УДК 621.98.044.7:621.757.002

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ОБЖИМА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

© 2015 В.А. Глущенков <sup>1</sup>, И.А. Беляева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский научный центр РАН <sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 05.02.2015

В статье рассматриваются методика и результаты компьютерного моделирования свободного обжима труб под действием динамической нагрузки - импульсного магнитного поля. Рассмотрены кинематика процесса, изменение напряженно-деформированного состояния материала заготовки на этапах равномерного деформирования и после потери устойчивости (гофрообразования). Моделирование осуществлялось при различных формах и интенсивности нагрузки, граничных условиях. Полученные результаты являются основой для дальнейшего анализа процессов взаимодействия заготовки с оснасткой.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, обжим труб, импульсное магнитное поле

## Постановка вопроса

Во многих отраслях машиностроения находит применение магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ). Этому виду обработки посвящаются специализированные научно-технические конференции [1, 2]. При реализации технологий МИОМ, при изготовлении деталей из труб, во многих случаях рассматриваются(самостоятельные или сопутствующие) процессы свободного обжима цилиндрических заготовок. Так, при любом процессе формообразования деформирование заготовки начинается с ее свободного обжима в зазоре S между ней и оправкой любой формы (рис.1).

Поэтому исследование процесса свободного обжима заготовки до взаимодействия с оправкой представляется важным, поскольку данный процесс в дальнейшем весьма сильно влияет на качество готовых деталей.

Физическое моделирование процессов обжима требует больших материальных затрат, сложной измерительной техники и не всегда возможно изза ограниченного доступа к объекту исследования.

Компьютерное (математическое) моделирование снимает эти проблемы, делает процесс исследования более полным, информационным и полезным для разработки технологий МИОМ [3].

Беляева Ирина Александровна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЛ-41. E-mail: vgl@ssau.ru





#### Методика компьютерного моделирования

Для компьютерного моделирования процессов магнитно-импульсного свободного обжима выбрана расчётная среда MSC/NASNRAN/MSC. MARC. Выбор данного программного продукта обусловлен его относительной простотой осуществления препроцессорной стадии и малым временем решения динамических задач [4].

В качестве физического объекта, для примера, использовался фрагменттонкостенной алюминиевой трубы со следующими геометрическими размерами: диаметр 50 мм, толщиной стенки 1,0 мм, длиной 15 мм. Материал трубы сплавы АДО, АМг2М, АМг6, механические свойства которых приведены в табл. 1).

Для таких материалов принята линейная модель (аппроксимация) их упрочнения (рис. 2).

Принятые характеристики модели: средний размер элементов – 0,5 мм, тип элементов - НЕХ 8, количество элементов 25200, количество узлов 34560. По толщине рассматривалось три слоя.

Глущенков Владимир Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела металлофизики СамНЦ РАН, профессор кафедры обработки металлов давлением СГАУ. E-mail: vgl@ssau.ru

| Наименование            | Обозначение         | Сплав АДО             | Сплав АМг3                    | Сплав АМг6             |
|-------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------|
| Модуль упругости        | E                   | 62255 МПа             | 95328 МПа                     | 126642 МПа             |
| Предел прочности        | $\sigma_{\text{B}}$ | 80 МПа                | 230 МПа                       | 350 МПа                |
| Предел текучести        | $\sigma_{\rm T}$    | 45 ÷ 50 МПа           | 110 ÷ 120 МПа                 | 210 ÷ 230 МПа          |
| Коэффициент<br>Пуассона | μ                   | 0,36                  | 0,35                          | 0,34                   |
| Плотность материала     | ρ                   | 2,7 Г/см <sup>3</sup> | <b>2,64</b> Г/см <sup>3</sup> | 2,65 Г/см <sup>3</sup> |

Таблица 1. Свойства используемых при моделировании материалов



Рис. 2. Линейная модель поведения материалов

Для моделирования принято два варианта граничных условий. Для анализа процессов обжима фрагмента трубы закрепление торцев не производилось. При этом использовался расчетный метод инерционного уравновешивания при статическом расчете (инерция релиф).

Для другого варианта обжима расчетная модель фрагмента трубы закреплялась с одного из торцев. По всему контуру торцевого сечения запрещались перемещения по всем степеням свободы. Угловые повороты не запрещались. Для этого варианта длина исходной заготовки была увеличена до 20 мм. На рис. 3 приведены расчетные модели процессов свободного обжима и обжима с одним из закрепленных торцев. В качестве импульсного давления, прикладываемого к заготовке, выбиралось давление, соответствующее форме и периоду разрядного тока. Электромагнитное воздействие вызывает в заготовке объемную распределенную нагрузку. Однако ее моделирование требует большой трудоемкости, особенно для криволинейных поверхностей, создания и использования специального «электромагнитного» модуля.

Поэтому в представленном, в данной статье, моделировании использовалась нагрузка, прикладываемая равномерно по всей длине к внешней поверхности трубы. График импульса давления брался в нормированном по максимуму виде, что позволяет легко масштабировать величину нагрузки.

Прежде чем переходить к собственно моделированию процессов обжима был выполнен модальный анализ, позволяющий определить низшие собственные частоты и их формы колебаний (моды), то есть какую форму примет заготовка на той или иной собственной частоте, будет ли деформироваться подобным образом при достижении резонанса на каждой из этих частот (рис. 4). Модальный анализ выполнен для заготовок из трех марок сплава. Установлено, что качественные картины колебаний не меняются, меняются только численные значения найденных частот.



Рис. 3. Расчетные модели обжима труб с различными граничными условиями



первая низкая – изгибная; вторая низкая – крутильная; третья низкая – крутильно-изгибная; материал ADO

## Результаты моделирования

Для сравнения процессов свободного обжима при статическом и динамическом нагружении, для выявления их «плюсов» и «минусов» сначала

Давление 0,001 МПа, Перемещение 0,01 мм Напряжение 0,58 МПа

Упругая деформация Развитие потери устойчивости



Давление 0,5729 МПа, Перемещение 0,508 мм Напряжение 55 8 МПа

Переход в пластическое состояние, момент потери устойчивости

выполнено моделирование процессов обжима при использовании статической нагрузки величиной от 0,001 МПа до 0,774Мпа. Результаты моделирования представлены на рис. 5. Из приведенных рисунков видны перемещения и из-



Давление 0,7 МПа, Перемещение 7,5 мм Напряжение 110МПа

Переход к моде 3 Развитие потери устойчивости

Давление 0,636 МПа Перемещение 3,83 мм Напряжение 122,5 МПа



0,774 MПa

Давление

Перемещение 12,4 мм

Напряжение 263,0 МПа



 Давление
 0,962 МПа

 Перемещение
 22,9 мм

 Напряжение
 450,0 МПа

 Высокая вероятность
 образования трещин и

 разрывов
 разрывов

**Рис. 5.** Характер изменения формы образца при статическом деформировании и напряженного состояния материала при различных значениях внешнего давления

менения напряженного состояния от величины нагрузки. Так, на рис. 5(а, б) показано возрастание напряжений, они неравномерны, но потери устойчивости заготовки не наблюдается, а на последующих рис. 5(в-е) с возрастанием уровня напряжений наблюдается уже потеря устойчивости в соответствии с модальными формами 1 - 3. Потеря устойчивости (складкообразование) наступает при нагрузке 0.6 МПа.

До нагрузки в 10 Мпа трубчатый образец деформируется без искажения цилиндрической формы. При дальнейшем увеличении нагрузки наступает потеря устойчивости, начинают образовываться гофры. Изменение деформационного состояния материала обжимаемой заготовки от величины импульса можно наблюдать на рис. 7.

Как видно из рисунков стенка заготовки подвержена объемному сжатию. При увеличении нагрузки в стенках заготовок образуются участки переменных деформаций, в пределе переходящих от сжатия к растяжению (б) – это и есть участки образования складок. Более наглядно это видно из тензорного представления деформаций (рис.8).

На графиках (рис. 9 и 10) показаны зависимости перемещений (рис. 9) и скорости деформирования (рис.10) во времени стенки трубы при её обжатии под действием импульсов нагрузки разного уровня и формы (рис. 11).

После прохождения пика нагрузки (16-17 мкс) скорость уменьшается и даже может изменить направление, это вызвано колебаниями заготовки.



Рис. 6. Перемещение стенок трубы при динамическом обжатии



Рис. 7. Деформация трубы при обжатии

Нагрузка в 40МПа



Рис. 8. Тензор деформаций при свободном обжатии



Рис. 9. Перемещение стенки трубы при обжатии



Рис. 10. Зависимость скорости перемещения стенки трубы при обжатии нагрузкой разного уровня



Время, сек

**Рис. 11.** Зависимость скорости перемещения стенок трубы от формы, величины и длительности импульса, при свободном обжатии

Кроме того, скорости разняться, так как представлены для точек выступов и впадин после потери устойчивости. При динамическом нагружении картина развития напряженно- деформированного состояния несколько иная (рис. 6).

Таким образом, полученные значения напряжений, деформаций, перемещений, скорости деформирования в зависимости от формы и интенсивности нагрузки позволят понять механизм деформирования при обжиме, использовать их как начальные данные для моделирования следующего этапа – взаимодействия с оснасткой.

#### выводы

1. Разработана методика компьютерного моделирования процесса магнитно-импульсного обжима цилиндрических заготовок.

2. Проведенное компьютерное моделирование позволило изучить

механизм свободного обжима в сравнении: для статического и динамического нагружений на этапе равномерного деформирования и этапе возникновения и развития потери устойчивости.

3. Установлено, что при динамическом на-

гружении потеря устойчивости наступает значительно позже и при нагрузках превышающих статические в 15 раз.

4. Напряжения, деформации, скорости деформирования для выступов и впадин могут довольно отличаться, что создает различные условия их последующего взаимодействия с оснасткой и объясняет достигаемое при этом качество готовых деталей.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Tekkaya A.E., Daehn G.S., Kleiner M.* Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference "High Speed Forming 2012", Dortmund, 2012.
- Металлофизика и деформирование перспективных материалов: Металлдеформ-99: Тр. 1-й Междунар. науч.- техн. конф., 23-26 июня 1999 г. Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева [под общ. ред. Гречникова Ф.В. ]. Самара (Вестник Самарского аэрокосмического ун-та им. С. П. Королева). Секция 4: Магнитно-импульсная обработка материалов на современном этапе [науч. ред. Глущенков В. А.]. 1999. 145с.
- Глущенков В.А., Карпухин В.Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материалов: монография. Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. 208 с.
- MSC Nastran расчет и оптимизация конструкций. URL: http://www.mscsoftware.ru/products/nastran (дата обращения 23.01.2015)

# MODELING OF MAGNETIC PULSE CRIMPING CYLINDRICAL SAMPLES

© 2015 V.A. Glushchenkov<sup>1</sup>, I.A. Belyaeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samara Scientific Center RAS <sup>2</sup> Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov (National Research University)

The article discusses the methodology and results of computer simulation of crimping pipes under dynamic loading - pulsed magnetic field. Considers the kinematics of the process, changing the stress-strain state of the material procurement stage uniform deformation after buckling. Modeling was carried out in various forms and intensities load boundary conditions. The results obtained, you are a basis for further analysis of the interaction of the workpiece with accessories. *Keywords:* computer simulation, crimp tubes, pulsed magnetic field.

Vladimir Glushchenkov, Candidate of Technical Sciences, Head of the Metal-Physics Department of the SSC RAS, Professor at the of Plastic Working of Metals Department, SSAU. E-mail: vgl@ssau.ru Irina Belyaeva, NIL-41, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow, SSAU. E-mail: vgl@ssau.ru