

НОВІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКОСТІННОГО МЕТАЛУ ПРИ ЙОГО МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ

А.В. Гнатов, доцент, к.т.н., П.В. Рувінський, магістрант, ХНАДУ

***Анотація.** Визначено вплив нових властивостей тонкостінного металу при його магнітно-імпульсній обробці. Показано, що ефект гіперпластичності при застосуванні магнітно-імпульсного методу дозволяє проводити деформацію нових легких і достатньо міцних сплавів алюмінію з різними добавками, що було неможливо досягти традиційними методами. Визначені умови тонкостінності металу при його магнітно-імпульсній обробці.*

***Ключові слова:** магнітно-імпульсна обробка металів, магнітно-імпульсна установка, індуктор, гіперпластичність, тонкостінність, магнітно-імпульсне рихтування.*

НОВЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОСТЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ЕГО МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

А.В. Гнатов, доцент, к.т.н., П.В. Рувинский, магістрант, ХНАДУ

***Аннотация.** Определено влияние новых возможностей тонкостенного материала при его магнитно-импульсной обработке. Показано, что эффект гиперпластичности при использовании магнитно-импульсного метода позволяет проводить деформацию новых легких и достаточно крепких сплавов алюминия с различными присадками, что было невозможно достичь традиционными методами. Определены условия тонкостенности металла при его магнитно-импульсной обработке.*

***Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка металлов, магнитно-импульсная установка, индуктор, гиперпластичность, тонкостенность, магнитно-импульсная рихтовка.*

NEW PROPERTIES OF THIN-WALL METALL DURING IT IS MAGNETIC-PULSE TREATMENT

A. Gnatov, associate professor, cand. eng. sc., P. Ruvinskyi, postgraduate, KhNAHU

***Abstract.** The influence of new opportunities on thin-wall materials was determined during it's magnetic pulse treatment. It was shown that the efficiency of hyper plasticity allows to deform new types of fusions of aluminum with different addition agent using magnetic pulse treatment of metals. It was impossible before using traditional methods treatment of metals. It was defined consitions for thin-wall metals during it's magnetic-pulse treatment.*

***Key words:** magnetic-pulse treatment of metals, magnetic-pulse plant, an inductor, hyperplasticity, thin-wall, magnetic pulse straightening.*

Вступ

Розробка технічних засобів для рихтування заданих ділянок тонкостінних металів є актуальним науково-технічним завданням. Існує

гостра необхідність в рихтуванні тонкостінних металічних кузовних панелей автомобілів. У зв'язку з широким застосуванням твердого сплаву алюмінію із значною кількістю присадок в якості кузовних панелей автомо-

білів, виникла необхідність проводити їх рихтування без демонтажних робіт. Це дасть змогу скоротити час на ремонт та суттєво знизити вартість ремонту. Це підтверджує актуальність даного напрямку наукових досліджень для проведення ремонтних кузовних робіт.

Постановка проблеми

Сучасне виробництво та ремонт автотранспортних засобів висуває все нові вимоги до самих засобів виробництва та ремонту. Застосування традиційних технологій з суто механічними діями для вирішення технологічних задач по деформації металевих виробів, тобто обтиск, роздача, штампування, доведення вигину заготовки до необхідного рівня чіткості, її рихтування у сучасному виробництві та ремонті стає вже неприйнятним [1-3]. Наприклад, основною завадою у формуванні кутових профілів є недостатня пластичність металу, що деформується. Досягши певного рівня механічних навантажень, необхідних для реалізації поставленої задачі, в зоні навантаження відбувається розрив металевого листа.

Аналіз основних досягнень і публікацій

Високошвидкісна імпульсна дія приводить до появи нової якості в поведінці оброблюваного металу. Ця нова якість отримала назву гіперпластичності [1, 4, 5]. Практичне використання ефекту гіперпластичності дозволяє деформувати без руйнування і штампувати вироби, виробництво яких неможливе відомими механічними та гідравлічними методами.

Використання магнітно-імпульсних технологій дозволяє на практиці реалізувати не тільки жорстке з'єднання при збірці, але і навіть виконати, так звану, холодну зварку. Її фізична суть полягає в утворенні граничного шару за рахунок взаємної дифузії металів, що сполучаються, при високих швидкостях зіткнення. В цьому випадку має місце не просто жорстке з'єднання, а утворення цілісної конструкції [2].

При проектуванні інструментів для магнітно-імпульсних методів обробки металів, найважливішим питанням є отримання достатньої силової дії в області, що підлягає деформації відповідно до виробничого завдання. Тут не-

обхідні нові пропозиції по конструкціях інструментів методу в поєднанні з аналізом електродинамічних процесів в системі «індуктор-заготівка» і подальшими рекомендаціями по їх практичному виконанню і взаємному розташуванню [6-8].

Мета роботи

Визначення впливу нових властивостей тонкостінного металу при його магнітно-імпульсній обробці для технологічних процесів виробництва та ремонту автотранспортних засобів.

Ефект гіперпластичності

Важливим фактором на користь магнітно-імпульсних технологій є ефект гіперпластичності металів, знайдений професором Університету штату Огайо (США) Гленом Дейном і описаний в науковій періодиці 2004 року [1, 4, 5]. При дії короткочасних імпульсних навантажень відносні деформації металевих зразків можуть доходити до 200% (рис. 1, а). З практичної точки зору цей ефект цікавий тим, що нові легкі і достатньо міцні сплави алюмінію з різними добавками, що з'явилися в автомобілебудуванні, не мають достатньої пластичності. Це не дозволяє здійснити їхню механічну обробку відомими традиційними методами.

На рис. 2, б проілюстровано один з традиційних методів формовки кузовної панелі, де позначено місця пошкодження (розриву) листової заготовки при проведенні операції формовки.

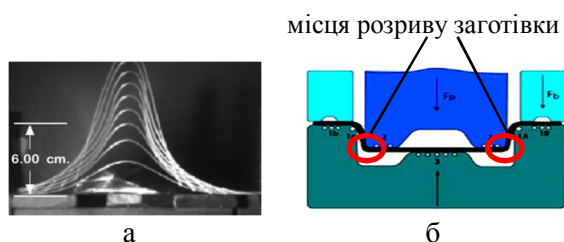


Рис. 1. Деформація листового металу: а – високошвидкісна деформація листа алюмінію (інтервал між імпульсами впливу дорівнює 30 мс.); б – Формовка листового металу традиційним методом

Глен Дейн знайшовши ефект гіперпластичності пропонує його використовувати як разом з традиційними методами – для доведення заготовки до необхідного рівня деформації

(рівня чіткості деформації), так і окремо – як самостійним метод високошвидкісної формовки металу [2, 4]. При цьому автор винаходу стверджує, що ефект гіперпластичності практично не утворює на металі остаточних явищ деформації (зморшок).

В зв'язку з цим, провідні світові виробники вважають доцільним звернутися до магнітно-імпульсних методів в обробних виробництвах і підійти до їхньої практичної реалізації з позицій, відмінних від часів 60...70-х років.

При магнітно-імпульсній дії на заготовку, в ній збуджуються вихрові струми. Ці індуквані струми наводяться в оброблювальному металі індуктором – інструментом магнітно-імпульсної дії за допомогою збудженого струмом індуктора імпульсного магнітного поля. Для наочності сприйняття на рис. 2 приведена схема одного з варіантів індукторної системи.

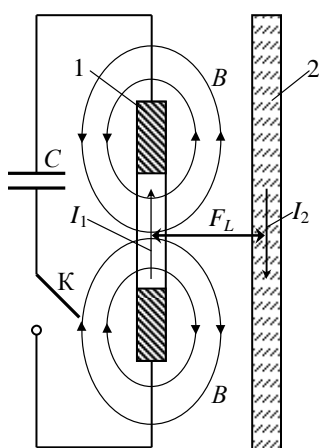


Рис. 2. Схема індукторної системи з одним витком соленоїдом (1) і плоскою листовою заготовкою (2): C – ємнісний накопичувач енергії; K – комутатор; I_1 – струм в індукторі; I_2 – індукований струм; B – індукція магнітного поля; F_L – подеромоторні сили (сили Лоренца)

Електромагнітні процеси в індукторних системах для обробки металів описуються фундаментальною системою рівнянь Максвелла [1-3, 9]. Складаючи рівняння Максвелла для конкретної індукторної системи з урахуванням матеріальних співвідношень та розв'язуючи їх відомими методами математичного аналізу відносно напруженостей електричного та магнітного поля, знаходимо індукований струм в заготовці та сили магнітної взаємодії – подеромоторні сили, або їх

ще називають силами Лоренца.

Отже, ефект гіперпластичності, що виникає при магнітно-імпульсній дії утворює наступні переваги на користь магнітно-імпульсних технологій:

- можлива деформація заготовки до необхідного профілю з визначеним рівнем чіткості без її розриву та пошкодження;
- зворотна деформація металу з метою видалення утворених пошкоджень металу і придання йому попередньої форми (при наявності незначних ознак остаточних явищ);
- метал заготовки не втрачає притаманних йому властивостей, а завдяки інтенсивним магнітним полям не руйнується (розривається).

Для більшої наочності представлено фотоілюстрації задньої кузовної панелі автомобіля «Ford», які виготовлені різними методами, рис. 3.



Рис. 3. Задня панель автомобільного кузова моделі «Ford», гострі кути якої відштамповані електрогідравлічною (а), магнітно-імпульсною дією (б)

Умови тонкостінності

Використовуючи магнітно-імпульсні методи для певних операцій, наприклад, магнітно-імпульсного рихтування, при обробці металевих заготовок, необхідно визначитися з електродинамічними параметрами та зв'язаними з ними фізичними розмірами магнітно-імпульсної системи і заготовки, що обробляється.

Припустимо, що умови для збудження подеромоторних сил виконуються. На заготовку діє магнітний тиск, величина якого визначається співвідношенням ефективної глибини проникнення поля і товщини заготовки [1-3]. Силова дія буде найбільшою у разі різкого поверхневого ефекту, коли дифузія поля в провідник незначна (масивні метали з великим значенням електропровідності). Такий провідник називають «непрозорим». У разі «прозорого провідника» (достатньо тонкос-

тінного металу або металу з низьким значенням електропровідності), коли проникнення магнітного поля крізь заготівку вельми істотно, магнітний тиск, різко падає. Ці факти визначають необхідність різних підходів до аналізу електродинамічних процесів при взаємодії магнітних полів з «непрозорими» і «прозорими» провідниками. Кінцевою метою цих розглядів є висновок умов найефективнішої силової дії на метали, що обробляються.

Насамперед слід кількісно визначити «тонкостінність провідника». Металева заготівку вважатимемо тонкостінною, якщо для неї виконується умова [10]:

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

де ω – кутова частота спектру діючого магнітного поля; τ – характерний час дифузії поля в провідний шар з електропровідністю γ і товщиною d , $\tau = \mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2$.

Для з'ясування фізичного значення умови тонкостінності перетворимо його так, щоб виділити відношення товщини провідного шару d до ефективної глибини проникнення поля δ . У відповідності з [1, 3]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma}} \quad (2)$$

Після нескладних перетворень у виразі (1) одержуємо еквівалентну нерівність:

$$\left(\frac{d}{\delta}\right) \ll \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Співвідношення (3) показує, що металева заготівка є тонкостінною з фізичної точки зору, якщо її товщина багато менше ефективної глибини проникнення поля в середовище з ідентичними параметрами.

При проведенні аналізу, до умови тонкостінності (1) слід додати умову квазістаціонарності електромагнітних процесів, що протікають в реальних для практики магнітно-імпульсної обробки металів індукторних системах:

$$\frac{\omega}{c} \cdot l \ll 1, \quad (4)$$

де l – найбільший характерний розмір системи; c – швидкість світла у вакуумі

Результатом взаємодії магнітного поля індуктора з провідним середовищем – заготівкою є збудження пондеромоторних сил. І якщо їхня величина є функцією просторово-часового розподілу поля по товщині провідника, то сумарний тиск не залежить від нюансів розподілу і в класичному наближенні визначатиметься лише різницею квадратів значень дотичної до поверхні заготівки складової вектора напруженості магнітного поля на граничних поверхнях заготівки, тобто:

$$p = \frac{\mu_0}{2} \cdot (H_1^2 - H_2^2), \quad (5)$$

де $H_{1,2}$ – значення напруженості на граничних поверхнях об'єкту, що обробляється.

Вираз (5) є наслідком фундаментального закону, що визначає енергію електромагнітного поля в одиниці об'єму будь-якого немагнітного середовища.

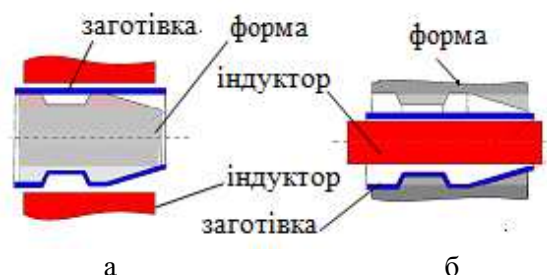


Рис. 4. Традиційні індукторні системи: а – операція обтиску; б – операція роздачі

Традиційна індукторна система складається з джерела поля, заготівки і металевої матриці, рис. 4. Величина напруженості H_2 визначається дифузиею поля крізь провідник в порожнину, обмежену поверхнею матриці.

Якщо товщина і електропровідність металу заготівки достатньо мала, проникнення поля стає істотним (рис. 5). Величина H_2 зростає, а магнітний тиск, відповідно, падає. У разі, коли ефективна глибина проникнення більше товщини провідника, останній, як вже наголошувалося, стає «прозорим» для поля і практично не отримує ніякої силової дії.

Якщо ж ефективна глибина проникнення багато менше характерних розмірів заготівки

(тобто за умови різкого скін-ефекту), дифузія поля незначна, сили тиску максимальні (рис. 5).

$$p \approx \frac{\mu_0 \cdot H_1^2}{2}, H_2 \approx 0. \quad (6)$$

З цієї причини магнітно-імпульсний метод знайшов найбільше практичне застосування в технологічних процесах по обробці масивних заготовок з металів, що мають високу електропровідність (наприклад, мідь, алюміній, латунь і т.ін).

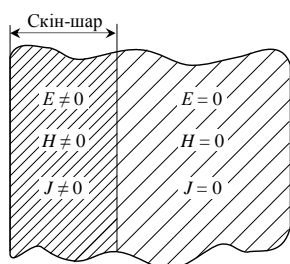


Рис. 5. Схема перетину елемента заготовки по її товщині. До пояснення «прозорості» провідника при впливі електромагнітного поля: E – напруженість електричного поля; H – напруженість магнітного поля; J – густина струму

Висновки

Визначено вплив нових властивостей тонкостінного металу при його магнітно-імпульсній обробці для технологічних процесів виробництва та ремонту автотранспортних засобів.

Високошвидкісна імпульсна дія приводить до появи нової якості в поведінці оброблюваного металу – гіперпластичності.

Ефект гіперпластичності при застосуванні магнітно-імпульсного методу дозволяє проводити деформацію нових легких і достатньо міцних сплавів алюмінію з різними добавками, що було неможливо досягти іншими методами.

Тонкостінність провідника визначається, як його геометричними розмірами так і тісно з ними пов'язаними електродинамічними характеристиками електромагнітного поля та електромагнітними властивостями самої заготовки.

Література

1. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов. – Х. : ХНАДУ, 2009 – 240 с.
 2. Гнатов А. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии для формовки кузовных элементов автомобиля: монография / А.В. Гнатов, Ю.В. Батыгин, Е.А. Чаплыгин. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 – 208 с.
 3. Особенности магнитно-импульсной обработки металлов в технологиях современности / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, А.А. Степанов [и др.] // Электротехника і електромеханіка. – Х. : НТУ «ХП». – 2011. – №1. – С. 72–75.
 4. Glenn S. Daehn [Электронный ресурс] – 2012. – Режим доступа: <http://www.ecr6.ohio-state.edu/~DAEHN>.
 5. Daehn G. P. Hyperplastic Forming: Process Potential and Factors Affecting Formability / G. P. Daehn, V. J. Vohnout, P. Datta // Superplasticity and Superplastic Forming; [Editors P. B. Berbon, M. Z. Berbon, T. Sakuma, T. G. Langdon]. – Volume 601. – 2000. – P. 247–253.
 6. Индукторные системы для магнитно-импульсной раздачи труб прямоугольной формой поперечного сечения / Ю. В. Батыгин, С. Ф. Головащенко, А. В. Гнатов [и др.] // Электротехника і електромеханіка. – Х. : НТУ «ХП». – 2010. – № 1. – С. 33–35.
 7. Магнитное поле и давления, возбуждаемые четырьмя попарно компланарными соленоидами в полости прямоугольной трубы / Ю. В. Батыгин, С. Ф. Головащенко, А. В. Гнатов [и др.] // Электротехника і електромеханіка. – Х. : НТУ «ХП». – 2010. – № 2. – С. 46–49.
 8. Батыгин Ю. В. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Щиголева // Электричество. – М., 2011. – № 4. – С. 55–62.
 9. Туровский Я. Техническая электродинамика / Туровский Я. – М.: Энергия, 1974. – 488 с. Рецензент: В.Б. Фінкельштейн, професор, д.т.н., ХНУМГ.
- Стаття надійшла до редакції 1 жовтня 2013 р.