

УДК 629.11 : 004.9

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ РЕЛЬЕФА НА ДОННОЙ И БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ

© 2018 И. А. Беляева¹, В.А. Глущенков^{1,2}

¹Самарский национально исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

²Самарский научный центр Российской академии наук

Статья поступила в редакцию 15.11.2018

Полые детали нередко требуют формообразования рельефа на боковой или донной части рельефа конструктивного или информационного назначения. В статье предлагается использовать для нанесения рельефа технологию магнитно-импульсной формовки. Приведены технологические схемы. Основное внимание в статье уделено компьютерному моделированию процесса. Использован программный продукт LS-Dyna и входящий в него электромагнитный модуль (Eddy Current). Описана методика и результаты компьютерного моделирования. Полученные данные позволяют описать процесс динамического деформирования и выдать рекомендации по управлению им с целью получения высокого качества рельефа.

Ключевые слова: полые детали, рельеф, магнитно-импульсная формовка, компьютерное моделирование.

ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

Номенклатура полых деталей от цилиндрических, прямоугольных до сложной формы, получаемых из листовых заготовок, составляет значительный процент, среди всей тонколистовой продукции многих отраслей машиностроения: от аэрокосмической до пищевой.

Так, например, это элементы корпусных и трубопроводных систем л. а. [1], корпуса электротехнических конденсаторов [2], приборов, медицинских изделий, товаров народного потребления, баночной продукции [3] в пищевой промышленности и многие другие. На их боковой или донной поверхностях часто формуют различного вида рельеф для увеличения жёсткости таких изделий, их несущей прочности. Это различного рода ребра жёсткости. Иногда боковой или донный рельефы предназначены для маркировки продукции или фирмы – производителя. Элементы рельефа могут нести эстетическое назначение, улучшения потребительских свойств изделий.

На рис.1 – в качестве примера приведены фотографии косинусных конденсаторов, изготовленные из алюминиевого сплава с продольными ребрами и алюминиевой банки для различного рода напитков с логотипом фирмы – производителя.

Беляева Ирина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением Самарского университета.

E-mail: belyaeva-otmr@yandex.ru

Глущенков Владимир Александрович, кандидат технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением Самарского университета. Начальник отдела Самарского НЦ РАН. E-mail: vgl@ssau.ru

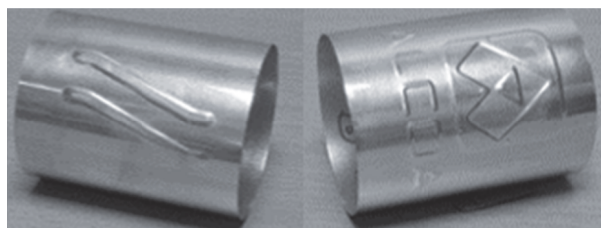


Рис. 1. Примеры деталей с рельефом на боковой поверхности

Формообразование бокового рельефа непростая технологическая задача. Во-первых, потому что при осуществлении предыдущей технологической операции (вытяжки) ресурс пластичности металла уже значительно исчерпан. Хватит ли оставшегося ресурса на формообразование бокового рельефа? А во-вторых, существующие (возможные) технологии формообразования сложного рельефа на боковой поверхности полого изделия далеки от совершенства из-за ограниченного пространства внутри полого изделия для размещения технологической оснастки, сложности её конструкции, малой производительности процессов. Кроме того, чёткость рельефа (малые радиуса сопряжения)

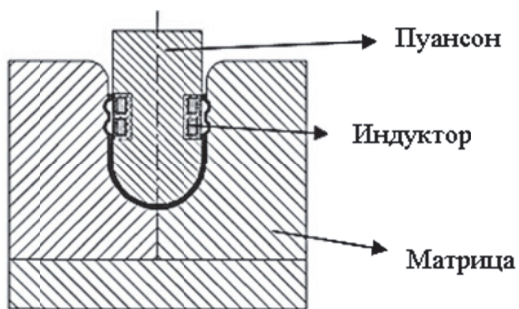


Рис. 2. Схема магнитно-импульсной формовки на боковой поверхности полый детали

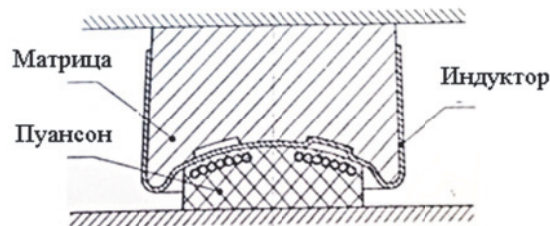


Рис. 3. Схема формовки рельефа на донной части полый детали

требуют значительных давлений. Конструктивно-технологические ограничения при выполнении бокового рельефа вынуждают конструкторов и дизайнеров в отдельных случаях полностью отказаться от формовки бокового рельефа или пойти на ослабление требований к нему.

Данная статья посвящена оценке возможности применения для получения бокового и донного рельефа магнитно-импульсной технологии формовки [4,5,6], подразумевая использование её преимуществ: бесконтактное воздействие, динамический характер нагружения, сверхмалое машинное время и другие.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ФОРМОВКИ РЕЛЬЕФА НА БОКОВОЙ И ДОННОЙ ЧАСТИ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ

Исходной заготовкой для последующей формовки рельефа является деталь, полученная с помощью предварительной операции «вытяжка». Такие детали имеют вытянутую боковую поверхность и донную часть.

В связи со сложностью размещения разъемной технологической оснастки внутри полый детали наиболее предпочтительной является схема магнитно-импульсной формовки «на раздачу» (рис. 2). [4]. Схема формовки рельефа на донной части приведена на рис 3.

При формовке рельефа необходимо определить максимальную глубину, ширину и минимальные радиуса сопряжения рельефа и, кроме того, при отработке технологии формовки желательно оценить значение (уровень) потребной энергии формообразования.

Понять все те явления, которые сопровождают динамическую формовку, лучше всего используя компьютерное моделирование процесса [7, 8].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ ФОРМОВКИ

Цель компьютерного моделирования – с помощью ПК L.S. Dyna модуля Eddy current [9], вхо-

дящего в его состав, исследовать процесс динамического формообразования рельефа, оценить влияние интенсивности нагрузки на процесс деформирования, провести анализ качества получаемого рельефа (заполнения материалом заготовки требуемой формы в матрице), что послужит основой для создания новой технологии: Компьютерное моделирование предполагается осуществить как при формовки рельефа на боковой поверхности, так и на донной части банки.

Объект исследования. В качестве заготовки использовалась цилиндрическая банка, размеры которой даны на рис.4, а механические свойства ее материала в таблице 1.

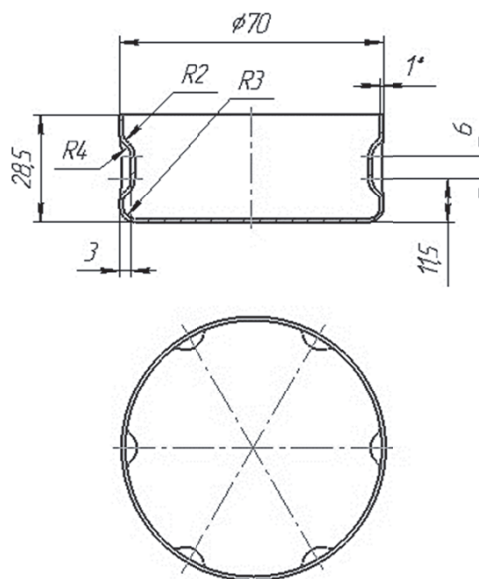


Рис. 4. Размеры цилиндрической банки (заготовки).
Материал алюминиевый сплав

РЕЛЬЕФ НА ДОННОЙ ЧАСТИ

Рельеф на донной части представлял собой букву «L», что позволяло исследовать процесс деформирования в двух перпендикулярных направлениях (рис. 5).

Конечно-элементная модель заготовки. Для моделирования заготовки использовались объемные элементы «Element Solid» - восьми уз-

Таблица 1. Свойства материала заготовки

Свойства	Значения
Модуль упругости	71 ГПа
Предел текучести	0,218 ГПа
Предел прочности	0,317 ГПа
Коэффициент Пуассона	0,33
Плотность материала	2657 кг/м ³
Удельная электропроводность	15 Ом ⁻¹ м ⁻¹

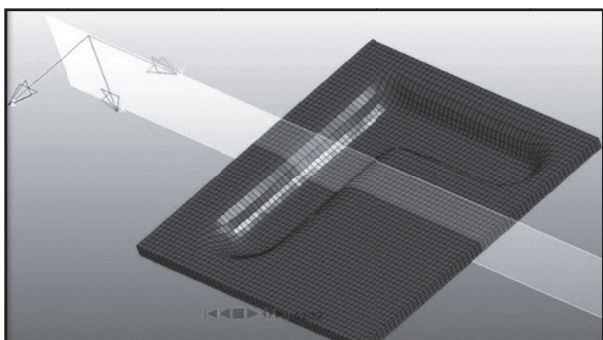


Рис. 5. Рельеф на данной части

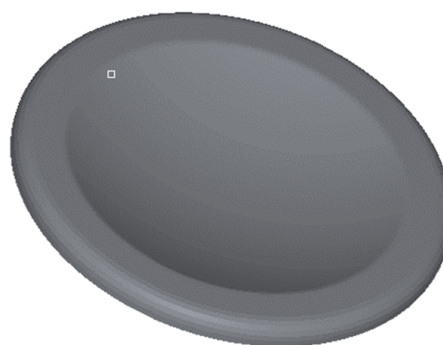


Рис. 6. Внешний вид КЭМ заготовки

ловые элементы типа «hexa». Модель заготовки имела три слоя элементов по толщине. Для выполнения моделирования разработана САЕ модель фрагмента заготовки. Характеристики модели заготовки: средний размер элементов модели – 0,4 мм, объемный прямоугольный элемент – HEX 8, количество элементов 118000. Внешний вид модели донной части заготовки показан на рис. 6.

Конечно-элементная модель токопровода индуктора. Моделирование токопровода также осуществлено объемными элементами типа «Hexa», причём в центре его сечения всегда должен быть узел. На рис. 7 приведена принятая в моделировании модель токопровода.

Конечно-элементная модель матрицы. КЭМ матрицы строилась по двум вариантам как с помощью объёмных элементов, так и плоскими элементами типа «shell». В обоих случаях МКЭ адекватно отражала заданную геометрию с радиусными локальными зонами и другими рельеф-

ными особенностями профиля. Конечные размеры МКЭ матрицы должны быть сопоставимы с конечными размерами заготовки. В противном случае возможно преждевременное завершение расчёта в результате некорректной обработки контактного взаимодействия. На рис. 8 показана КЭМ (конечно-элементная модель) матрицы.

Создание КЭМ обеспечивает для индуктора, заготовки и матрицы осуществлялось в препроцессорах Altair Hyper Mesh и LSTC LS-PrePost.

Граничные условия. В расчёте матрица и индуктор закреплялись неподвижно. Заготовка и матрица взаимодействовали между собой через контактные поверхности. Для стабильного расчёта в расчётной модели не было взаимных пересечений или проникновений. Взаимное расположение заготовки, матрицы и токопровода индуктора, используемых при создании расчётной модели для формообразования рельефа донной части банки, показано на рис. 9.

Результаты моделирования рельефа на дон-

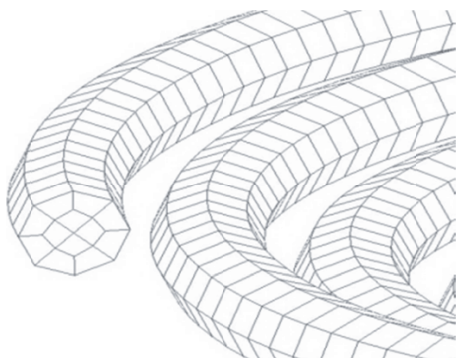


Рис. 7. Модель токопровода индуктора



Рис. 8. Внешний вид конечно-элементной модели матрицы

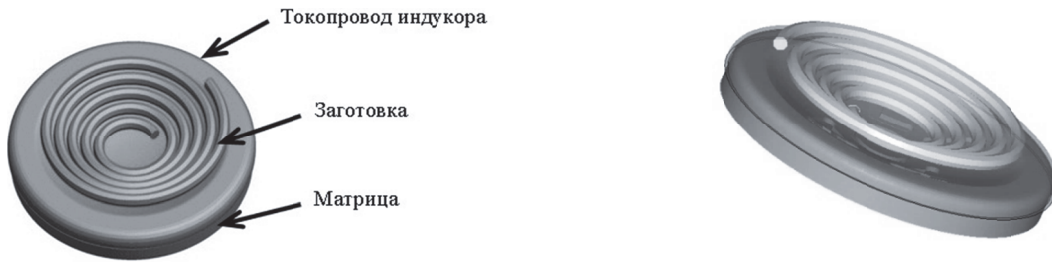


Рис. 9. Взаимное расположение моделей заготовки, матрицы и индуктора

ной части банки. В результате компьютерного моделирования:

1. удалось определить наиболее эффективное с точки зрения качества оформления рельефа месторасположение его относительно рабочей зоны индуктора (витков токопровода);
2. изучить кинематику процесса динамической формовки и оценить напряжённо-деформированное состояние (н.д.с.) материала заготовки, выявив наиболее опасные зоны;
3. определить влияние интенсивности нагрузки на чёткость заполнения рельефа.

Так, исследовалось деформированное состояние материала заготовки при различных вариантах расположения рельефа по центру матрицы и индуктора, по середине рабочей зоны индуктора и на расстоянии $2/3$ от центра индуктора (рис.10).

Результаты моделирования деформированного состояния материала заготовки при различных вариантах расположения индуктора, матрицы, рельефа показаны на рисунках 11-13.

Как видно из рисунков 11-13, при центральном расположении рельефа и индуктора наблю-

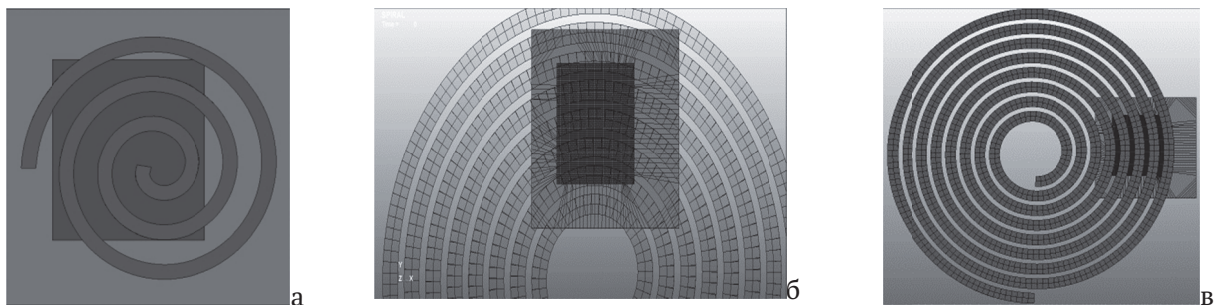


Рис. 10. Варианты расположения рельефа по центру матрицы и индуктора (а), посередине рабочей зоны индуктора (б) и на расстоянии $2/3$ от центра индуктора (в)

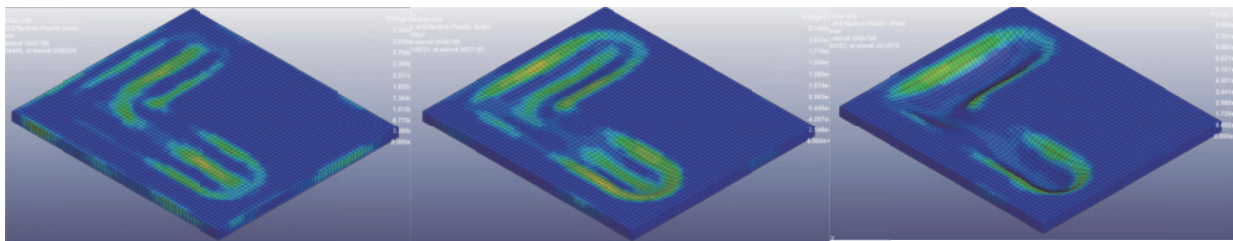


Рис. 11. Результаты моделирования процесса формовки рельефа во времени при центральном взаимном расположении токопровода индуктора, матрицы и рельефа

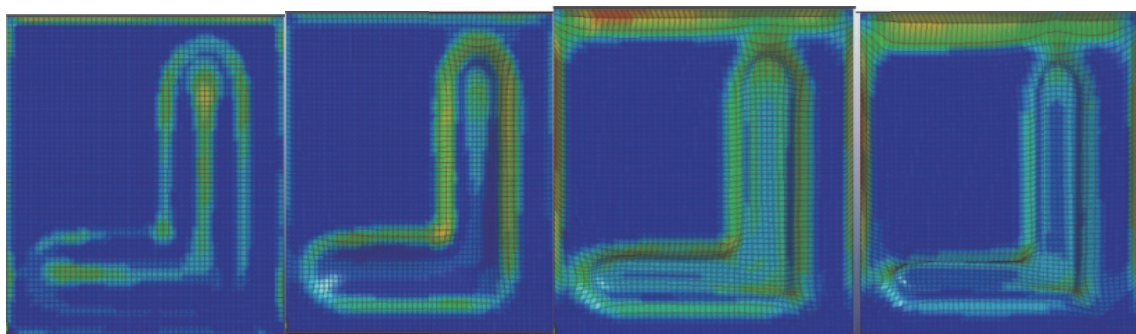


Рис. 12. Результаты моделирования процесса формовки рельефа по схеме расположения рельефа матрицы по центру рабочей зоны индуктора

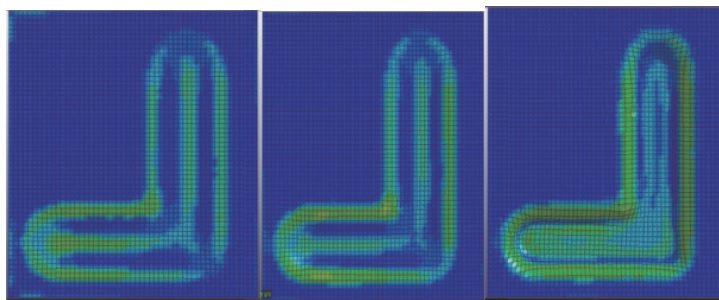


Рис. 13. Результаты моделирования формовки рельефа распределение деформации при оптимальном (2/3 от центра) его взаимном расположении по отношению к виткам токопровода индуктора

дается недоформовка из-за провала магнитного поля в центре индуктора (рис. 11). При размещении рельефа по середине рабочей зоны индуктора имеет место неравномерность заполнения профиля (рис. 12). И только при расположении рельефа на расстоянии 2/3 от центра индуктора (рис. 13) наблюдалось наиболее качественное и более -менее равномерное заполнение рельефа.

Влияние интенсивности нагрузки, выражаемой через величину тока в индукторе, на запол-

няемость рельефа показано на рис. 14.

Некоторые значения геометрических размеров полученного при этом рельефа приведены в таблице 2.

Кроме того, на рис.13 можно видеть зоны опасных сечений и оценить величину критических значений деформаций, но более информативной об образовании опасных зон является картина напряженного состояния, показанная на рисунке 15.

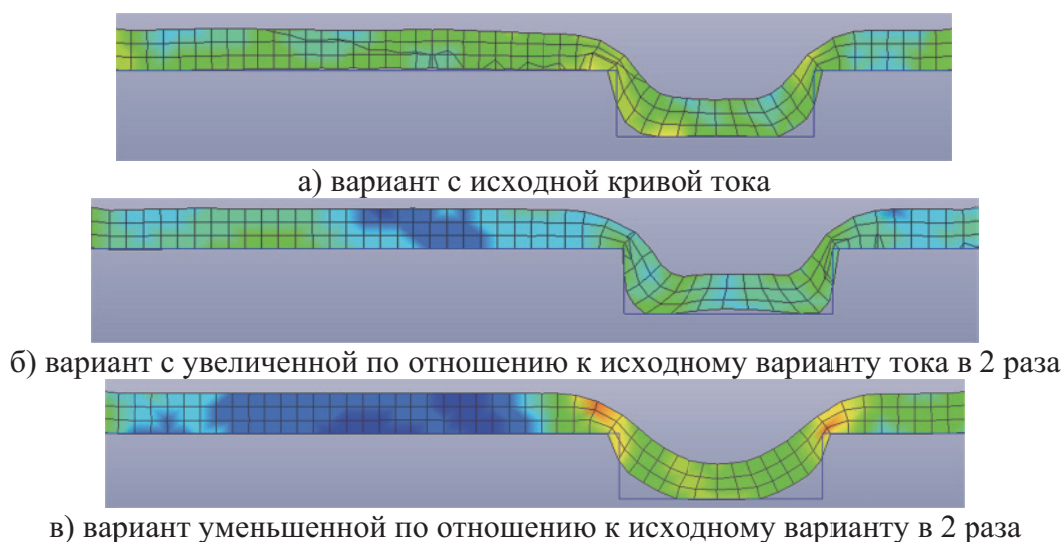


Рис. 14. Деформированное состояние материала заготовки при различной интенсивности нагружения (величины тока в индукторе)

Таблица 2. Влияние интенсивности тока на геометрию заполнения рельефа

Интенсивность тока, кА	Длина прямолинейного участка рельефа, мм	Радиус рельефа в придонной части, мм
30	0,9	0,7
60	1,2	0,5
120	1,6	0,4

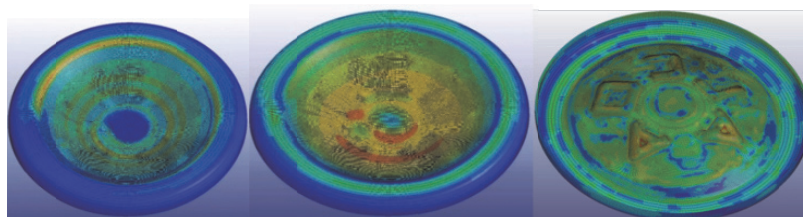


Рис. 15. Напряженно-деформированное состояние материала заготовки при формообразовании донного рельефа

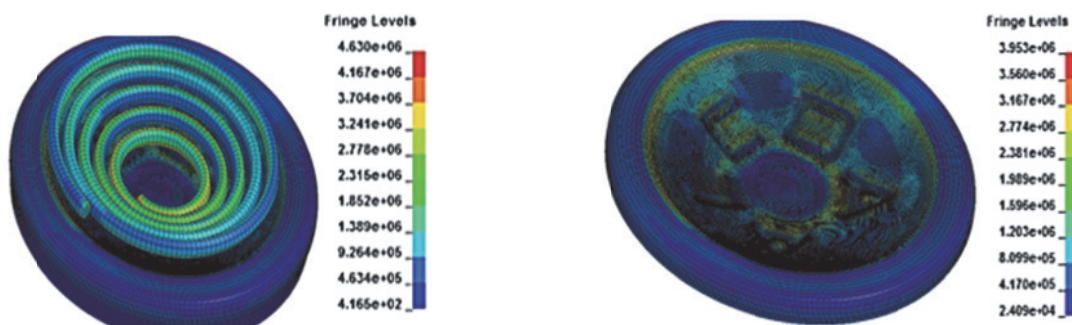


Рис. 16. Ток в индукторе и плотность наведенного тока в заготовке

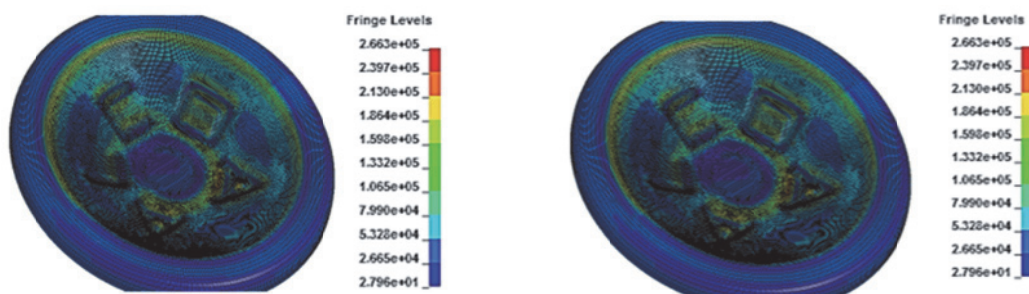


Рис. 17. Характер электромагнитного воздействия на заготовку в конечный момент времени

На полученных картинах видно несколько локальных зон, где напряжения превысили предел прочности материала, что прогнозирует разрушение материала в этих местах. Обработка результатов виртуальных экспериментов позволила определить предельную глубину рельефа, равную 0,9 мм, при максимальной скорости перемещения – 33 м/сек.

С помощью электромагнитного модуля получены дополнительные, необходимые для описания особенностей магнитно-импульсной формовки, получены картины распределения тока в индукторе, заготовке, характер электромагнитных сил в зоне их воздействия на заготовку (рис. 16, 17).

РЕЛЬЕФ НА БОКОВОЙ ЧАСТИ

На боковой поверхности формовался логотип фирмы производителя банки «Alcoa». Форма логотипа даёт возможность оценить качество получаемого сложного рельефа, равномерно распределённого по окружности банки (рис. 18).

Расчётная модель заготовки с боковым рельефом (продольными или поперечными рифтами, текстовой надписью, логотипом...) отличается от модели донной части тем, что цилиндрический индуктор располагается внутри заготовки.

Конечно-элементная модель. Для удобства пользователя модель разбита на несколько include-файлов:

Blank.k – файл, содержащий узлы и элементы компонента (part) заготовки (в задачах с



Рис. 18. Внешний вид фрагмента банки с рельефом на боковой поверхности, получаемым в результате магнитно-импульсной формовки

уменьшенной заготовкой также содержит информацию о закреплении);

Die.k – файл, содержащий узлы и элементы компонента (part) матрицы;

Spiral.k – файл, содержащий узлы и элементы компонента (part) кондуктора;

Start.k – основной запускной файл, содержащий в себе ссылку на

Файл struc_ex3.k и управляющие карты модуля Eddy current;

Struc_ex3.k – файл, содержащий карты управления расчетом, информацию о физических свойствах компонентов и параметры контактов, а так же содержит в себе ссылки на файлы заготовки и инструмента (blank., die.k, spiral.k).

В таблицах 3–5 приведено более подробное описание состава Include-файлов, содержащих КЭМ заготовки, матрицы и индуктора.

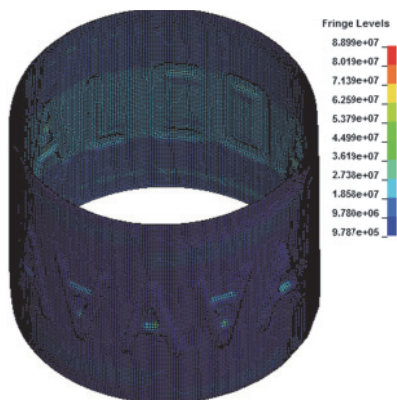


Рис. 19. Распределение сил Лоренца по боковой поверхности банки

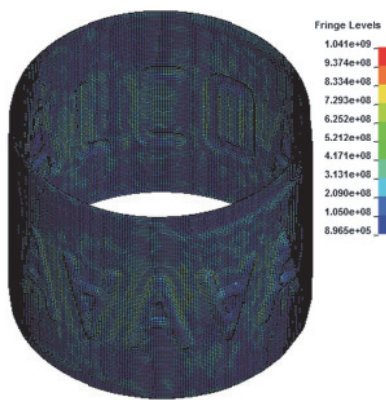


Рис. 20. Напряженное состояние материала заготовки на заключительном этапе магнитно-импульсного воздействия

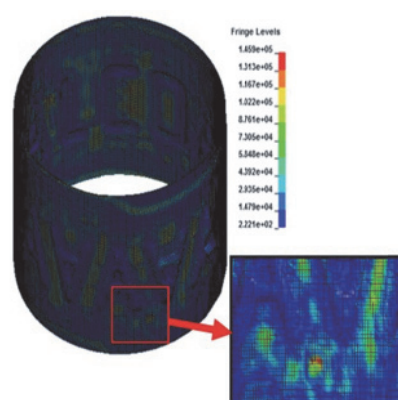


Рис. 21. Картина радиального перемещения точек заготовки по всему периметру под воздействием сил Лоренца

РЕЗУЛЬТАТ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 21 представлена картина радиального перемещения точек заготовки по всему периметру под воздействием сил Лоренца, картина распределения которых по поверхности банки приведена на рис.19. Максимальная глубина рельефа 0,8 мм. Пример распределения напряжений по поверхности банки в районе формирования рельефа показан на рис.20, что позволяет выявить наиболее напряженные участки заготовки.

Разработанная и опробованная для конкретного случая методика компьютерного моделирования даёт возможность описать во времени процесс рельефной магнитно-импульсной формовки, установить причины того или иного поведения металла при этом. Разработанная методика при смене граничных условий может быть использована для моделирования комбинированной технологии «вытяжки – формовки».

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика компьютерного моделирования рельефной формовки, осуществляемой с помощью импульсного магнитного поля, с использованием программного продукта LS Dyna и электромагнитного модуля «eddy current».

Предложенная методика облегчит задачу дальнейшего её совершенствования следующим исследователям магнитно-импульсного деформирования.

2. Методика опробована при моделировании рельефа на донной и боковой поверхностях алюминиевой банки.

3. С помощью проведенных исследований

выбраны оптимальные геометрические размеры рельефа и режимы нагружения.

4. Компьютерное моделирование позволило оценить напряжённо-деформированное состояние материала заготовки не только в исследуемом сечении рельефа, но и представить картину н.д.с. в общем виде, включая межрельефное пространство.

5. Созданный инструмент моделирования позволяет познать и описать механизм и особенности локального деформирования при магнитно-импульсном воздействии, то есть с учётом наведённых токов, меняющихся скоростей деформирования, свойств металла, угловых деформаций, явлений пружинения, отскока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абибов А.Л., Бирюков Н.М., Бойцов В.В. Технология самолетостроения // Машиностроение.1982. 551 с.
2. Горячева Г.А., Добромыслов Е.Р. Конденсаторы (Справочник). М.: Радио и Связь. 1984. 88с.
3. Журавлев Г.М., Ле Минь Дык. Разработка технологического процесса изготовления цельной банки // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Т. 2. № 6. С. 285-291.
4. Глуценков В.А., Карпунин В.Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материалов. Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. 208 с.
5. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Киев: Вища школа. 1977. 168 с.
6. Глуценков В.А.. Специальные виды штамповки. В 2 ч. Ч.2. Динамические методы деформирования Самара. Изд-во СГАУ. 2012. С. 62-94.
7. Беляева И.А., Глуценков В.А. Раздача труб импульсным магнитным полем. Результаты компьютерного моделирования // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 6(3). С. 657-665.

8. Беляева И.А., Глушченков В.А. Моделирование процесса магнитно-импульсного обжима цилиндрических образцов // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Том 17. № 2. С. 113-118
9. Дубинский С.И. Программный комплекс ANSYS/LS-DYNA 8.0 // Инструменты АРМ. 2014. № 1. С. 34-38

COMPUTER SIMULATION OF MAGNETIC PULSE FORM RELIEF FORMATION ON THE BOTTOM AND SIDE SURFACES OF HOLLOW PARTS

© 2018 I.A. Belyaeva¹, VA Glushchenkov^{1,2}

¹ Samara National Research University named after academician S.P. Korolyev

² Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

Hollow items often require forming a relief on the side or bottom of the relief in constructive or informational purposes. The article offers to use the technology of magnetic pulse shaping for applying relief. The technological schemes were given. The main attention is focused on the computer modeling process. The pro-software product LS-Dyna and the incoming electromagnetic unit (Eddy Current) were used. The technique and results of computer simulation are described. Received data allows to describe the process of dynamic deformation and make recommendations for users managing them in order to obtain a high-quality relief.

Keywords: hollow parts, topography, magnetic pulse forming, computer modeling.

Irina Belyaeva, Ph.D., Associate Professor of the Department of Processing of Metals Pressure, Samara University.

E-mail: belyaeva-ommr@yandex.ru

Vladimir Glushchenkov, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Processing of Metals Pressure, Samara University, Head of the Department of Samara Scientific Center, Russian Academy of Sciences.

E-mail: vgl@ssau.ru