

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ СОВРЕМЕННОСТИ

В рамках статті проведений аналіз особливостей магнітно-імпульсної обробки металів в сучасних оброблювальних технологіях. Розкрито суть ефекту гіперпластичності і проаналізовані наслідки від його прояви. Сформульовані умови тонкостінності оброблюваного об'єкту при магнітно-імпульсній дії на нього.

В рамках статті проведено аналіз особливостей магнітно-імпульсної обробки металів в сучасних оброблювальних технологіях. Раскрыта суть эффекта гиперпластичности и проанализированы последствия от его проявления. Сформулированы условия тонкостенности обрабатываемого объекта при магнитно-импульсном воздействии на него.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. Опыт показал, что применение традиционных технологий с сугубо механическими действиями для решения технологических задач по деформации металлических изделий, например, обжим, раздача, штамповка, доведение изгиба заготовки до необходимого уровня четкости, внешнее устранение вмятин на поверхности корпусов транспортных средств существующими традиционными методами обработки становится уже неприемлемым [1]. Так, основной помехой становится недостаточная пластичность обрабатываемого металла. При достижении определенного уровня механических нагрузок, необходимых для реализации поставленной производственной задачи, в зоне нагрузки происходит разрыв металла.

Не менее значимой и актуальной проблемой магнитно-импульсной обработки является проблема эффективности силового воздействия на тонкостенные металлы. Последнее определение объектов обработки, как известно, объединяет в совокупности их геометрические и электрофизические характеристики, а также временные параметры действующего поля. Фактически, тонкостенность означает режим интенсивного проникновения. Здесь имеет место не только известное из классики ослабление сил магнитного давления, но и проявление целого ряда сопутствующих физических эффектов, обусловленных "прозрачностью" обрабатываемой заготовки [6].

Анализ основных достижений и публикаций. Как показано в работах по обработке давлением, высокоскоростное импульсное действие приводит к появлению нового качества в поведении обрабатываемого металла. Это новое качество получило название гиперпластичности [2, 3]. Практическое использование эффекта гиперпластичности позволяет деформировать без разрушения и штамповать изделия, производство которых невозможное известными методами.

Магнитно-импульсная штамповка практически реализует режим мощного силового воздействия во временном интервале микросекундного диапазона [4]. Важнейшей особенностью обрабатывающих методов такого рода является неразрывная связь между инструментом-индуктором и заготовкой, подлежащей деформированию [5]. Если при механической штамповке действенность пуансона непосредственно не связана с внутренними процессами в обрабатываемом металле, то магнитно-импульсное силовое действие

физически возможно только в случае существования электродинамической связи между током в обмотке индуктора-инструмента и током, который возбуждается в заготовке. Их взаимодействие приводит к появлению мощных пондеромоторных сил, величина которых, как известно, пропорциональна произведению амплитуд первичного (тока индуктора) и вторичного (индуцируемого) токов.

Одним из самых важных вопросов проектирования инструментов магнитно-импульсных методов является вопрос об эффективности силового воздействия на обрабатываемый металл, причём такого, которое даст прогнозируемый результат и не приведёт к разрушению формируемого изделия. Здесь необходимы новые предложения по конструкциям инструментов, обоснованные результатами совместного анализа электродинамических и механических процессов в системе "индуктор-заготовка" с последующими рекомендациями по практическому выполнению собственно индуктора – источника поля и взаимному размещению его и объекта обработки [5, 6].

К примеру, разработка магнитно-импульсных технологий в автомобилестроении инициирована задачей формовки углов ("заполнение углов") при штамповке задних панелей кузовного покрытия автомобилей, выпускаемых фирмой "Ford Motor Company" (рис. 1.) [3, 6].

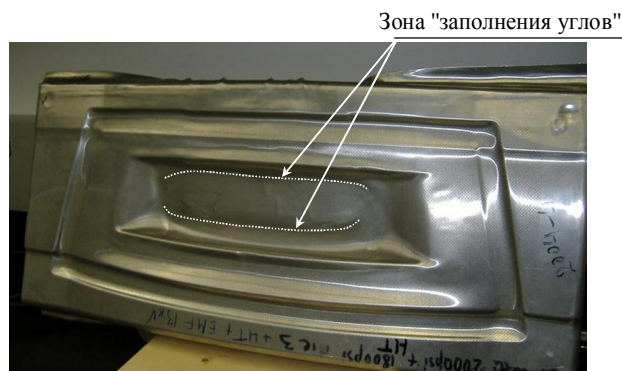


Рис. 1. Задняя панель автомобиля "Ford"

Первоначальное создание требуемой конфигурации панели производилось известными методами электрогидравлики. Но доведение штампуемого рисунка до уровня чёткости, необходимого в соответствии с требованиями конструкторов-разработчиков

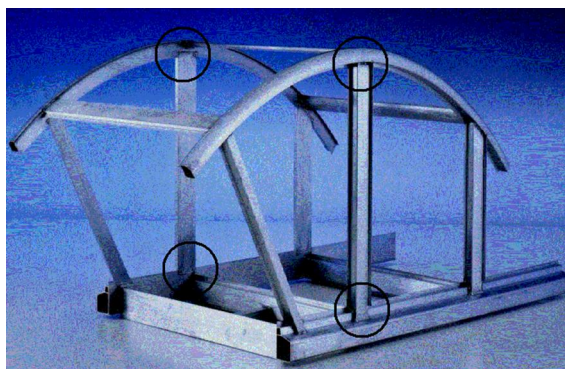
кузовного оформления проектируемого автомобиля, оказалось практически не осуществимым.

В этой связи и была поставлена задача о привлечении магнитно-импульсной технологии для штамповки угловых элементов рисунка задней панели автомобильного кузова в режиме, когда проявляется гиперпластичность обрабатываемого металла.

Фирмой "Volkswagen" инициированы работы по сочленению элементов несущих рамных конструкций автомобилей [7].

На рис. 2,а показана рама одной из моделей "Audi". Места предполагаемого магнитно-импульсного сочленения выделены круговыми контурами.

Образцы, иллюстрирующие первые попытки выполнения данной производственной операции, даны на рис. 2,б.



а



б

Рис. 2. Соединение элементов рамных конструкций автомобилей: а – рама одной из моделей "Audi"; б – первые попытки выполнения данной операции

Как видно из представленных экземпляров, расширяющее силовое воздействие на внутренние элементы осуществлялось по всей их поверхности в требуемой зоне сочленения. По этой причине имела место не целенаправленная "раздача" по углам, относительно равномерная по всему периметру деформируемой трубы.

При магнитно-импульсной обработке тонкостенных листовых металлов необходимо учитывать электродинамическую толщину обрабатываемого металла, т.е. "прозрачен" ли он для воздействующих импульсных электромагнитных полей.

"Прозрачность" самой заготовки связана с её геометрическими, электрофизическими параметрами размерами (толщина заготовки, удельная электропроводность) и с временными характеристиками воздействующего поля (частота). Если металлическая заготовка становится "прозрачной", то методы её обработки, основанные на классических представлениях о

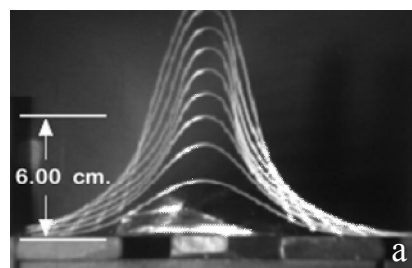
МИОМ с использованием скин-эффекта, теряют свою эффективность. Следовательно, при магнитно-импульсном воздействии на заготовку, возникает необходимость учитывать её электродинамическую тонкостенность, и в случае "прозрачности" – применять другие методы МИОМ, часть из которых была описана в [6].

Цель работы – анализ особенностей магнитно-импульсных методов силового воздействия в современных обрабатывающих технологиях в их связи с протекающими электродинамическими процессами. Первая из особенностей – это гиперпластичность металлов, вторая связана с тонкостенностью обрабатываемых объектов.

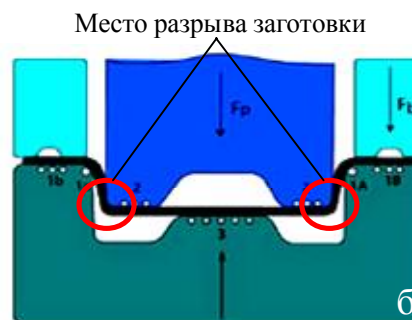
ГИПЕРПЛАСТИЧНОСТЬ

Новые очевидные преимущества магнитно-импульсных технологий в штамповочных производствах обусловлены эффектом гиперпластичности металлов, обнаруженным профессором Университета штата Огайо (США) Гленом Дейном в 2004 г. [3]. Подчеркнём, эффект работает как в случае массивных проводящих заготовок, так и в случае тонкостенных листовых металлов. В последнем варианте гиперпластичность должна позволить неразрушающую штамповку (без разрывов) геометрически довольно тонких изделий.

Суть эффекта заключается в следующем. При действии кратковременных импульсных нагрузок относительные деформации металлических образцов могут достигать до 200% (рис. 3,а).



а



б

Рис. 3. Деформация листового металла:
а – высокоскоростное магнитно-импульсное деформирование листа алюминия, фоторегистрация процесса при последовательном силовом воздействии (интервал между импульсами составляет ~30 мс.);
б – формовка листового металла традиционным методом

С практической точки зрения этот эффект интересен тем, что новые легкие и достаточно жёсткие сплавы алюминия с разными добавками, появившиеся в современном автомобилестроении, не обладают достаточной пластичностью. Этот факт препятствует

их механической обработке известными традиционными методами.

На рис. 3,б проиллюстрирован один из традиционных методов механической штамповки, где обозначены места повреждения (разрыва) листовой заготовки при осуществлении заданной производственной операции.

Как полагает Глен Дейн, эффект гиперпластичности позволяет проводить магнитно-импульсную обработку как в сочетании с традиционными методами – для доведения заготовки до необходимого уровня чёткости заданного изделия, так и в отдельности, как самостоятельный метод высокоскоростной штамповки [1, 2]. При этом автор предложения утверждает, что благодаря эффекту гиперпластичности на готовом изделии практически отсутствует "морщине" и другие негативные следствия процесса деформирования.

Теперь о связи с электродинамикой магнитно-импульсного воздействия. Анализ проведём с помощью подходов, представленных в [4, 5].

Как известно, в общепринятых для традиционной МИОМ терминах магнитное давление на проводник пропорционально произведению возбуждающего тока в индукторе и тока, индуцированного в металле обрабатываемого объекта.

Проведенные расчёты и измерения показали, что силы магнитного давления имеют характерную убывающую форму распределения по толщине обрабатываемого металла. Этот факт отличает сугубо механическое воздействие (рис. 3,б) от магнитно-импульсного (рис. 3,а).

Для практики неравномерность пространственного распределения действующих сил должна означать и неравномерность проявления эффекта гиперпластичности по толщине обрабатываемого объекта, а, следовательно, должны появиться сложности даже при магнитно-импульсном силовом воздействии.

Отмеченное обстоятельство требует отдельного исследования, которое свяжет механику и электродинамику в обрабатываемом металле и даст рекомендации по выбору временных и амплитудных параметров, позволяющих при импульсной формовке изделий успешную реализацию эффекта гиперпластичности, конечным позитивным следствием которой будет:

- возможность объёмной штамповки изделий различной номенклатуры с фиксированным профилем и определённым уровнем чёткости без разрывов и повреждений;
- вытягивание заданных участков металла, например, для удаления вмятин на его поверхности и придания ей формы, достаточно близкой к первоначальной, то есть, до появления повреждений.

ТОНКОСТЕННОСТЬ

Как было ранее указано, реализация эффекта гиперпластичности металла при магнитно-импульсной обработке металлов открывает широкие возможности для штамповки без разрывов именно геометрически тонких металлических объектов.

Теперь собственно об электродинамике происходящих процессов. Анализ проведём с помощью основных представлений, изложенных в [6].

Физическая особенность процессов в обрабаты-

ваемом тонкостенном металле (в специальной литературе существует определение "прозрачный металл") обусловлена интенсивной диффузией и вытекающими отсюда следствиями, среди которых не только ослабление тангенциальной компоненты, но и появление мощной нормальной компоненты напряжённости магнитного поля. Подчеркнём, что в приближении идеальной проводимости, последняя строго обращается в нуль на поверхности проводника, а в классических расчётах – полагается пренебрежимо малой.

В то же время из априорных феноменологических соображений, очевидно, что влияние нормальной компоненты напряжённости распространяется на процессы возбуждения вихревых токов (уравнение Максвелла: $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}$), что в свою очередь приводит к изменению интегральной величины сил магнитного давления, и на процессы возникновения тангенциальных сил Лоренца. Эти силы при наличии каких-либо даже незначительных деформаций обуславливают появление вращающих механических моментов. А их действие должно существенно изменять картину действующих сил в целом и, как следствие, искажать формообразование изделия при магнитно-импульсной штамповке.

Для удобства и наглядности последующих рассуждений целесообразно определить параметр, устанавливающий степень "электродинамической" тонкостенности проводника, и который должен количественно связывать его геометрическую толщину, электропроводность металла и временные характеристики действующего поля.

Металлическую заготовку следует считать тонкостенной, если для нее выполняется условие [6, 8]:

$$\omega \cdot \tau \ll 1, \quad (1)$$

где ω – угловая частота спектра действующего магнитного поля; τ – характерное время диффузии поля в проводящий слой с электропроводностью – γ и толщиной – d , $\tau = \mu_0 \gamma d^2$.

Примечание. Условие, подобное неравенству (1), широко используется в классической электродинамике [8]. Но в дополнение к определениям, принятым в магнитно-импульсной обработке металлов, введение такого условия представляется весьма целесообразным.

Для выяснения физического значения условия тонкостенности преобразуем его так, чтобы выделить отношение толщины проводящего слоя – d к эффективной глубине проникновения поля – δ .

После несложных преобразований в выражении (1) получаем эквивалентное неравенство:

$$\left(\frac{d}{\delta} \right) \ll \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

где
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}}.$$

Соотношение (2) количественно показывает, что металлическая заготовка является тонкостенной с физической точки зрения, если ее толщина много меньше эффективной глубины проникновения поля в среду с идентичными параметрами.

Этот вывод хорошо известен, но теперь при его формулировке следует понимать, что помимо тривиального ослабления сил магнитного давления за счёт

процессов диффузии их действие на обрабатываемый объект в интеграле должно стремиться к нулю за счёт интенсивной временной осцилляции.

Если же эффективная глубина проникновения много меньше характерных размеров заготовки (то есть, при условии резкого скин-эффекта), диффузия поля незначительна, силы давления максимальны и пропорциональны квадрату напряжённости исключительно касательной компоненты напряжённости магнитного поля.

По этой причине, исторически, магнитно-импульсный метод нашел наибольшее практическое применение в технологических процессах по обработке массивных заготовок из металлов с высоким значением удельной электропроводимости (например, медь, алюминий, латунь и так далее).

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

- высокоскоростное импульсное силовое воздействие приводит к появлению нового качества в поведении обрабатываемого металла – гиперпластичности;
- эффект гиперпластичности металлов обнаружен и впервые описан профессором Университета штата Огайо Гленом Дейном, суть эффекта – при действии кратковременных импульсных нагрузок относительные деформации металлических образцов могут достигать до 200 %;
- гиперпластичность позволяет проводить магнитно-импульсную обработку новых легких и достаточно жестких сплавов алюминия, что невозможно реализовать другими известными методами;
- успешная реализация гиперпластичности должна позволить восстановление металлических поверхностей с вмятинами практически до их первоначального состояния;
- введение "электродинамической" толщины заготовки при магнитно-импульсной обработке металлов позволяет количественно связать её геометрию, электрофизические характеристики и временные параметры действующего поля;
- величина "электродинамической" толщины даёт возможность определить "уровень" тонкостенности обрабатываемого объекта и, в конечном итоге, произвести выбор наиболее эффективного режима его обработки магнитно-импульсными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В., Головащенко С.Ф., Гнатов А.В., Смирнов Д.О. Магнитное поле и давления, возбуждаемые чёткими попарно компланарными соленоидами в полости прямоугольной трубы // *Электротехника і електромеханіка*. – 2010. – № 2. – С. 46-49.
2. www.osu.edu/hyperplasticity.
3. Батыгин Ю.В., Серіков Г.С. Головащенко С.Ф. Магнитное поле и давления, возбуждаемые одновитковым индуктором в угловом изгибе листовой заготовки // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2006. – № 6. – С. 66-70.

4. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа. 1977. – 189 с.

5. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Изд. второе, переработанное и дополненное под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. – Харьков: Изд. МОСТ-торнадо, 2003. – 285 с.

6. Туренко А.Н. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: Монография – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.

7. Батыгин Ю.В., Головащенко С.Ф., Гнатов А.В., Смирнов Д.О. Индукторные системы для магнитно-импульсной раздачи труб прямоугольной формой поперечного сечения // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2010. – № 1. – С 33-35.

8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М: Наука, 1982. – 620 с.

Поступила 27.09.2010

Батыгин Юрий Викторович, д.т.н., проф.

Степанов Александр Александрович, к.т.н., доц.

Чаплыгин Евгений Александрович

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

61002, Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ

кафедра физики

тел. (057) 700-368-53, E-mail: batygin48@mail.ru.,

physizh@khadi.kharkov.ua, chaplygin_e_a@mail.ru.

Гнатов Андрей Викторович, к.т.н., с.н.с.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

61002, Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ

кафедра "Автомобильная электроника"

тел. (057) 700-38-52, E-mail: kalifus@yandex.ru.

Гнатова Щасяна Валиковна

ООО "Наладочно-монтажное управление

"Электроюжмонтаж"

61035, Харьков, ул. Каштановая 33

тел. (057) 719-39-97, E-mail: shasyana@yandex.ru.

Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, Sh.V. Gnatova, A.A. Stepanov, E.A. Chaplygin

The magnetic pulse metals working features in the modern technologies.

In the article the analysis of the magnetic pulse metal working features in the modern technologies is conducted. The hyperplasticity effect essence is exposed and its particularities are analysed. A thin-walled metal condition during magnetic pulse action is formulated.

Key words – magnetic pulse action, thin-walled metal, hyperplasticity.