается с учетом одновременно как электромагнитного, так и теплового (теплоизоляция торца диска с окружающей средой) экранирования. Для этого разработано устройство [13], позволяющее регулировать мощность в зоне наплавки с учетом одновременно как электромагнитного, так и теплового экранирования, во-первых, с целью достижения равномерной толщины наплавленного металла, а во-вторых, реализации возможности автоматизации технологического процесса индукционной наплавки тонких дисков зубчатой формы.

В работе [14] описана математическая модель нагревательной системы (рис. 9), предназначенная для определения температуры в диске по параметрам двухвиткового кольцевого индуктора, с помощью которого осуществляется нагрев. Использование комбинированного электромагнитного и



теплового экранирования позволяет оптимизировать указанную температуру в зоне наплавки диска в зависимости от параметров индуктора, диска, электромагнитного и теплового экранов, а также электрического тока в индукторе. Разработанный алгоритм позволяет также проектировать нагревательную систему (индуктор, тепловой и электромагнитный экраны), обеспечивающую необходимые условия для выполнения технологического процесса наплавки, включая методику определения коэффициентов электромагнитного и теплового экранов, посредством которых осуществляется регулирование распределения температуры по ширине зоны наплавки со сложной геометрической формой поверхностей.

Полученные результаты расчета и экспериментальные данные разработанными авторами нагревательной системы показали возможность соблюдения необходимого закона распределения температуры по ширине зоны наплавки с целью достижения равномерной толщины наплавленного металла при наплавке ножей ботворезов зубчатой формы с шириной зоны большей, чем высота зуба. При этом экономится 15...25 % электроэнергии с использованием режима нагрева во времени по экспоненциальному закону.

Таким образом, анализ существующих конструкций индукторов показал, что наиболее эффективно технологический процесс одновременной индукционной наплавки по всей рабочей поверхности тонких стальных дисков зубчатой формы осуществляется при использовании нагревательной системы, состоящей из индуктора, теплового и электромагнитного экранов.

1. *Ткачев В. Н.* Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. — М.: Машиностроение, 1971. — 264 с.

Existing designs of inductors for induction surfacing of thin flat parts, including shaped discs, are considered and analyzed. New designs are described of inductors and heating systems for induction surfacing of toothed thin steel discs, developed by the authors to reduce the energy content, to improve surfacing process efficiency and deposited metal quality.

2. *Вологдин В. В.* Пайка и наплавка при индукционном нагреве. — М.; Л.: Энергия, 1965. — 92 с.
3. *Лозинский М. Г.* Промышленное применение индукционного нагрева. — М.: Изд-во АН СССР, 1958. — 472 с.
4. *Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е.* Индукторы для индукционного нагрева. — Л.: Энергия, 1974. — 264 с.
5. *Ниловский И. А., Суворов В. А., Степанец А. Е.* Повышение производительности индукционной наплавки рабочих органов сельскохозяйственных машин // Реф. сб. «Свароч. пр-во». Сер. Технология и автоматизация производственных процессов. — 1973. — Вып. 1. — С. 24–26.
6. *Расчет индуктора с магнитопроводом для нагрева плоских поверхностей изделий* / А. С. Письменный, Е. А. Пантелеймонов, А. С. Прокофьев, Ч. В. Пулька // Автомат. сварка. — 2000. — № 11. — С. 39–43.
7. *Шаблій О. М., Пулька Ч. В.* Дослідження індукційного наплавлення тонких фасонних дисків з використанням магнітопроводу // Вісн. Тернопіл. держ. ун-ту. — 2002. — 7, № 4. — С. 77–80.
8. *Пат. 55349 Україна, МПК В 23 К 13/00.* Спосіб наплавлення тонкостінних фасонних дисків / Ч. В. Пулька, О. М. Шаблій, Б. П. Будзан, В. М. Скічило. — Опубл. 17.03.2003; Бюл. № 3.
9. *Пат. 55346 Україна, МПК В 23 К 13/00.* Пристрій для наплавлення плоских тонкостінних деталей / Ч. В. Пулька, О. М. Шаблій, Б. П. Будзан. — Опубл. 17.03.2003; Бюл. № 3.
10. *Шаблій О. Н., Пулька Ч. В., Будзан Б. П.* Пути экономии электроэнергии при индукционной наплавке тонкостенных дисков // Автомат. сварка. — 1988. — № 12. — С. 56–58.
11. *Шаблій О. Н., Пулька Ч. В., Письменный А. С.* Оптимизация конструктивных параметров индуктора для индукционной наплавки тонких стальных дисков // Там же. — 1997. — № 6. — С. 17–24.
12. *Шаблій О. Н., Пулька Ч. В., Письменный А. С.* Оптимизация параметров индуктора для равномерного нагрева дисков по ширине зоны наплавки с учетом экранирования // Там же. — 2002. — № 11. — С. 24–26.
13. *Пат. 58943А, Україна, МПК В 23 К 13/00.* Пристрій для регулювання потужності в зоні наплавлення / О. М. Шаблій, Ч. В. Пулька, О. С. Письменный та ін. — Опубл. 17.11.2003; Бюл. № 11.
14. *Шаблій О. Н., Пулька Ч. В., Письменный А. С.* Оптимизация индукционной наплавки тонких дисков с учетом теплового и электромагнитного экранирования // Автомат. сварка. — 2003. — № 9. — С. 22–25.

Поступила в редакцию 11.01.2004,
в окончательном варианте 28.01.2004