

Содержание

Введение	3
1 Физические основы прямого магнитоимпульсного воздействия	4
1.1 Возникновение силы и передача энергии заготовке.....	4
1.2 Электропроводность и глубина проникновения поля	5
2 Способы интенсификации процессов листовой штамповки	6
2.1 Формование листа распределённым импульсом	6
2.2 Локальное воздействие при механической вытяжке	6
2.3 Управление осевой и радиальной составляющими силы	7
2.4 Многоимпульсное и инкрементальное формование	8
3 Параметры процесса и оценка его эффективности	10
3.1 Энергия разряда и магнитное давление	10
3.2 Геометрия заготовки и условия закрепления.....	11
3.3 Точность, тепловая нагрузка и повторяемость	12
Заключение	14
Список использованных источников	15

Введение

При изготовлении листовых деталей технологические возможности штамповки ограничиваются не только усилием прессы. Заготовка может разрушиться в углу или на радиусе перехода, хотя другие участки ещё почти не деформированы. Поэтому увеличение глубины детали требует управления течением металла: необходимо вовлечь в деформацию менее нагруженные зоны и уменьшить локальное утонение. Одним из способов решения этой задачи служит непосредственное воздействие импульсного магнитного поля на проводящий лист.

Магнитоимпульсная обработка позволяет кратковременно приложить распределённые электромагнитные силы к выбранной области заготовки. Такое воздействие можно использовать самостоятельно либо сочетать с механическим перемещением инструмента. В отличие от обычного изменения усилия прессы, здесь появляется возможность отдельно задавать место и момент дополнительного нагружения [1; 3].

Цель реферата — рассмотреть способы прямой магнитоимпульсной интенсификации листовой штамповки и определить условия их рационального применения. Для достижения цели раскрываются физический механизм воздействия, основные технологические схемы, влияние параметров процесса и ограничения, установленные в исследованиях. Под прямым воздействием далее понимается приложение электромагнитной силы непосредственно к деформируемой заготовке. Схемы с отдельным проводящим толкателем используются только для пояснения отличий.

Обзор основан на отечественных и зарубежных публикациях. Особое внимание уделено различию между увеличением глубины формования, улучшением распределения деформаций и повышением точности: достижение одного из этих результатов ещё не означает одновременного улучшения остальных.

1 Физические основы прямого магнитоимпульсного воздействия

1.1 Возникновение силы и передача энергии заготовке

Основные элементы системы — источник зарядки, конденсаторная батарея, коммутатор и индуктор. После замыкания разрядной цепи ток в индукторе быстро изменяется и создаёт переменное магнитное поле. В расположенном рядом металлическом листе возникают вихревые токи. Их взаимодействие с магнитным полем вызывает объёмную электромагнитную силу. Для проводящей немагнитной заготовки её плотность описывается выражением:

$$\mathbf{f}_v = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

где f_v — плотность силы, Н/м³; J — плотность электрического тока, А/м²; B — магнитная индукция, Тл. Векторы определяют не только величину, но и направление воздействия. В распространённой схеме с плоским индуктором результирующая сила отталкивает лист от катушки; на противоположной стороне располагают формообразующую матрицу [1].

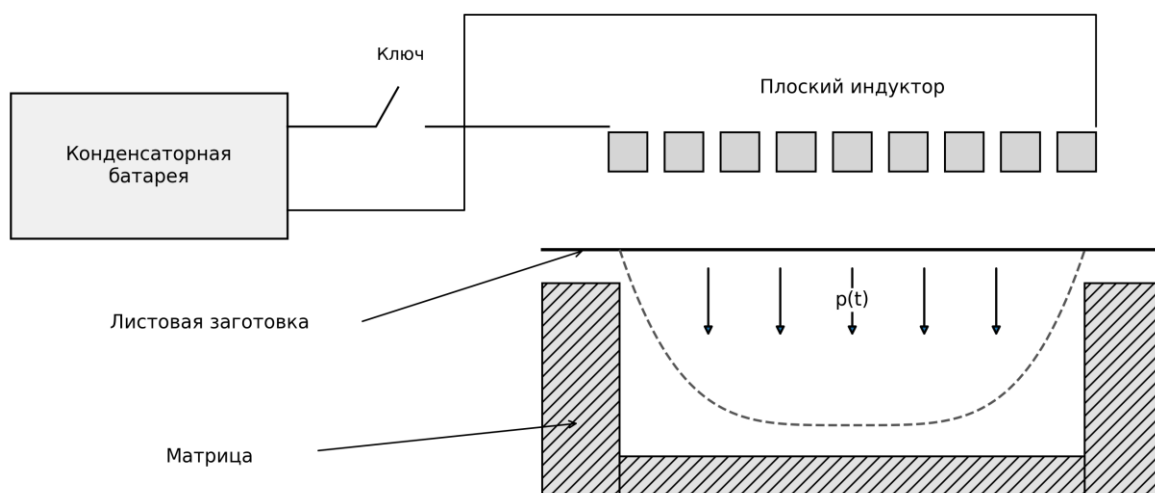


Рисунок 1 – Принцип прямого магнитоимпульсного формования листа

Схема составлена по физическому принципу, изложенному в [1; 2]. Пунктиром показано последующее положение листа; масштаб условный.

Силовой импульс разгоняет заготовку, после чего движение может продолжаться по инерции. Поэтому длительность электрического разряда и

длительность всего формоизменения не тождественны. Матрица ограничивает перемещение и задаёт окончательный контур. Бесконтактность электромагнитного нагружения относится к передаче силы от индуктора, а не к отсутствию контакта листа со всей оснасткой.

1.2 Электропроводность и глубина проникновения поля

Эффективность прямого воздействия связана с электропроводностью, толщиной листа и характерной частотой тока. При гармоническом приближении глубина проникновения поля определяется формулой:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu \sigma f}} \quad (2)$$

где δ — глубина проникновения, м; μ — магнитная проницаемость, Гн/м; σ — электропроводность, См/м; f — частота, Гц. Для реального затухающего импульса формула даёт ориентировочную оценку. При существенном проникновении поля сквозь толщину листа упрощённая модель полного экранирования становится неточной.

Д. Г. Черников, В. Ф. Карпухин и В. А. Глущенко исследовали формовку кольцевого рифта на заготовках АД1М толщиной 0,18–1,5 мм. В их опытах рабочая частота составляла около 36,9 кГц, а глубина проникновения поля — 0,44 мм. Инженерный расчёт лучше согласовывался с экспериментом при толщине листа выше этой глубины; для более тонких заготовок ошибка возрастала [2, с. 76–77]. Это показывает, почему режим нельзя переносить между листами разной толщины только по равенству запасённой энергии.

Прямую схему следует отличать от воздействия через отдельную проводящую пластину, которая принимает электромагнитную нагрузку и механически передаёт её детали. Во втором случае добавляется промежуточное звено, и изменяются потери энергии, условия контакта и характер торможения. Само наличие электромагнитного источника ещё не делает любую такую технологию прямой [8].

2 Способы интенсификации процессов листовой штамповки

2.1 Формование листа распределённым импульсом

Наиболее простая схема предусматривает разгон листа от плоского индуктора в направлении полости матрицы. Она применима для выпучивания, получения локальных углублений и формования предварительно подготовленных участков. Распределение давления по поверхности зависит от геометрии катушки; поэтому выбор её диаметра и расположения является частью проектирования операции, а не только электрического оборудования.

Интенсификация состоит в изменении характера нагружения: деформация развивается за короткое время под действием распределённых сил и инерции. Однако большую глубину нельзя автоматически считать признаком лучшего процесса. Необходимо одновременно оценивать минимальную толщину, отсутствие трещин и соответствие профиля заданной поверхности. Избыточный разгон может ухудшить точность из-за удара о матрицу и последующего отскока [8].

2.2 Локальное воздействие при механической вытяжке

В комбинированной схеме пресс формирует общий контур, а встроенные в инструмент индукторы дополнительно нагружают отдельные зоны листа. Импульс направляют туда, где материал недостаточно вовлечён в деформацию. Такое воздействие меняет распределение растяжения и может облегчать поступление металла из фланца. Следовательно, его назначение состоит не обязательно в достижении предельно высокой скорости, а в управлении течением материала.

J. Shang и G. Daehn исследовали этот подход на несимметричной панели из сплава Al 6111-T4. В опубликованных опытах обычная штамповка достигала глубины 44,0 мм, а вариант с электромагнитной поддержкой — 63,5 мм. Во втором случае использовали 22 импульса по 5,4 кДж. При этом

условия смазки различались, а предельные образцы имели разрывы; поэтому приведённые глубины характеризуют конкретное сравнение, а не гарантированный прирост для бездефектной детали [3].

Практический вывод из этой работы заключается в возможности влиять на распределение деформаций в ходе одного маршрута штамповки. Для переноса подхода на другую деталь нужно заново установить место приложения импульса, стадию хода прессы и допустимое утонение. Количество импульсов также входит в оценку длительности и энергозатрат цикла.

2.3 Управление осевой и радиальной составляющими силы

При глубокой формовке лист должен не только перемещаться в полость матрицы, но и получать материал из окружающей зоны. Если воздействовать преимущественно на центральный участок, растяжение может локализоваться до того, как заготовка заполнит полость. Несколько катушек позволяют отдельно изменять силовое воздействие в центре и на периферии.

М. Chen и соавторы исследовали двухкатушечную схему с дополнительной радиальной силой Лоренца. Для рассмотренной глубокой алюминиевой детали они получили более равномерное распределение толщины и максимальный зазор между заготовкой и матрицей 0,35 мм. При использовании одной катушки образец был склонен к разрушению до полного прилегания к матрице [4]. Результат связан с управлением направлением и распределением сил, поэтому сводить его к увеличению общей мощности неправильно.

Более сложные системы регулируют также временное соотношение полей. В работе Y. Li и соавторов предложена трёхкатушечная схема с двумя источниками питания и компенсационной катушкой. Эффект совместного действия сил исследован численным моделированием [10]. Это перспективный способ управления нагружением, однако расчётное

улучшение перемещения не следует выдавать за подтверждённую производственную точность или ресурс оборудования.

2.4 Многоимпульсное и инкрементальное формование

При многоимпульсной обработке требуемое изменение формы распределяют между несколькими разрядами. Инкрементальная схема дополнительно предусматривает перемещение зоны воздействия относительно детали. Эти признаки следует различать: серия импульсов в одной точке ещё не означает пространственно последовательного формования всей поверхности.

М. Holzmüller и соавторы продемонстрировали осуществимость инкрементального электромагнитного формования детали из листа EN AW 6016. При выборе траектории существенными оказались энергия разряда, перемещение инструмента и распределение давления. Авторы отдельно отметили чувствительность электромагнитного процесса к расстоянию между инструментом и заготовкой [5]. По мере изменения формы это расстояние меняется, поэтому одинаковые электрические настройки не обеспечивают одинаковой деформации на каждом шаге.

Сравнение основных схем приведено в таблице 1. Здесь результат рассматривается вместе с параметром, которым управляют, и с ограничением, подлежащим проверке.

Таблица 1 – Сопоставление способов прямой интенсификации

Способ	Управляемое воздействие	Основная задача	Ограничение
Распределённый импульс	Давление на формуемую область	Перемещение листа в полость	Неравномерность нагрузки и отскок [1; 8]
Локальная поддержка вытяжки	Место и момент дополнительного растяжения	Перераспределение деформаций	Согласование импульса с ходом инструмента [3]
Несколько катушек	Соотношение сил в центре и на периферии	Управление подачей металла и профилем	Взаимное влияние полей и сложность настройки [4; 10]
Формование по участкам	Положение зоны воздействия и последовательность разрядов	Получение формы по участкам	Изменение зазора и накопление погрешности [5]

Составлено на основе сопоставления [1; 3–5; 8; 10].

Выбор способа зависит от причины технологического ограничения. Для незаполненной локальной зоны полезно концентрированное воздействие; для недостаточного поступления материала — управление периферийной нагрузкой; для крупной поверхности — последовательная обработка участков. Эти решения могут сочетаться, но каждое из них должно решать конкретную задачу формоизменения.

3 Параметры процесса и оценка его эффективности

3.1 Энергия разряда и магнитное давление

Начальная энергия конденсаторной батареи определяется ёмкостью и напряжением зарядки:

$$W = \frac{CU^2}{2} \quad (3)$$

где W — энергия, Дж; C — ёмкость, Ф; U — напряжение, В. Энергия батареи не равна работе пластической деформации: часть расходуется на нагрев цепи и индуктора, часть остаётся в механическом движении и колебаниях. Поэтому одинаковое значение W при разных катушках не задаёт одинаковую форму детали [1; 11].

Для ориентировочной оценки давления на хорошо экранирующий немагнитный лист можно использовать выражение:

$$p \approx \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (4)$$

где B — индукция со стороны индуктора, а μ_0 — магнитная постоянная, приблизительно равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Это приближение предполагает малое поле с противоположной стороны листа. В общем случае важно различие магнитных напряжений по обе стороны заготовки; при заметном проникновении поля простая формула завышает оценку воздействия.

Рассмотрим условный расчёт для пояснения масштаба величин. При $C = 100$ мкФ и $U = 8$ кВ запас энергии составляет $W = 0,5 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot 8000^2 = 3200$ Дж, или 3,2 кДж. Если независимо принять $B = 10$ Тл, формула (4) даёт около 39,8 МПа. При $B = 5$ Тл оценка составляет 9,95 МПа, а при 15 Тл — 89,5 МПа. Эти значения иллюстрируют квадратичную зависимость давления от индукции; индукцию нельзя получить из указанной энергии без расчёта конкретной цепи и катушки.

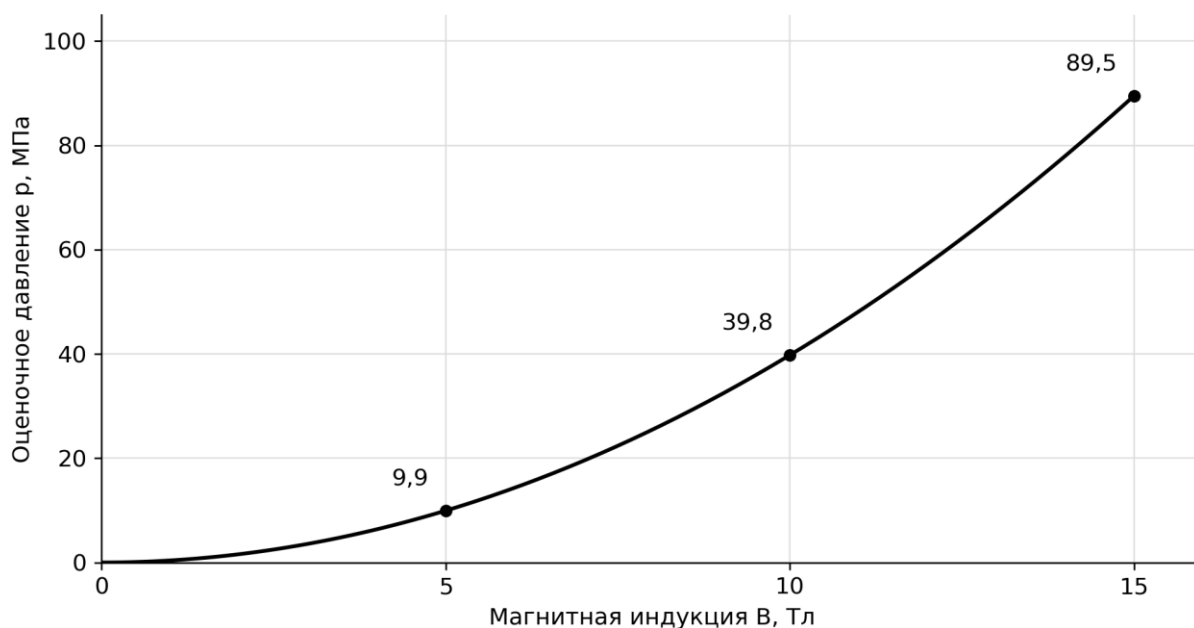


Рисунок 2 – Зависимость оценочного магнитного давления от индукции
 Расчёт по формуле (4) для идеализированного экранирования. График не является экспериментальной характеристикой установки.

Для немагнитного проводника с условно принятой электропроводностью $\sigma = 3,5 \cdot 10^7$ См/м при $f = 20$ кГц формула (2) даёт $\delta \approx 0,60$ мм. Лист толщиной 0,3 мм в такой оценке нельзя считать полностью экранирующим. Пример показывает необходимость совместно проверять энергию, частоту и толщину, но не задаёт готовый режим штамповки.

3.2 Геометрия заготовки и условия закрепления

Диаметр исходного листа определяет запас материала и сопротивление его перемещению в формуемую область. М. Chen и соавторы в исследовании 2024 года изменяли диаметр заготовок AA1050-O толщиной 1 мм и напряжение разряда. Изменение вытягивания периферии влияло на высоту, форму и распределение толщины [6]. Значит, заготовка и прижим являются активными параметрами процесса наряду с электрической частью.

D. Lusa и D. D. Lusa исследовали свободное выпучивание листов алюминиевого сплава, меди и стали, сравнивая условия с ограничением перемещения кромки и без него. Деформации определяли по нанесённой координатной сетке [7]. Для инженерной оценки важен сам способ контроля:

одна высота выпучивания не показывает, за счёт какой зоны и какого утонения она получена. Сопоставлять варианты целесообразно по распределению деформаций и остаточной толщины.

3.3 Точность, тепловая нагрузка и повторяемость

После удара о матрицу лист способен отскочить, хотя перед этим почти полностью повторял её поверхность. Х. Liu и соавторы показали, что в рассмотренной прямой схеме увеличение напряжения с 6 до 10 кВ сопровождалось усилением центрального дефекта от отскока. Введение промежуточной упругой среды меняло характер торможения, но переводило процесс в другую, непрямую схему [8]. Этот пример подтверждает необходимость контролировать окончательную геометрию после затухания движения.

В. Beckschwarte, L. Langstädtler и С. Schenck наблюдали вынужденные и свободные колебания тонкого листа при электромагнитном воздействии. На поведение заготовки влияли как удар о матрицу, так и колебательный характер сил [9]. Поэтому параметры генератора необходимо согласовывать с динамическим откликом листа, а не выбирать только по максимальному току.

Отдельным ограничением является тепловая нагрузка индуктора. В. А. Барвинок и соавторы рассматривали тепловые поля и режим многоциклового нагружения индукторных систем [11]. Для серийного процесса важно не только получить одну деталь, но и сохранить характеристики катушки при повторении разрядов. Нагрев, изменение сопротивления и повреждение изоляции способны нарушить повторяемость даже при неизменном заданном напряжении.

Предлагаемая последовательность оценки состоит в следующем: сначала задаётся допустимая геометрия и минимальная толщина; затем сравниваются варианты распределения нагрузки; после этого проверяются

повторяемость и затраты полного цикла. Показатели, позволяющие избежать односторонней оценки, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели оценки магнитоимпульсной операции

Показатель	Что проверяется	Как использовать результат
Точность формы	Профиль и зазор после прекращения колебаний	Отличать заполнение полости от устойчивого прилегания
Толщина и целостность	Минимальная толщина, локализация деформаций, трещины	Исключать увеличение глубины за счёт недопустимого утонения
Повторяемость	Разброс размеров серии при одинаковых настройках	Выявлять влияние нагрева и позиционирования
Полный цикл	Число разрядов, зарядка, установка и съём детали	Оценивать реальную производительность
Затраты и ресурс	Энергия цикла, обслуживание и замена индуктора	Сравнивать варианты по годным деталям, а не по одному импульсу

Аналитическое обобщение рассмотренных ограничений [6–9; 11].

Таким образом, технологически оправданным является режим, при котором выполнены требования к детали и обеспечена устойчивая работа оборудования. Максимальная энергия, скорость или глубина сами по себе не могут служить универсальным критерием эффективности.

Заключение

Прямая магнитоимпульсная интенсификация основана на непосредственном взаимодействии наведённого в заготовке тока с магнитным полем. Её технологическое преимущество состоит в возможности изменять распределение и момент приложения сил без обязательного изменения общего движения прессы.

Рассмотренные способы решают разные задачи. Формование распределённым импульсом обеспечивает быстрое перемещение листа в полость матрицы. Локальная электромагнитная поддержка вытяжки вовлекает в деформацию выбранные участки. Многокатушечные схемы позволяют управлять осевой и радиальной нагрузкой, а инкрементальное формование — последовательно обрабатывать поверхность. Выбор между ними должен следовать из характера затруднённого течения металла.

Результаты исследований показывают, что улучшение глубины формования возможно, но не является универсальным следствием увеличения энергии разряда. Проникновение поля через тонкий лист, условия закрепления, отскок от матрицы и нагрев индуктора ограничивают достигаемый эффект. Поэтому рациональный подход включает совместный выбор электрических параметров и оснастки с последующей оценкой формы, утонения, повторяемости и затрат полного цикла.

Список использованных источников

1. Psyk V., Risch D., Kinsey B. L., Tekkaya A. E., Kleiner M. Electromagnetic forming — A review // *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211, no. 5. P. 787–829. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012.
2. Черников Д. Г., Карпухин В. Ф., Глущенко В. А. Исследование процесса магнитно-импульсной формовки с учетом эффекта просачивания магнитного поля сквозь заготовку // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2020. Т. 22, № 2. С. 75–80. DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-75-80.
3. Shang J., Daehn G. Electromagnetically assisted sheet metal stamping // *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211, no. 5. P. 868–874. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.03.005.
4. Chen M., Lai Z., Cao Q., Han X., Wang C., Liu N., Li L. Improvement on formability and forming accuracy in electromagnetic forming of deep-cavity sheet metal part using a dual-coil system // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 57. P. 209–221. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.06.023.
5. Holzmüller M., Linnemann M., Homberg W., Psyk V., Kräusel V., Kroos J. Proof of concept for incremental sheet metal forming by means of electromagnetic and electrohydraulic high-speed forming // *Materials Research Proceedings*. 2023. Vol. 25. P. 11–18. DOI: 10.21741/9781644902417-2.
6. Chen M., Xiao H., Wang Z., Wang J., Zuo C., Yang W. Investigation of the Role of the Initial Workpiece Diameter in Deformation Control in Electromagnetic Sheet Forming // *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 19. Article 3828. DOI: 10.3390/electronics13193828.

7. Luca D., Luca D. D. Experimental and Numerical Investigations on Strains of Metal Sheet Parts Processed by Electromagnetic Forming // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2023. Vol. 7, no. 5. Article 180. DOI: 10.3390/jmmp7050180.
8. Liu X., Huang L., Su H., Ma F., Li J. Comparative Research on the Rebound Effect in Direct Electromagnetic Forming and Indirect Electromagnetic Forming with an Elastic Medium // Materials. 2018. Vol. 11, no. 8. Article 1450. DOI: 10.3390/ma11081450.
9. Beckschwarte B., Langstädtler L., Schenck C. Response of Thin Sheet Metal on the Excitation in Electromagnetic Forming // Engineering Proceedings. 2022. Vol. 26, no. 1. Article 4. DOI: 10.3390/engproc2022026004.
10. Li Y., Tang B., Lv Y., Xiong Q., Zhao X. Electromagnetic forming of AA1060 sheet based on mixed forces generated by a three-coil dual-power system // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Article 5174. DOI: 10.1038/s41598-023-49590-4.
11. Барвинок В. А., Паламарчук Ю. Е., Кирилин А. Н., Самохвалов В. П., Вершигоров В. М. Экспериментальные исследования тепловых полей в индукторных системах при магнитно-импульсной штамповке // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2008. № 1 (14). С. 103–110. DOI: 10.18287/2541-7533-2008-0-1(14)-103-110.