

УДК 621.318.4

А.П. Фалалеев, д-р техн. наук, С.В. Огрызков, А.В. Шимченко

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

Ю.В. Батыгин, д-р техн. наук, Е.А. Чаплыгин, канд. техн. наук

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,

ул. Петровского, 25, г. Харьков, Украина, 61002

ДЕФОРМАЦИЯ ДВУХФАЗНОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ

Рассмотрены причины возникновения эффекта сверхпластичности в сталях. Исследована возможность регулирования режимов магнитно-импульсной рихтовки. Получена экспериментальная зависимость относительной деформации от силы тока, индуцируемого в заготовке.

Ключевые слова: *магнито-импульсное притяжение, магнито-импульсная обработка, сверхпластичность, электродинамические усилия, индукторная система*

Введение. Одна из тенденций в современном автомобилестроении – увеличение использования крупными производителями высокопрочных сталей для производства кузовов. К таким сталям относятся двухфазные легированные стали, мартенситные закаленные бористые стали, ТРИП-стали [1].

Применение таких материалов позволяет значительно повысить прочность кузова автомобиля, без значительного увеличения массы автомобиля. По сравнению с альтернативными материалами, применяемыми в кузовных конструкциях (пластмассами, алюминиевыми сплавами, композитными материалами), более технологичны в процессе изготовления. Применение сталей позволяет сохранять существующие технологии при производстве кузовных деталей. Однако восстановление таких деталей после дорожно-транспортных происшествий сопряжено с рядом проблем.

Одним из путей решения данных проблем является применение технологии магнитно-импульсного притяжения заданных участков тонкостенных проводящих листов [2]

Обзор литературных источников. Как показано в работах по обработке давлением, обработка металлов высокоскоростным импульсным действием или приложении магнитного поля к обрабатываемой детали приводит к повышению ее пластичности [3, 4]. Этот эффект получил название «сверхпластичности» или «гиперпластичности» [5]. При этом относительные деформации металлических образцов могут достигать 200 %. Практическое использование эффекта сверхпластичности (СП) позволяет деформировать без разрушения и штамповать изделия, производство которых невозможно известными методами (например высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов, применяемых в конструкциях кузовов современных автомобилей). Эффект повышения пластичности металла наблюдается и при магнитно-импульсной обработке [2]. Однако во всех работах отмечается, что условия возникновения должны определяться для конкретного материала и условий обработки. Проведенные исследования в основном описывают режимы при производстве металлических деталей, вопросы деформации кузовных деталей из современных материалов при ремонте не достаточно изучены.

Цель работы – анализ режимов магнитно-импульсной рихтовки тонкостенных листовых деталей из двухфазных сталей, применяемых в конструкции кузовов автомобилей и определение условий возникновения эффекта СП.

Исследование поведения двухфазных сталей при магнитно-импульсной рихтовке. В конструкции современных автомобилей применяются двухфазные стали марок DP 500, DP 600, DP 980. Двухфазные стали характеризуются микроструктурой, состоящей из феррита (до 85 %) с мартенситом, бейнитом и остаточным аустенитом. Химически они представляют низкоуглеродистые стали, которые за счет термомеханической обработки приобретают пластичность выше, чем у обыкновенных ферритно-перлитных сталей той или иной прочности. Для двухфазных сталей характерна большая работа упрочнения во время деформации, отсутствие площадки течения металла и малые значения отношения предела текучести к пределу прочности.

Двухфазные стали демонстрируют хорошую пластичность наряду с высокой прочностью и высокой степенью упрочнения на начальных стадиях деформации, что позволяет изготавливать детали методом холодной штамповки. Сложностью моделирования упруго-пластического поведения подобных сталей на этапах производства, во время столкновения и во время ремонтных операций обусловлена тем, что прочностные характеристики являются функцией всех предыдущих деформаций и температурных воздействий, начиная с момента производства [1]. Технологическая память двухфазной стали создает предпосылки для анизотропного поведения детали, изготовленной изначально из изотропного материала.

Наиболее существенное отличие сверхпластичного деформирования от обычного состоит в том, что напряжение течения слабо зависит от степени деформации и сильно от скорости деформации.

Состояние СП характеризуется:

- 1) повышенной чувствительностью напряжения течения сверхпластичных материалов к изменению скорости деформации;
- 2) большим ресурсом деформационной способности;
- 3) напряжением течения материала в состоянии СП, значительно меньшим предела текучести, характеризующего тот же материал в пластическом состоянии.

Признаки состояния СП проявляются в определенных условиях. Принципиальное значение имеют структурное состояние деформируемого материала, температурные условия и скорость деформации.

Так как при МИОМ не наблюдается нагрева до температур фазовых переходов, то предполагается, что эффект СП в данном случае объясняется структурной сверхпластичностью [5]. Размер зерна при этом должен быть меньше 10...15 мкм. Как правило, структурная СП наблюдается при температуре выше $0,4T_{пл}$ ($T_{пл}$ – температура плавления металла) и при скоростях деформации $\dot{\xi} = 10^{-4} \dots 10^{-1} \text{ с}^{-1}$.

Структурная СП наблюдается при обработке давлением с наложением магнитных или электрических полей, виброимпульсной штамповке [3, 4].

Имеющиеся гипотезы объясняют это тем, что металлы деформируются за счет рождения и перемещения дислокации или подвижных линейных дефектов кристаллической решетки. Изменяя состояние электронной подсистемы металла путем воздействия на него электромагнитным полем во время пластической деформации, можно активно влиять на условие движения дислокации, а импульсные нагрузки рожают новые дислокации тем самым возникает возможность менять пластичность материала.

Известно, что обычно пластическое течение сопровождается не прерывным упрочнением в процессе растяжения, затем следуют локализация деформации, образование шейки и разрушение. Вместе с тем, как показывает анализ истинных кривых растяжения, в условиях СП деформация уже при небольших степенях выходит на стадию, где пластическое течение развивается под действием не больших и постоянных напряжений практически без упрочнения до сотен и тысяч процентов удлинения, а иногда даже наблюдается разупрочнение. При этом развитие локализации деформации в виде образующихся шеек либо приостанавливается, либо происходит медленно на протяжении всего процесса растяжения.

Снижение усилия деформации практически не зависит от частоты следования импульсов в зоне высоких частот и почти линейно уменьшается с увеличением энергии в импульсе [3]. Макроструктурный анализ металла обрабатываемого виброимпульсным воздействием показывает существенное измельчение структуры и изменения зерна.

Для экспериментального определения усилий возникающих в заготовке при деформации применялась установка для магнитно-импульсной рихтовки (рисунок 1), индукторная система которой была доработана для проведения экспериментальных исследований.

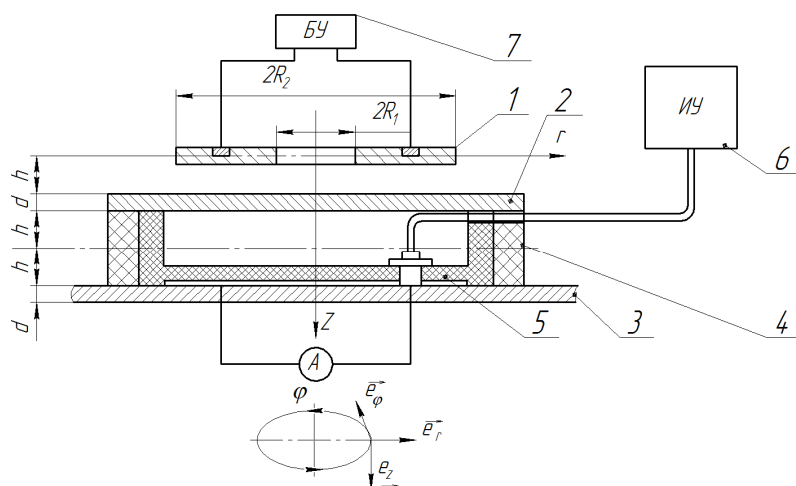


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки:
 1 – многослойный индуктор;
 2 – экран; 3 – заготовка;
 4 – диэлектрическая проставка;
 5 – проставка с датчиком давления;
 6 – измерительное устройство;
 7 – блок управления;
 $\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$ – направляющие орты

Рассмотрим процессы, протекающие в металле экрана и заготовки. В низкочастотном режиме действующих полей в металле вспомогательного экрана возбуждается сигнал [6]:

$$J_{\phi}^{(3)}(\psi, r) = -J_m \cdot \int_0^{\infty} f(x) \cdot \frac{e^{-x \frac{h}{d}} (1 - e^{-x})}{x} J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) dx, \quad (1)$$

где $J_m = \left(\frac{I_m}{R_2 - R_1} \right) \cdot \frac{\omega \tau}{2} \cdot \frac{dg(\psi)}{d\psi}$ – «условная» амплитуда индуцированного сигнала;

I_m и $g(\psi) = e^{-\delta_0 \psi} \cdot \sin(\psi)$ – амплитуда и фазовая зависимость возбуждающего тока в соленоиде;

$\psi = \omega \cdot t$ – фаза, t – время, $f(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{x \frac{R_1}{d}}^{x \frac{R_2}{d}} y \cdot J_1(y) dy$; r – радиус вмятины.

В металле листовой заготовки индуцируется ток:

$$J_{\phi}^{(3)}(\psi, r) = -J_m \cdot \int_0^{\infty} f(x) \cdot e^{-x \left(\frac{3h}{d} + 1 \right)} \cdot \frac{(1 - e^{-x})}{x} J_1\left(x \frac{r}{d}\right) dx. \quad (2)$$

В низкочастотном режиме, силами отталкивания можно пренебречь [6], тогда при жёстко фиксированном вспомогательном экране на деталь кузова будет действовать только сила притяжения. Зависимость для силы притяжения (силы Ампера) будет иметь вид [6].

$$F_{attr}(\psi, r) = \mu_0 \cdot J_{\phi}^{(3)}(\psi, r) \cdot J_{\phi}^{(3)}(\psi, r) \cdot \frac{r}{(2h)}. \quad (3)$$

Максимальная напряженность магнитного поля в рабочей зоне заготовки будет равна [7]

$$H_{mp} = \frac{2J_{m\phi}^{(3)}(\psi, r)}{r \ln \frac{2R_2}{r}}. \quad (4)$$

где $J_{m\phi}^{(3)}$ – максимальная амплитуда тока в заготовке.

Таким образом, сила притяжения при постоянных расстояниях между индуктором, экраном и заготовкой будет зависеть от величин токов, возникающих в заготовке и экране, которые зависят от параметров тока в соленоиде. Напряженность магнитного поля в заготовке будет зависеть от тока в индукторе и расстояния между индуктором и заготовкой.

Для определения зависимости пластичности от напряженности магнитного поля необходимо было обеспечить постоянство силы притяжения. Величина силы притяжения регулировалась расстоянием $2h$ между экраном и заготовкой, путем изменения высоты проставки 4. Величина давления притяжения для каждого значения индукции предварительно определялась датчиком давления в точке предполагаемого максимального давления. Пластичность оценивалась величиной относительной деформации в точке определения усилия. Напряженность магнитного поля оценивалась амплитудой силы тока индуцируемого в заготовке. После измерения давления проставка с датчиком 5 демонтировалась и производилась деформация заготовки единичным импульсом в индукторе. Энергия импульса варьировалась изменением времени включения ключа разряда батареи конденсаторов. Зависимость давления от силы тока показана на рисунке 2.

Выводы. При воздействии магнитного поля и импульсной нагрузки в двухфазных сталях наблюдается повышение пластичности, что можно объяснить эффектом сверхпластичности. При изменении напряженности магнитного поля наблюдается наличие максимума относительной деформации заготовки. Увеличение энергии импульсов сдвигает максимум относительной деформации в зону более низких значений тока в заготовки, что соответствует более низкому значению напряженности магнитного поля.

Направления дальнейших исследований. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение изменений микроструктуры сталей при магнитно-импульсной рихтовке и определение оптимальных режимов рихтовки для различных кузовных деталей.

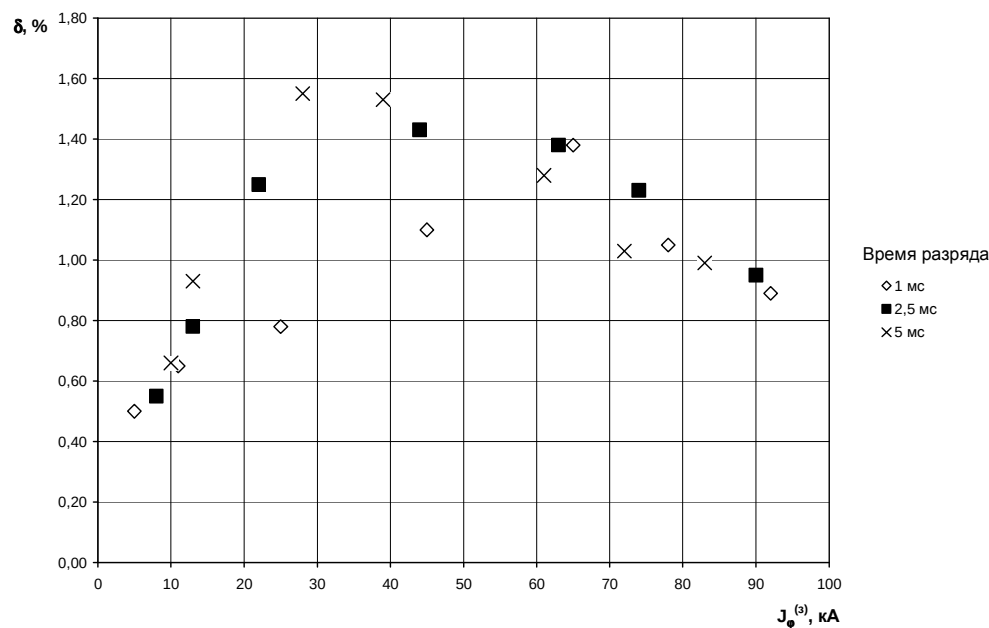


Рисунок 2 – Зависимость относительной деформации от силы тока в заготовке

Библіографічний список використаної літератури

1. Фалалеев А.П. Обеспечение пассивной безопасности при кузовном ремонте / А.П. Фалалеев. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 183 с.
2. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. В 3 т. Т. 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А.В. Гнатов; под ред. Батыгина Ю.В. – Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2009. – 249 с.
3. Малюшевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии / П.П. Малюшевский. – К.: Наук. думка, 1983. – 272 с.
4. Делюсто Л. Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях / Л. Г. Делюсто. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
5. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов / О.А. Кайбышев. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.
6. Batygin Y. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals / Y. Batygin, S. Golovashchenko, A. Gnatov // J. of Materials Processing Technology. – 2014. – № 214 (2). – P. 390 – 401.
7. Белый И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И. В. Белый, С. М. Фертик, Л. Т. Хименко – Харьков : Вища школа, 1977. – 168 с.

Поступила в редакцию 26.01.2014 г.

Фалалеев А. П., Огризков С.В., Шімченко А.В., Батигін Ю.В., Чаплигін Є.О. Деформація двофазної сталі в процесі магнітно-імпульсного рихтування

Розглянуті причини виникнення ефекту сверхпластичності в сталях. Досліджена можливість регулювання режимів магнітно-імпульсного рихтування. Отримана експериментальна залежність відносної деформації від сили струму, що індукується в заготівці.

Ключові слова: магнітно-імпульсне притягання, магнітно-імпульсна обробка, надпластичність, електродинамічні зусилля, індукторна система.

Falaleev A.P., Ogryzkov S.V., Shimchenko A.V., Batygin Y.V., Chaplygin E.A. DP steel strain during magnetic pulse straightening

The reasons of origin effect of hyperplasticity in steels are considered. Adjusting possibility by the modes of magnetically-impulsive straightening is explored. Collected experimental dependence of relative deformation from strength of current inducted in the purveyance.

Keywords: magnetic impulse gravity, magnetic pulse treatment, superplasticity, electrodynamic forces, induction system.