УДК 621.98.044.7:621.757.002

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ОБЖИМА ТРУБЧАТОГО ОБРАЗЦА НА ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ОПРАВКУ

© 2016 И.А. Беляева², В.А. Глущенков¹

¹ Самарский научный центр РАН

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 11.11.2016

С помощью компьютерного моделирования рассмотрены все стадии процесса магнитно-импульсного деформирования (обжима) трубчатой заготовки на цилиндрическую оправку: от свободного деформирования до динамического взаимодействия с оправкой, включая возможное образование неразъемного соединения. Оценены параметры кинематики процесса, меняющееся во времени напряжённо-деформированное состояние материала заготовки. При этом уменьшено количество упрощающих допущений: учтена упругая податливость оправки, сняты ограничения по осевым перемещением заготовки. *Ключевые слова*: компьютерное моделирование, магнитно-импульсное деформирование, свободное деформирование, свободное магемирование.

ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

Как правило, все процессы магнитно-импульсного деформирования трубчатых заготовок проходят в несколько этапов: свободное деформирование, взаимодействие с оснасткой, разгрузка. Конечное положение заготовки относительно оснастки определяет либо точность полученной детали, либо прочность возникшего соединения, что зависит от многих взаимосвязанных факторов: формы и интенсивности нагрузки, скорости соударения, геометрических размеров, граничных условий, соотношения свойств материалов заготовки-оснастки и других. Для выявления особенностей процессов магнитно-импульсного деформирования, исследования влияния факторов обработки на качество готовой продукции (конечное положение заготовки) используется математическое моделирование. Так в работах [1, 2] рассматривалось свободное деформирование цилиндрической заготовки «на обжим» и «на раздачу», а в статье [3] приведены результаты исследования процесса взаимодействия заготовки с оправкой, но при не вполне отвечающих реальному процессу допущениях, граничных условиях. Например, при моделировании процесса оправка принималась абсолютно жесткой, заготовке ограничивались осевые перемещения (деформации).

В данной статье сделана попытка дальнейшего решения поставленной задачи путем приближения компьютерного моделирования процесса обжима цилиндрической заготовки на оправку к реальному процессу (учёт податливости оправки, возможность осевой и радиальной деформаций заготовки).

Технологическая схема обжима цилиндрической заготовки на оправку приведена на рис 1.



Рис. 1. Технологическая схема магнитно-импульсного обжима трубчатого образца на оправку

Беляева Ирина Александровна, старший научный сотрудник.

Глущенков Владимир Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела металлофизики и авиационных материалов, профессор кафедры обработки металлов давлением Самарского университета. E-mail: vgl@ssau.ru

ФИЗИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ

Для компьютерного моделирования процесса обжима в качестве физического объекта выбраны - алюминиевая (сплав АМг6М) трубчатая заготовка Ø 22 мм с толщиной стенки 1,0 мм и длинами l = 50 мм (вариант A) и 40 мм (вариант B).

- в качестве оправки стальной (Ст 45)цилиндр диаметрами Ø = 16 мм (вариант А) и Ø 18 мм (вариант В), что обеспечивало исходный зазор между внутренней поверхностью заготовки и оправки равным 2,0 мм и 1,0 мм соответственно. Длина оправки l = 50 м в первом случае равна длине заготовки, во втором – превышает размер заготовки на 5,0 мм.

В обеих случаях использовалась технологическая схема «на обжим» с равномерным приложением давления к наружной поверхности трубы.

РАСЧЁТНАЯ МОДЕЛЬ

Для моделирования процесса магнитноимпульсного обжима трубчатой заготовки на оправку использовалась конечно-элементная модель из объемных прямоугольных элементов с шестью слоями по толщине заготовки. Некоторые характеристики модели приведены в табл. 1.

Графическое представление расчетных моделей показано на рис. 2.

При этом принятые следующие граничные условия:

Варианты физической модели	Вариант «А»		Вариант «В»	
Характеристики	Для	Для	Для	Для
модели	оправки	заготовки	оправки	заготовки
Тип элементов	HEX - 8	HEX – 8	HEX-8	HEX - 8
Средний размер элемента	0,45	0,24	0,45	0,24
Количество элементов	875 000	300 000	77 600	240 000
Количество узлов	101 000	360 000	209 000	288 000
Количество степеней свободы	606 000	2160 000	254 000	2160 000

Ta6	. 1	Vanaumar			
гаолица	11.	ларактер	лстики	расчетной	1 модели



Рис. 2. Расчётная модель для обжатия трубы на оправку а – зазор 2 мм; б – зазор 1 мм

оправка закреплялась неподвижно по своим торцам;

 для трубы вводилось ограничение на перемещение только одного торца;

Расчетная среда – MSC.Software/MSC.Nastran.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве импульса нагружения оценивалось влияние на процесс обжима двух его форм: импульс с тремя пиками (квадрат затухающей синусоиды), общей длительностью 100 мксек, и импульс с одним пиком (полупериод), длительностью 50 мксек (рис. 3).

Упрочнение материала заготовки в процессе пластической деформации учитывалось с помощью линейной аппроксимации кривой упрочнения, представленной на рис. 4.

Используемые в модели константы механических свойств материалов взаимодействующих тел приведены в табл. 2. В процессе моделирования варьировались уровни нагрузки Р_{max} = 40,90, 100 и 160 МПа для варианта A и 100 и 160 МПа для варианта B.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Вариант А. Зазор между заготовкой и оправкой 2 мм, $l_{sar.} = l_{onpaвka} = 50$ мм. Нагрузка: три пика давлений протяжённостью 100. Величина давления P = 40,80,100 и 160 МПа. Граничные условия: один из торцев заготовки закреплён.

На рис. 5 и рис. 6 в качестве примера показаны конечные перемещения стенки заготовки и соответствующие деформации при P = 160 МПа.

Тензор деформаций при этом соответствует приведенному на рис. 7.

Из приведенных рисунков наглядно видно, что при обжиме наблюдаются значительные осевые деформации; длина заготовки увеличилась.

Кроме того, для данного зазора давления в 160 МПа недостаточно для получения неразъемного



Рис. 3. Нормированный график нагрузки от электромагнитного импульса



Рис. 4. Аппроксимация кривой упрочнение

	Для заготовки		Для оправки
Модуль упругости	Е	126642 МПа	≈ 210000 M∏a
Предел прочности	σ_{e}	350 МПа	598 МПа
Предел текучести	$\sigma_{0,2}$	210-230 МПа	353 МПа
Коэффициент Пуассона	μ	0,34	0,3
Плотность материала $oldsymbol{ ho}$	ρ	2,65 г/см ³	7,814 г/см ³





Рис. 5. Конечные перемещения заготовки при обжатии ее давлением 160 МПа



Рис. 6. Конечные деформации заготовки при Р = 160 МПа

соединения, остается зазор.

На рис. 8, 9, 10 приводятся графики изменения во времени перемещения, скорости и ускорения заготовки в зависимости от разного уровня нагрузки.

Контрольные точки (узлы) расположены по длине заготовки.

Вариант *B*: Зазор 1 мм, $l_{sar.} = 40$, $l_{onp} = 45$, на-грузка – три пика давления протяженностью 100.

Давления 100 и 160 МПа; граничные условия – один из торцев заготовки закреплен

На рис. 11 показана картина распространения волн деформаций вдоль образующей заготовки, защемленной с одного из торцев. При удалении от торца закрепления степень радиальных и осевых деформаций возрастает.

Тензорное представление деформаций в кольцевом срезе заготовки дано на рис. 12.



Рис. 7. Тензор деформации, имеющий место при обжиме трубы для варианта А при Р = 160 МПа



Рис. 8. Перемещение стенки трубы при действии разное нагрузки

Материал заготовки подвергается сильному окружному сжатию, радиальному растяжению и на несколько порядков меньшему – осевому растяжению.

Кривые изменения во времени перемещения, скорости и ускорения для различных точек заготовки при различном уровне давления обжатия приведены на рис. 13, 14, 15. Графики ускорения показаны в логарифмическом масштабе.

При обеих нагрузках достигнуто неразъемное соединение заготовки с оправкой. Прочность соединения оценивалась по усилиям выпрессовки заготовки с оправки, которая составила 225,4 кН при Р = 100 МПа, и 319,35 кН при Р = 160 МПа. Методика оценки прочности соединений описана в работе [3].

В результате моделирования установлено, что длительность импульса давления проявляется слабо.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из приведенных исследований виден сложный характер динамического деформирования заготовки, проявляющийся в появлении волновых эффектов не только по толщине материала заготовки, но и вдоль оси при закреплении од-



Рис. 9. Скорость деформирования стенки трубы при действии разной нагрузки



Рис. 10. Ускорения деформаций стенки трубы при действии разной нагрузки для различных точек (узлов) заготовки вдоль её длины



Рис. 11. Перемещения трубы при её обжатии на оправку. Зазор 1 мм

ного из торцев. Волновые эффекты приводят к неравномерности распределения деформаций, по объему материала заготовки, что определяет качество готовой продукции. Так, например, установлено значительное осевое удлинение образца, при радиальном обжатии, которое обеспечивает дополнительные остаточные радиальные напряжения сборочного соединения.

Также определено, что форма импульса давления на процесс деформирования существенного влияния не имеет. В большей степени процесс определяется интенсивностью нагружения.



Рис. 12. Деформация стенки трубы при её обжатии на оправку (среднее сечение заготовки). Справа – тензорное представление деформаций



Рис. 13. Перемещение стенки трубы при обжатии с оправкой при разном уровне нагрузки. Зазор 1 мм



Рис. 14. Скорость стенки трубы при обжатии с оправкой при разном уровне нагрузки и для некоторых контрольных точек (узлов)



Рис. 15. Ускорение стенки трубы при обжатии с оправкой при разном уровне нагрузки

Резкое изменение скоростей и ускорений деформирования должно учитываться при определении динамических свойств материала и инерционных сил.

выводы

1. Разработана и опробована методика компьютерного моделирования процесса магнитноимпульсного обжима цилиндрической заготовки на оправку, позволяющая оценить качество готовой продукции (детали) влияние на него формы и величины импульса, механических свойств материала взаимодействующих заготовки и оправки, различных граничных условий, геометрических размеров заготовки и оправки и др.

2. На конкретном примере осуществлено моделирование процесса обжима цилиндри-

ческой заготовки с получением необходимых для проектирования технологии и оснастки зависимостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Глущенков В.А., Беляева И.А. Раздача труб импульсным магнитным полем. Результаты компьютерного моделирования // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17 № 6 (3). С. 657-665.
- 2. Глущенков В.А., Беляева И.А. Моделирование процесса магнитно-импульсного обжима цилиндрических образцов // Известия Самарского научного центра РАН. 2015.Т. 17. № 2. С. 113-118.
- 3. Глущенков В.А., Беляева И.А. Взаимодействие деформируемой импульсным магнитным полем цилиндрической заготовки с оснасткой. Компьютерное моделирование // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 4. С. 71-75.

COMPUTER SIMULATION OF THE PROCESS OF PULSE-MAGNETIC REDUCING OF A TUBULAR SAMPLE ON A CYLINDRICAL MANDREL

© 2016 I.A. Belyaeva², V.A. Gloushchenkov¹

¹ Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences ² Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The paper considers, with the help of computer simulation, all stages of the process of pulse-magnetic deforming (reducing) of a tubular billet on a cylindrical mandrel: from free deforming to dynamic interaction with the mandrel including the possible formation of a non-detachable joint. Parameters of kinematics of the process as well as the billet material stress-strain state changing in time have been estimated. A number of simplifying assumptions has been decreased: the elastic pliability of the mandrel has been taken into account, restrictions on axial displacements of the billet have been removed. *Keywords:* computer simulation, pulse-magnetic deforming, free deforming, dynamic interaction.

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