

**Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, А.Ю. Бондаренко**

*Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт», Украина*

## **ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК**

Проведен анализ существующих методов магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов, предложенных мировыми промышленными фирмами. Дана краткая характеристика индукторных систем прямого пропускания тока и индукционных систем, разработанных в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт», и приведены результаты их экспериментальной апробации.

**магнитно-импульсное притяжение, электродинамические усилия, индукторная система, экран, листовая заготовка, магнитно-импульсная установка**

Разработки инструментов для магнитно-импульсного притяжения листовых металлов инициированы производственными операциями по реставрации кузовных покрытий легковых автомобилей и корпусов самолётов. Речь идёт о выравнивании металлических поверхностей с вмятинами, появляющимися по тем или иным причинам в процессе эксплуатации. Причём, как показывает опыт, наибольший интерес вызывает возможность применения, так называемой, внешней рихтовки без разборки корпуса и нарушения существующего лакокрасочного покрытия [1].

Следует отметить, что фирмой «Beulentechnik AG» (Швейцария) предложен довольно обширный ряд механических способов внешней рихтовки вмятин в автомобильных кузовах [2]. Однако, их практическое осуществление требует очень высокой квалификации исполнителя и не обладает достаточной надёжностью с точки зрения сохранности ремонтируемого элемента. Последнее замечание означает, что в процессе реставрации возможно и его разрушение.

Наиболее реальными для практики представляются магнитно-импульсные комплексы для внешней рихтовки корпусов самолётов, созданные на протяжении последних 35...40 лет фирмами «Boeing» и «Elec-

---

troimpact» (США) [3]. Физический принцип, положенный в их основу сводится к использованию «медленного» и «быстрого» магнитных полей. Первое свободно проникает сквозь обрабатываемый металл. Второе, вследствие достаточно высокой частоты, концентрируется в рабочей зоне индуктора-инструмента. Суперпозиция этих полей позволяет достичь притяжения заданного участка с вмятиной в течение определённого временного интервала. Для практической реализации данного предложения необходимы два источника электромагнитной энергии, достаточно сложные высоковольтные системы управления и синхронизации генерируемых токовых импульсов. Эти факты существенно снижают надёжность работы комплекса для устранения вмятин в целом и значительно увеличивают его стоимость.

Задача о притяжении листовых металлов с помощью силового воздействия со стороны электромагнитных полей может быть решена и с использованием самых разнообразных технических решений, выдвинутых в разное время разными авторами и отличных от вышеупомянутых предложений фирм «Boeing» и «Electroimpact» (США).

К таковым, например, можно отнести различные вариации способа, описанного в монографии [4] и заключающегося в создании медленно нарастающего магнитного поля, резко прерываемого при достижении заданного уровня напряжённости. При этом в обрабатываемой заготовке наводятся вихревые токи, экранирующие внутреннее поле и препятствующее его уменьшению. Направление индуцированных токов таково, что возникающие электродинамические усилия притягивают заготовку к индуктору, вызывая её деформирование.

Разработки в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт», появляются на страницах научной периодики, начиная с 2004 года [5 – 10]. Апробированные технические решения по практической реализации выполненных разработок защищены патентами [6, 7].

Здесь следует упомянуть впервые экспериментально обнаруженное явление, сущность которого состоит в изменении направления электродинамического силового воздействия на тонкостенные листовые металлы при вариации рабочей частоты токового импульса в обмотке инструмента-

---

индуктора. Так, в диапазоне «условно» высоких частот имело место известное в традиционной магнитно-импульсной обработке металлов отталкивание заготовки от индуктора. При понижении частоты до определённого значения часть обрабатываемого листа, находящаяся под рабочей зоной индуктора, притягивалась. При проведении экспериментов лист с вмятиной размещался выпуклостью наружу по отношению к индуктору. Силовое воздействие со стороны низкочастотного магнитного поля приводило к выравниванию поверхности деформированного листа [9, 10].

Все вероятные гипотезы о природе обнаруженного эффекта находятся в стадии теоретической и экспериментальной проработки. Понимание физики протекающих процессов позволит создавать рабочие инструменты для выполнения производственных операций не только по устранению вмятин, но и технологий комбинированного плана, осуществляющих электромагнитную формовку изделий, как отталкиванием, так и притяжением заданных участков обрабатываемого объекта.

Однако, в рамках настоящей работы ограничимся описанием принципиальных аспектов применимости лишь определённого класса магнитно-импульсных методов притяжения, представляющих собой технические решения, в основе которых лежит закон Ампера о силовом взаимодействии параллельных проводников с токами.

Наиболее простое и технически реализуемое предложение использует, так называемое «прямое пропускание» тока через обрабатываемый объект. Это решение предполагает непосредственный электрический контакт с листовым металлом в заданной зоне притяжения.

В соответствии со схемой на рис. 1, токопровод индуктора и участок объекта обработки подключаются к источнику мощности (магнитно-импульсная установка). В такой схеме они представляют собой параллельные проводники, по которым текут одинаково направленные токи. Их взаимодействие приводит к появлению мощных электродинамических усилий, расчет которых приведен в работе [11]. Если токопровод индуктора прочно зафиксирован, то деформации будет подвержен участок листового металла, который должен притягиваться к индуктору.

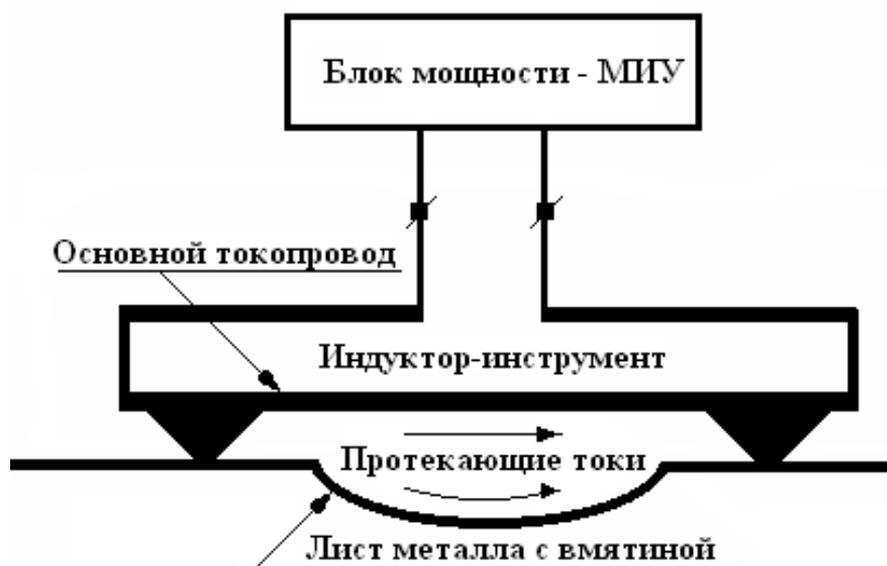


Рис. 1. Индукторная система с прямым пропуском тока через обрабатываемый объект

Индукторная система с электрическими контактами в заданной зоне притяжения листового металла была апробирована экспериментально на магнитно-импульсной установке МИУ-15. В качестве объекта обработки были взяты стальные пластины с толщиной  $0,5 \div 0,8$  мм. Было зафиксировано частичное выравнивание вмятин диаметром  $25 \div 30$  мм. Их глубина уменьшалась от 1,5 до  $0,5 \div 0,6$  мм.

Безусловно, данная схема индукторной системы для выравнивания вмятин в листовых металлах наряду с достоинствами (это простота конструкции инструмента, наличие одного источника мощности и др.) обладает и недостатком, связанным с наличием электрических контактов в зоне притяжения. Этот факт существенно снижает значимость данного предложения в практическом использовании.

Более перспективными и практичными представляются решения, не требующие никаких электрических или механических контактов в заданной зоне притяжения поверхности листового металла. Их практическая реализация также предполагает взаимное притяжение проводников с индуцированными сигналами одинакового направления. Фактически, это тот же принцип, что и в схеме с «прямым пропуском» тока в зоне притя-

жения, но есть и существенное отличие. Вместо «прямого пропускания» тока через металл обрабатываемого объекта в нём возбуждаются токи Фуко от дополнительного элемента – экрана. Индукторные системы такого типа были названы индукционными индукторными системами. Принцип действия этих инструментов для магнитно-импульсного притяжения заданных участков поверхности тонкостенных листовых заготовок можно раскрыть с помощью схемы на рис. 2.

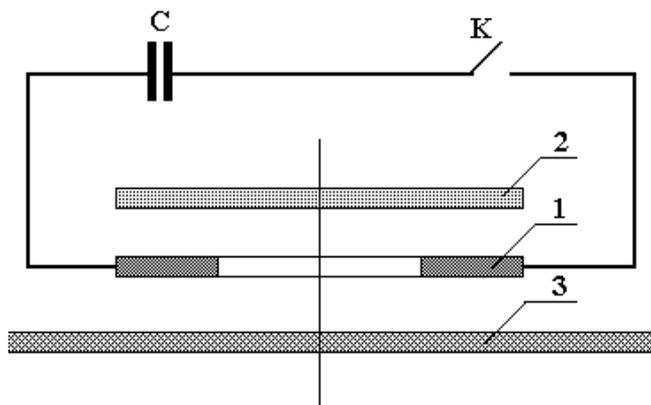


Рис. 2. Индукционная индукторная система

Конструктивно, такая система может включать плоский одновитковый цилиндрический соленоид-индуктор – 1; дополнительный элемент, обеспечивающий возникновение сил притяжения, это экран – 2 и листовую заготовку – 3, определённый участок которой следует деформировать в направлении к поверхности индуктора. Все три составляющие укладываются параллельными слоями: экран – индуктор – листовая заготовка. Последняя размещается так, чтобы участок, подлежащий деформированию, находился в рабочей зоне системы.

Индукционная индукторная система работает следующим образом. Предварительно заряженный емкостной накопитель энергии – С, после срабатывания коммутатора – К, разряжается в цепи с подключённым индуктором – 1. Протекание тока в витке индуктора возбуждает вихревые токи в экране и листовой заготовке. Направления этих токов одинаковы. В соответствии с законом Ампера, при фиксированном положении индуктора и экрана заготовка будет притягиваться в направлении к рабочей поверхности индуктора.

---

Необходимо подчеркнуть обязательное условие практической работоспособности индукционных индукторных систем. Как следует из физического осмысления закона Ампера, силовое взаимодействие между плоскими проводящими листами, в металле которых возбуждаются одинаково направленные индуцированные токи, возможно лишь в режиме интенсивного проникновения электромагнитного поля индуктора сквозь эти листы. Только в этом случае при нулевом поле между ними возникают силы магнитного давления извне, обуславливающие их взаимное притяжение.

Если, например, требуется устранить вмятину в металлическом листе, её следует расположить в области под витком индуктора, которая в дальнейшем будет называться рабочей зоной системы. Тогда силовое взаимодействие индуцированных токов позволит притянуть соответствующий участок этого листа к плоскости жёсткой поверхности индуктора и устранить вмятину.

На первый взгляд из априорных физических соображений предпочтительной представляется система, в которой экран и обрабатываемая листовая заготовка абсолютно идентичны (металл, толщина одинаковы). Они находятся на одинаковом расстоянии от индуктора-источника магнитного поля. Система симметрична как с геометрической, так и электродинамической точек зрения. Индуцируемые вихревые токи должны быть равными. Как следует из математической формулировки закона Ампера, они должны обеспечивать возбуждение наибольших сил электродинамического взаимодействия.

Для проведения модельных экспериментов была изготовлена индукционная индукторная система с одним витком цилиндрической геометрии и плоским дополнительным экраном из стального листа толщиной  $\sim 1$  мм. Система подключалась к выходу магнитно-импульсной установки МИУ-20.

Результаты экспериментов по притяжению участка плоской заготовки к индуктору при рабочей частоте магнитно-импульсной установки  $\sim 5$  кГц и запасённой энергии ёмкостного накопителя  $\sim 7$  кДж представлены на рис. 3.

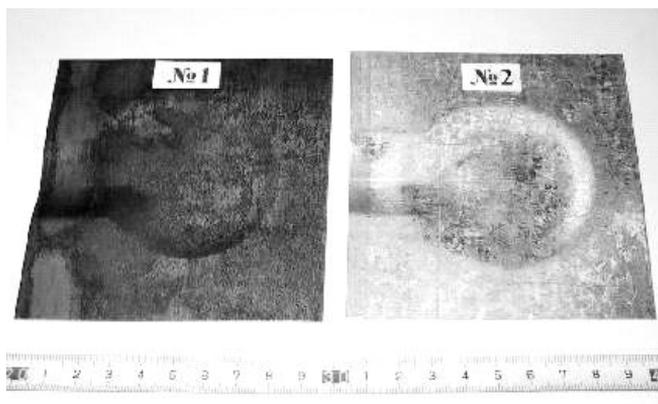


Рис. 3. Экспериментальные образцы из различных марок сталей толщиной 1 мм после воздействия на них импульса магнитного поля индукционной индукторной системы

Заканчивая изложение вопросов принципиальной действенности разработок методов и инструментов для магнитно-импульсного притяжения заданных участков листовых металлов, выполненных в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт», следует выделить основные направления работ проводимых в настоящее время:

- повышение эффективности индукционных индукторных систем за счет изменения геометрии основных конструктивных составляющих (виток индуктора, дополнительный экран и др.) и создание работоспособных инструментов, позволяющих проводить эффективную рихтовку элементов автомобильных кузовов;
- исследование физики процессов притяжения металлических листовых заготовок в диапазоне низкочастотных магнитных полях и разработка оборудования и технологии для решения широкого класса производственных задач.

### Литература

1. Бажинов А.В., Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А. Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности // Сб. науч. тр. Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Х.: ХНАДУ, 2005. – Вып. 16. – С.349-353.

2. Материалы компании «Beulentechnik AG» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.beulentechnik.com>.
3. Материалы компании «Electroimpact» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.electroimpact.com>.
4. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. – Л: Энергоиздат, 1981. – 199 с.
5. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2004. – №2. – С. 80-84.
6. Пат. 74909 України, МПК В21Д26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Ю.В. Батигін, В.І. Лавінський, В.Л. Хавін. – № 2004010542; Заявл.26.01.04; Опубл. 15.02.06, Бюл. № 2.
7. Пат. 775676 України, МПК В21Д26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Ю.В. Батигін, В.І. Лавінський, В.Л. Хавін, Л.Т. Хименко.– № 2004010512; Заявл. 23.01.04; Опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.
8. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий; 2-е изд., перераб. и доп. – Х.: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.
9. Batygin Yu.V., Lavinsky V.I., Khimenko L.T. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field // *Proc. of the 1<sup>st</sup> International Conference on High Speed Metal Forming*. –Dortmund, Germany, 2004. – P.157-160.
10. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Изменение направления силового воздействия на проводник при вариации частоты действующего магнитного поля // *Вестник науки и техники*. – 2004. – № 2-3 (17-18). – С.18-22.
11. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю. Анализ электродинамических усилий в системе плоский индуктор прямого пропускания тока – обрабатываемая заготовка // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Х.: НТУ „ХПІ”, 2006. – № 37. Тем. вип. „Техніка і електрофізика високих напруг. – С. 55-62.

*Поступила в редакцию 12.06.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.В. Рудаков, Национальный политехнический университет «ХПИ», Харьков.