УДК 621.98.044.7:621.757.002

#### РАЗДАЧА ТРУБ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 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.Королёва (национальный исследовательский университет)

#### Статья поступила в редакцию 20.11.2015

Рассмотрен процесс свободной раздачи труб под воздействием импульсного магнитного поля (ИМП). Оценено напряжённо-деформированное состояние (НДС) материала заготовки на всем временном промежутке от начала процесса до соударения с оснасткой при различных форме и интенсивности нагрузки, граничных условиях. Особое внимание уделено исследованию кинематики заготовки при свободном деформировании, её взаимосвязи с НДС материала. Полученные результаты будут использованы как исходные данные при рассмотрении процесса взаимодействия заготовки с оснасткой, как факторы определяющие качество готовой детали.

*Ключевые слова*: свободная раздача труб, импульсное магнитное поле, напряжённо-деформирование состояние, свободное деформирование, компьютерное моделирование.

# ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

Любой процесс магнитно-импульсного формообразования трубчатой заготовки [1, 2], как правило, начинается с её свободного деформирования до взаимодействия с оснасткой (рис. 1).



Рис. 1. Технологическая схема «раздачи» труб ИМП

Напряженно-деформированное состояние материала заготовки во время свободной раздачи (особенно на конечном этапе) будет определять в дальнейшем процесс её взаимодействия с оснасткой, качество готовой продукции. Кроме того, процесс взаимодействия заготовки с оснасткой в большой степени будет зависеть от кинематики заготовки в период её свободного движения, то есть от того, какие точки заготовки, в какой последовательности и с какими параметрами вступают в контакт с оснасткой. Вот почему исследованию процесса свободного деформирования «на раздачу» должно уделяться большое внимание. Данная

Глущенков Владимир Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела металлофизики и авиационных материалов, профессор кафедры обработки металлов давлением, СГАУ. E-mail: vgl@ssau.ru Беляева Ирина Александровна, старший научный сотрудник статья посвящена компьютерному моделированию процесса свободной раздачи трубчатой заготовки.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для компьютерного моделирования выбран фрагмент алюминиевой трубы. Расчётная конечно-элементная модель состояла из объемных прямоугольных элементов с 6-ю слоями по толщине заготовки. Модель соответствовала тонкостенной трубе диаметром 60 мм и толщиной стенки 1,5 мм. Средний размер элементов модели – 0,27 мм типа НЕХ8, количество элементов 400 000, количество узлов 470 000 (2820 000 степеней свободы). Расчётная модель для свободного деформирования показаны на рис. 2. Один из торцев закреплен. Запрещались все поступательные его перемещения.

Форма импульса в расчётах была двух видов: с тремя пиками давлений с длительностью 100 мсек и с одиночным пиком с длительностью 50 мксек (рис. 3). Свойства используемого материала АМг6 приведены в табл. 1.

Упрочнение материала учитывалось с помощью линейной аппроксимации кривых упрочнения (рис. 4).

Для анализа процесса свободного деформирования выбрана расчётная среда MC.MARC (динамика, нелинейный расчёт) и MSC.Nastran (модельный анализ, линейная статика) [3].

### РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для дальнейшего сравнительного анализа, прежде всего, исследовалось статическое деформирование трубы. На рис. 5 приведен график мак-



**Рис. 2.** Расчётная модель свободного деформирования «на раздачу». Давление приложено изнутри



**Рис. 3.** Нормированный график нагрузки **Таблица 1.** Материал

Наименование	Обозначение	Сплав АМг6
Модуль упругости	Е	126642 МПа
Предел прочности	$\sigma_{\rm B}$	350 МПа
Предел текучести	$\sigma_{ m T}$	210 ÷ 230 МПа
Коэффициент Пуассона	μ	0,34
Плотность материала	ρ	2,65 Γ/cm³

симального значения перемещения свободной кромки трубы при различной величине внутреннего давления, а на рис. 6 её деформированное

состояние при внутреннем давлении в 10 МПа. Как видно из рисунка, заготовка приобретает форму конуса. Следует заметить, что реально



Рис. 6. Напряжённое состояние трубы на заключительном этапе раздачи

такой уровень пластической деформации невозможен. Раньше произойдёт разрушение.

При динамическом нагружении форма образующей деформируемой заготовки уже другая (рис. 7). Со стороны свободного торца на некоторой длине наблюдается равномерное расширение трубы (плоскопараллельное перемещение).

Раздача трубы под действием импульса давления происходит в течение 50 мксек, а далее деформация продолжается за счёт инерции.

На рис. 8 приведены последовательно перемещение, скорость и деформация трубы под действием импульса нагрузки (рис.9). Как видно из рисунков скорость деформирования достигает 150 м/сек.

Приведенные графики иллюстрируют возможности компьютерного моделирования.

Большой интерес для исследователей представляют картины распределения напряжений (рис.10) по толщине заготовки.

Графики изменения скорости деформирования по трём направлениям приведены на рис. 11.

Если представленный график продифференцировать, то можно оценить развиваемые при этом значительные ускорения (рис. 12), максимальная величина которых достигает 600 000 g.



**Рис. 7.** Напряженно- деформированное состояние трубы вдоль образующей и в его продольном сечении после воздействия внутренним импульсом

Такие ускорения порождают инерционные усилия (для алюминиевой заготовки) в 1,62Н на каждый узел КЭ сетки.

Для анализа процесса раздачи трубы представляют интерес характер изменения деформаций и напряжений при деформировании заготовки (рис.12). Из графиков видно, что заготовка подвергается большому окружному растяжению и сжатию по толщине и вдоль оси.

Инерциальные усилия и сжимающие напряжения и могут быть одной из причин повышения технологической пластичности.

### ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ НАГРУЗКИ

Исследовалось поведение раздаваемой трубы при трёх значениях нагрузки 10,20,40 МПа.

На рис. 13, 14 представлены фрагменты картин изменения перемещения и соответствующих деформаций для одного и того же момента времени но при разных нагрузках а) 10, б) 20, в) 40 МПа, а соответствующие графики перемещений, деформаций напряжений и скоростей для свободной кромки приведены на рис. 15.

Влияние длительности импульса, как показало моделирование в исследуемом диапазоне параметров особого (изменения), влияния не выявлено. Кроме того, что при длительности импульса в 100 мксек процесс деформирования по времени длится дольше почти вдвое (рис. 16).







**Рис. 9.** Импульс давления, использованный при раздаче трубы и для которого получены кривые, приведенные на рис. 8

# выводы

1. Разработана и опробована методика моделирования динамического процесса раздачи трубчатой заготовки, позволяющая оценить (исследовать) напряжённо-деформированное состояние материала оболочки во времени при различных граничных условиях, параметрах нагружения.

2. Проведено компьютерное моделироваие свободной раздачи закрепленной с одного из торцев трубы под действием магнитно-импульсного импульса различной формы и интенсивности.

3. Получены картины изменения во времени перемещений, деформаций, напряжений, скоростей деформирования, ускорении для любой



Рис. 10. Напряжения в материале стенки трубы

точки трубы вдоль образующей.

4. Установлено, что форма образующей при высокоскоростном деформировании (плоскопараллельная) отличается от формы образующей при статическом нагружении (конусная), что влечёт за собой отличие параметров деформационных процессов.

5. Определен порядок ускорений возникающих при динамическом нагружении и возникающих при этом инерционных сил.

6. Знание кинематики образующей трубы, напряжённо-деформированного состояния материала позволяют использовать их как начальное условие при дальнейшем взаимодействии трубы с оснасткой.

7. Дальнейшее расширение использования приведенного компьютерного моделирования позволит управлять процессом свободной раздачи с целью влияния на результаты решения следующего шага – решения контактных задач.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Глущенков В.А., Карпухин В.Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материалов: монография / В.А.Глущенков, В.Ф.Карпухин. Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. 208 с.



Рис. 11. Изменение скоростей деформирования по трём направлениям



Рис. 12. Характер изменения деформаций и напряжений



**Рис. 13.** Перемещение стенок трубы при раздаче а – нагрузкой в 10МПа, б – нагрузка 20 МПа



**Рис. 14.** Деформация стенок трубы при раздаче а – нагрузкой в 10МПа, б) – нагрузка 20 МПа, в – нагрузкой в 40 МПа



Рис. 15. Изменение перемещений, деформаций, напряжений и скорости во времени



**Рис. 16.** Зависимость перемещения и скоростей стенки трубы от нагрузки разного уровня и длительности

- 2. *Tekkaya A.E., Daehn G.S., Kleiner M.* Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference "High Speed Forming 2012", Dortmund, 2012.
- MSC Nastran. Расчет и оптимизация конструкций. URL: http://www.mscsoftware.ru/products/mscnastran (дата обращения 10.09.2015)

# DISTRIBUTION PIPES PULSED MAGNETIC FIELD. THE RESULTS OF COMPUTER SIMULATION

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

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

The process of free distribution pipe under the influence of a pulsed magnetic field (PMF). Estimated stress-strain state (SSS) of the workpiece material on the entire time interval from the start of the process before the collision with accessories in various forms and intensity of exercise, the boundary conditions. Particular attention is paid to the study of the kinematics of the deformation of the workpiece with the free, its relationship with the VAT material. The results will be used as input data in consideration of the interaction between the workpiece with accessories, as factors determining the quality of the finished part. *Keywords*: free distribution pipes, pulsed magnetic field, the stress-strain state, deformation free, computer simulation.

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