

In article the method of calculation for the manufacture of calibration rolls closed formed sections closed section by sediment billets, provides high-quality profiles of the same radius rounding the bend cross-section profiles.

**Keywords:** bent profile of the closed section, calibration, technology, draft tube.

УДК 621.7.044

**В. Е. ЗАЙЦЕВ**, докт. техн. наук, доц., НАКУ «ХАИ», Харьков;

**В. А. СУКАЙЛО**, multi Dr.-Ing., Ingenieurbuero Dr.-Ing. Viktor Sukaylo, Нюрнберг; Германия;

**В. Г. КОРБАЧ**, канд. техн. наук, вед. инженер ГП «Государственное Киевское конструкторское бюро «Луч», Киев;

**А. А. ХОДЬКО**, аспирант, НАКУ «ХАИ», Харьков.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВОБОДНОЙ РАСТЯЖКИ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКЕ**

Проведено конечно-элементное моделирование процесса свободной растяжки трубчатой алюминиевой заготовки с помощью программного комплекса LS-DYNA. Исследованы особенности деформирования трубчатого образца под действием импульсного нагружения жидкостной передающей средой в технологической системе гидродинамической штамповки. Получено количественное описание волновых явлений в передающей среде, определяющих параметры внешней нагрузки на заготовку. Выполнено сравнение результатов моделирования с экспериментальными значениями.

**Ключевые слова:** гидродинамическая штамповка, деформирование образца, метод конечных элементов, уравнение состояния Грюнайзена, модель Джонсона-Кука.

**Введение.** Формообразование детали методом гидродинамической штамповки является сложным многоэтапным процессом, обусловленным волновым характером распространения давления в передающей среде и деформаций в заготовке. Это подтверждено экспериментальными исследованиями процесса свободной растяжки трубчатой заготовки, длина деформируемой части которой значительно превышает ее диаметр [1].

Наряду с экспериментальным подходом широкими возможностями изучения подобных процессов обладает метод математического моделирования.

В работе проводится численное моделирование процесса свободной растяжки трубчатой заготовки из алюминиевого деформируемого сплава АМг2М. Для этого используется метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе LS-DYNA [2]. Данный конечно-элементный комплекс позволяет получать достоверные решения для сложных линейных и нелинейных инженерных проблем. Для моделирования жидкости применяется модель материала NULL с уравнением состояния Грюнайзена. В качестве модели материала заготовки принимается упрощенная модель Джонсона-Кука. Сравнение результатов расчета с экспериментальными значениями, приведенными в работе [1], проводится по величине остаточных широтных деформаций трубчатого образца и изменению деформаций во времени в двух его сечениях.

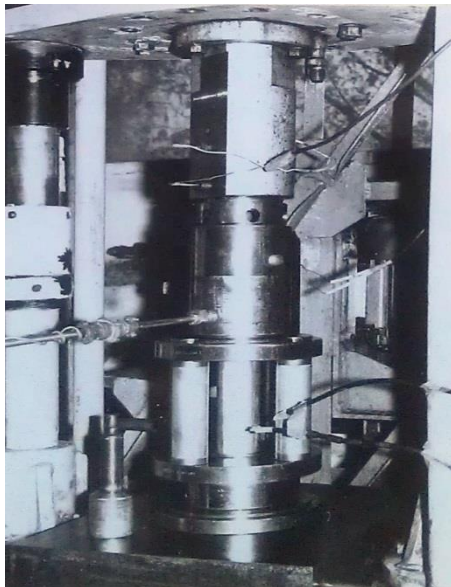


Рис. 1 – Оснастка для свободной растяжки труб



Рис. 2 – Образец после свободной пастяжки

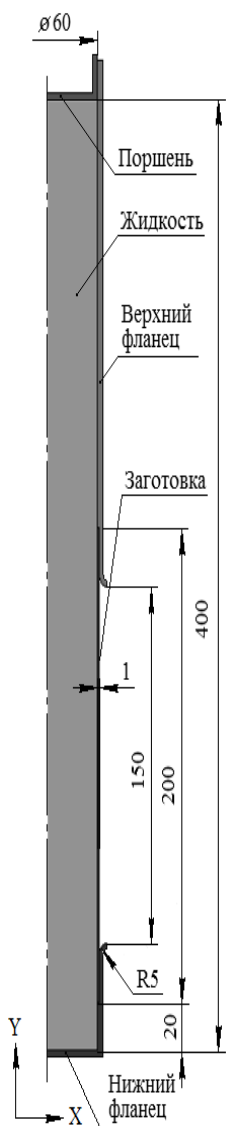


Рис. 3 – Общий вид модели

**Экспериментальные исследования.** Подробное описание эксперимента приведено в работе [1]. Экспериментальные исследования выполнялись на лабораторной пороховой пресс-пушке ПП2 с диаметром ствола 60мм. На рис. 1 показана специально спроектированная оснастка для свободной растяжки труб, конструкция которой позволяет легко регулировать высоту свободно деформируемой части трубы изменением высоты опор и размеров образцов с помощью сменных фланцев.

Импульсное нагружение передающей среды проводилось поршнем массой 1,16 кг со скоростью 39,3 м/с. Заготовка представляла собой трубу из алюминиевого деформируемого сплава АМг2М высотой 200 мм, диаметром 63 мм и толщиной стенки 1 мм. На рис. 2 показан деформированный образец после свободной растяжки.

В ходе эксперимента регистрировались следующие величины: скорость поршня в момент удара о жидкость, широтные деформации трубчатого образца, давление жидкости в камере.

Были получены экспериментальные значения остаточных широтных деформаций трубчатой заготовки и их изменение во времени в выбранных сечениях образца.

**Описание модели.** Моделирование процесса свободной растяжки трубчатой заготовки проводилось в программном комплексе конечно-элементного анализа LS-DYNA [2]. Особенностью данного комплекса является наличие решателя, основанного на применении явной схемы интегрирования по

времени, которая, в отличие от неявной схемы, является более предпочтительной при моделировании быстропротекающих нелинейных процессов.

Рассмотренная система обладает геометрической и силовой осевой симметрией. Это позволило решить задачу в осесимметричной постановке, что при требуемой точности значительно сократило время расчета. На рис. 3 показано сечение осесимметричной модели. В состав модели входят следующие элементы: поршень, фланцы (верхний и нижний), жидкость и заготовка.

Для дискретизации модели использовались осесимметричные 4-узловые конечные элементы. Размер конечного элемента оказывает непосредственное влияние на точность расчета. При выборе размера конечного элемента необходимо искать компромисс между точностью получаемого результата и временем расчета. На начальном этапе расчета дискретизация жидкости осуществлялась элементами, имеющими размер  $1 \times 0,95$  мм. Размер элементов заготовки был равен  $1 \times 0,25$  мм. Для правильной передачи изменения напряжений по толщине заготовки при деформировании, она разделена на четыре слоя конечных элементов по толщине. Так как остальные составляющие системы моделировались как абсолютно твердые тела (\*MAT\_RIGID), то размер их сеток не влиял на шаг интегрирования, что существенно ускорило вычислительный процесс. Их дискретизация выбрана из условия правильной передачи геометрии.

Контакт всех составляющих модели друг с другом реализован с помощью автоматического алгоритма AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE. Фланцы закреплены от каких-либо перемещений. В начальный момент времени поршню сообщалась скорость, имевшая место в эксперименте,  $-39,3$  м/с, направленная вдоль оси Y в сторону ее отрицательных значений.

**Моделирование воды.** Вода, выступающая в роли передающей среды, моделировалась с использованием модели материала NULL с параметрами [3]: начальная плотность  $\rho_0 = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость  $\mu = 0,001002$  Па·с. Поведение данной модели материала под действием нагрузки аналогично реакции вязкопластического материала с нулевым компонентом девиатора напряжений [2].

Модель материала NULL требует задания уравнения состояния для определения давления внутри жидкости. Наиболее распространенным уравнением состояния для воды является уравнение состояния Грюнайзена (\*EOS\_GRUNEISEN):

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E, \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1, \quad (2)$$

$$E = E_0 \rho, \quad (3)$$

где:  $p$  – давление в воде, Па;

$c$  – скорость звука в воде, м/с;

$\rho$  – текущая плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_0$  – начальная плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma_0$  – постоянная Грюнайзена;

$\alpha, S_1, S_2, S_3$ , – эмпирические коэффициенты;

$E_0$  – начальная удельная внутренняя энергия воды, Дж/кг.

В таблице 1 представлены значения констант воды для уравнения состояния Грюнайзена, полученные из литературных [3,4] и авторских источников.

Таблица 1 – Константы воды для уравнения Грюнайзена

$S_1$	$S_2$	$S_3$	$c \left( \frac{m}{c} \right)$	$\gamma_0$	$\alpha$	$E_0 \left( \frac{Дж}{кг} \right)$	$V_0$
1,979	0	0	1484	0,11	0	0	1

Современные CAE-системы позволяют моделировать гидродинамику в различных постановках. Возможно применение Лагранжевой, Эйлеровой сеток конечных элементов, произвольных Лагранж-Эйлеровых сеток (ALE – Arbitrary Lagrangian-Euleran) или бессеточного метода сглаженных частиц SPH (Smoothed Particles Hydrodynamics).

При моделировании воды использовалась постановка Лагранжа, характеризующаяся деформируемой сеткой конечных элементов. Сильное искажение сетки замедляет скорость вычислений. Кроме того, это может привести к появлению нефизических эффектов в процессе расчёта. Для устранения этих негативных явлений при моделировании применялось двумерное  $r$ -адаптивное перестроение сетки элементов [5], используемое в задачах с осевой симметрией и плоской деформацией. Реализованный в программе LS-DYNA алгоритм создает полностью новую сетку, которая инициализируется из старой сетки при помощи метода наименьших квадратов. Размер сетки определяется значением параметра ADPTOL, т.е. характерным размером элемента. Время начала TBIRTH и конца TDEATH перестроения сетки определяется начальным и конечным моментами моделирования. Промежуток времени между адаптивными перестроениями сетки ADPFREQ определялся исходя из условия обеспечения минимизации ошибки расчетов.

**Моделирование заготовки.** При моделировании процесса свободной растяжки важную роль играет описание пластических эффектов в материале заготовки. При решении высокоскоростных динамических задач часто требуется учитывать такие факторы, как скорость деформирования и температуру процесса. Для этого на практике часто используется модель Джонсона-Кука [6], согласно которой напряжение пластического течения (в оригинале работы *flow stress*) определяется формулой:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^n) (1 + c \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}), \quad (4)$$

где:  $A, B, c, n, m$  – константы материала;

$\bar{\varepsilon}^n$  – эффективная пластическая деформация;

$\dot{\varepsilon}^*$  – эффективная скорость пластической деформации для  $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$ ;

$T^*$  – гомологическая температура.

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0}, \quad (5)$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}, \quad (6)$$

где:  $T_{room}$  – комнатная температура;

$T_{melt}$  – температура плавления.

Температурный параметр  $(1 - T^{*m})$  в исследовании равен единице, т.к. процесс моделируется при нормальной температуре и тем самым не оказывает никакого эффекта на модель материала. Тогда напряжение пластического течения может быть записано следующим образом:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\varepsilon}^n)(1 + c \ln \dot{\varepsilon}^*). \quad (7)$$

Уравнение (7) является определяющим для упрощенной модели Джонсона-Кука (\*MAT\_SIMPLIFIED\_JOHNSON\_COOK), которая использовалась в качестве модели материала для трубчатой алюминиевой заготовки. Данная модель материала применяется в задачах, где скорости деформации изменяются в широком диапазоне. В этой упрощенной модели тепловые эффекты и разрушение игнорируются. Максимальное напряжение ограничено, поскольку не происходит термического разупрочнения, оказывающего большое влияние на уменьшение предела текучести под действием адиабатических нагрузок. Благодаря упрощениям, связанным с термическим разупрочнением и разрушением, эта модель на 50% быстрее полной модели Джонсона Кука.

Экспериментальное определение параметров модели является сложной задачей. Встречающиеся в литературе данные касаются лишь ограниченного числа материалов, см., например, [7–9]. К тому же, параметры одного и того же материала, взятые из разных источников, могут отличаться весьма значительно. В подобной ситуации определять параметры модели приходится из условия наилучшего совпадения с известными экспериментальными данными. В таблице 2 приведены используемые при моделировании характеристики материала трубчатой заготовки из алюминиевого деформируемого сплава АМг2М, а также коэффициенты определяющего уравнения (7).

Таблица 2. Параметры модели материала

$\rho \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$	$E$ (ГПа)	$\mu$	$A$ (МПа)	$B$ (МПа)	$n$	$c$
2700	80	0,34	100,7	700	0,8	0,019

**Анализ результатов моделирования.** На рис. 4 показано положение срединной поверхности трубчатого образца из алюминиевого сплава АМг2М высотой 200 мм, диаметром 63 мм и толщиной стенки 1 мм при нагружении поршнем массой 1,16 кг со скоростью 39,3 м/с. Участок длиной 160 мм соответствует высоте свободно деформируемой части заготовки. Деформирование различных сечений трубы происходит неравномерно, что объясняется волновым характером распространения давления в передающей среде и деформаций в заготовке. При взаимодействии волны давления с заготовкой в первую очередь нагружается верхняя часть трубы, а затем волна пластичности распространяется вдоль ее оси. Во время деформирования нижней части заготовки давление в верхней ее части меньше необходимого для растяжки, поэтому верхний торец смещается вниз, практически не деформируясь. Зоны наибольших деформаций локализованы по краям свободно деформированной части заготовки.

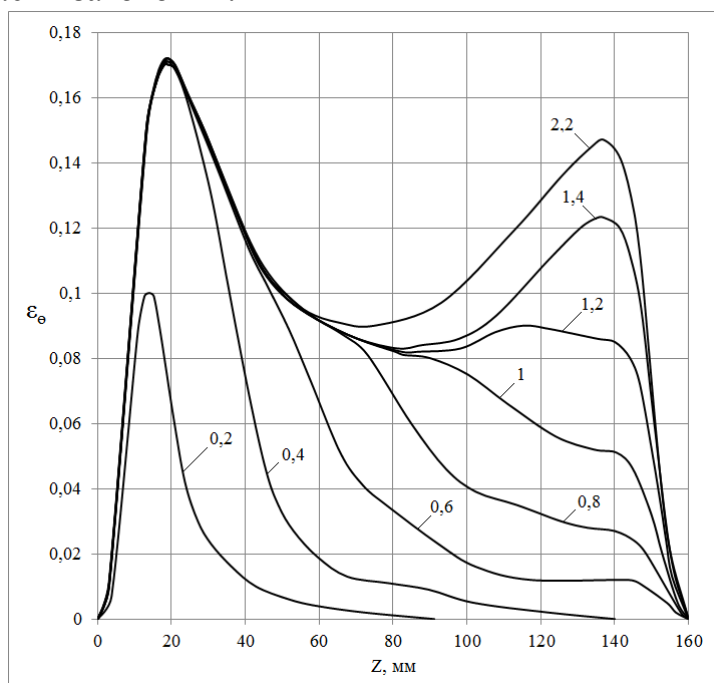


Рис. 4 – Положение срединной поверхности заготовки в различные моменты времени ( $10^{-3}$  с)

На рис. 5 сплошной линией показан расчетный график распределения остаточных широтных деформаций трубчатого образца по высоте его свободно деформируемой части. Максимальные значения широтных деформаций достигают 0,171 и 0,147 в верхней и нижней части образца соответственно. Четко выражено отставание центральной части заготовки, где минимальное значение деформации равно 0,0895. Пунктиром показаны экспериментальные значения деформаций. Максимальное отклонение расчетных величин остаточных деформаций от экспериментальных значений не превышает 7%. Таким образом, удалось добиться практически полного соответствия математической модели реальному эксперименту.

Расчетные графики изменения во времени широтных деформаций на расстоянии 50 мм от верхнего и нижнего торцов образца приведены на рис. 6 (сплошные линии). Нулевой момент времени соответствует началу деформирования трубчатой заготовки в сечении, находящемся на расстоянии 50 мм от верхнего торца заготовки. Как только волна пластической деформации доходит до данного сечения, в нем начинается резкий рост пластической деформации (с 0 до 0,26 мс), который затем постепенно затухает и прекращается к моменту времени 0,4 мс. Затухание роста пластической деформации в верхнем сечении трубы совпадает с началом деформирования нижнего сечения. Это объясняется приходом волны пластической деформации к нижнему сечению вследствие волновых процессов, происходящих в жидкости. На начальной стадии деформирования нижнего сечения трубы давление в верхнем ее сечении меньше потребного для растяжки, поэтому его пластическое деформирование прекращается, достигнув максимальной величины широтной деформации 0,132. Рост пластической деформации в нижнем сечении заготовки продолжается до 1,56 мс и прекращается, достигнув значения 0,138. Экспериментальные данные на рис. 6 показаны пунктирными линиями. Погрешность расчета не превышает 15%.

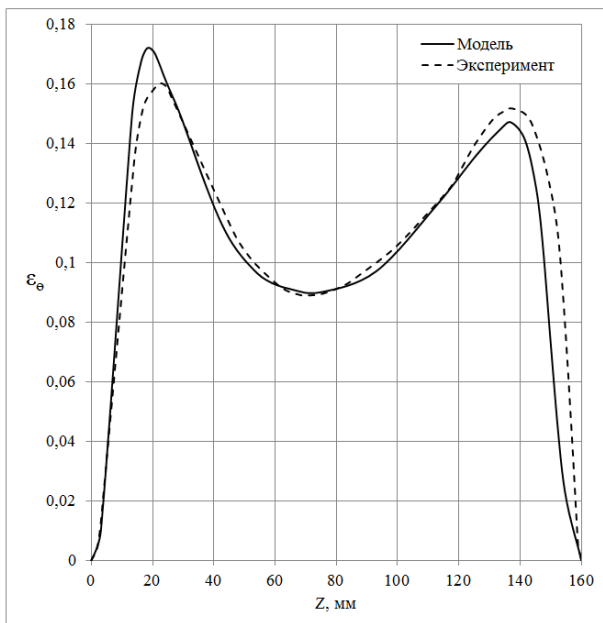


Рис. 5 – Остаточная широтная деформация трубчатого образца

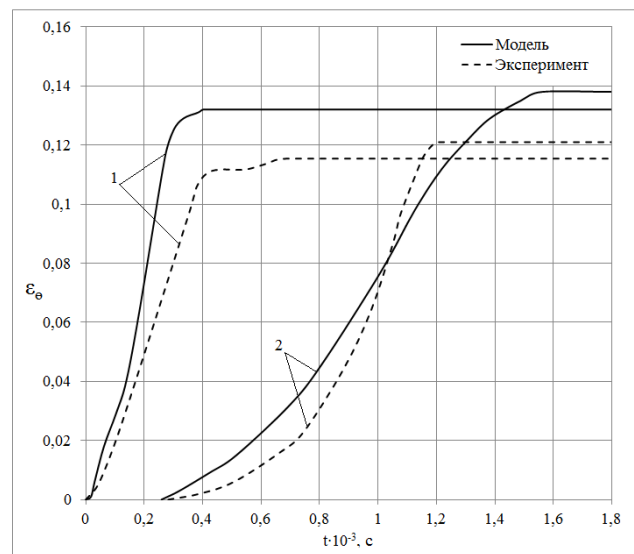


Рис. 6 – Изменение во времени широтных деформаций на расстоянии 50 мм от верхнего (1) и нижнего (2) торцов образца

Исследуемый в настоящей работе процесс деформирования тонкостенной заготовки при высокоскоростном нагружении жидкой передающей средой отличается сложным характером передачи энергии. Конечные результаты определяются действием большого числа параметров, учет которых при моделировании связан с большими трудностями. Погрешности расчетов определяются разбросом механических характеристик материалов и допущениями, положенными в основу математической модели.

**Выводы.** Для анализа процессов, происходящих в технологической системе гидродинамической штамповки от начала движения поршня до образования конечного контура трубчатого образца, разработана математическая модель процесса свободной растяжки трубчатой заготовки. В работе представлена методика моделирования процесса в программном комплексе конечно-элементного анализа LS-DYNA. Получено количественное описание волновых явлений в жидкостной передающей среде, определяющих параметры внешней нагрузки на заготовку. Исследованы особенности деформирования трубчатого образца под действием импульсного давления жидкости. Установлено, что неравномерное распределение давления по поверхности деформируемой заготовки в течение процесса нагружения приводит к волновому характеру распространения прогибов и деформаций заготовки, несимметричному смещению ее торцов и локализации остаточных деформаций.

Результаты расчета сравнивались с экспериментальными значениями по величине остаточных широтных деформаций трубчатого образца и изменению деформаций во времени в двух его сечениях. Погрешность расчета не превышает 7 – 15% и определяется разбросом механических характеристик материалов и допущениями, положенными в основу модели. Описанная математическая модель процесса гидродинамической штамповки отражает наблюдаемое на практике поведение системы, что подтверждает ее адекватность. Модель позволяет исследовать особенности процесса штамповки, позволяя тем самым оптимизировать технологическую систему и технологический процесс гидродинамической штамповки. Она может быть использована для расчета и оптимизации технологических процессов и технологических систем гидродинамической штамповки тонколистовых осесимметричных деталей.

Следует отметить, что в настоящей статье оснастка моделируется абсолютно твердой. Для возможности оценки напряжений в оснастке она может быть смоделирована как упругопластическая.

**Список литературы:** 1. Родько С. Я. Исследование, разработка и внедрение процессов гидродинамического формообразования тонколистовых деталей летательных аппаратов. / С. Я. Родько // Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 – Х.: ХАИ, 1985. – 238 с. 2. Hallquist J. O. LS-DYNA: Theory manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, 2006. – 680 p. 3. Shah S. A. Water impact investigations for aircraft ditching analysis. / S. A. Shah // Master's Thesis, RMIT University, 2010. – 160 p. 4. Boyd R. Simulation and validation of UNDEX phenomena relating to axisymmetric structures. / R. Boyd, R. Royles, K. M. M. El Deeb – 6th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, MI: Int LS-DYNA C, 2000. 5. LS-DYNA: Keyword user's manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, 2007. – 2206 p. 6. Johnson G. R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. / G. R. Johnson, W. H. Cook. – Proc. of 7th Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 1983. – P. 541-547. 7. Ozel T. Identification of constitutive material model parameters for high-strain rate metal cutting conditions using evolutionary computational algorithms / T. Ozel, Y. Karpas. – Materials and Manufacturing Processes, 2007. – V. 22. – P. 659–667. 8. Loikkanen M. J. A computational and experimental analysis of ballistic impact to sheet metal aircraft structures / M. J. Loikkanen, M. Buyuk, C. Kan, N. Meng. – Proc. of 5th European LS-DYNA Users Conference, Birmingham, UK, 2005. –3с – 79. 9. Gryttena F. Quasi-static perforation of thin aluminum plates / F. Gryttena, T. Borvik, O. S. Hopperstada, M. Langsetha. – Int. J. Imp. Eng., 2009. – V. 36. – P. 486-497.



УДК 621.7.044

**Моделирование процесса свободной растяжки трубчатой заготовки при гидродинамической штамповке / Зайцев В. Е., Сукайло В. А., Корбач В. Г., Ходько А. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 42(1015). – С. 69–77. Библиогр.: 9 назв.**

Проведено скінченно-елементне моделювання процесу вільної розтяжки трубчастої алюмінієвої заготовки за допомогою програмного комплексу LS-DYNA. Досліджені особливості деформування трубчастого зразка під дією імпульсного навантаження рідинним передавальним середовищем в технологічній системі гідродинамічної штамповки. Отримано кількісний опис хвильових явищ у передавальному середовищі, що визначають параметри зовнішнього навантаження на заготовку. Виконано порівняння результатів моделювання з експериментальними значеннями.

**Ключові слова:** гідродинамічне штампування, деформування зразка, метод скінченних елементів, рівняння стану Грюнайзена, модель Джонсона-Кука.

Finite element simulation of the aluminum tubular blank free stretching has been carried out using the LS-DYNA code. Features of the specimen deformation under impulse loading by fluid transmission medium in the technological system of hydrodynamic stamping have been studied. The quantitative description of wave phenomena in fluid transmission medium determining the parameters of the external load on the workpiece has been obtained. The comparison of simulation results with the experimental values has been performed.

**Keywords:** hydrodynamic stamping, specimen deformation, finite element method, Gruneisen EOS, Johnson-Cook model.

УДК 621.923

**И. Е. ИВАНОВ**, канд. техн. наук, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь;  
**Ф. В. НОВИКОВ**, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;  
**С. А. ДИТИНЕНКО**, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков.

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРОЧНЕННЫХ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАСЫПНЫХ АППАРАТОВ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ**

Обоснованы условия повышения эффективности механической обработки контактных поверхностей с износостойкими наплавочными материалами конусов и чаш засыпных аппаратов доменных печей. Экспериментально доказана эффективность применения процесса шлифования по сравнению с процессом точения. Теоретически обоснована целесообразность применения глубинного продольного шлифования с созданием начального натяга в технологической системе. Разработана эффективная технология круглого шлифования контактных поверхностей с износостойкими наплавочными материалами.

**Ключевые слова:** наплавочный материал, шлифование, точение, абразивный круг, резец, режим резания, упругое перемещение, производительность обработки, качество обработки

**Введение.** Эффективность работы засыпных аппаратов доменных печей во многом зависит от долговечности и надежности работы малых и больших конусов и чаш засыпных аппаратов, которые предназначены для выполнения функции распределения и шлюзования шихтовых материалов, а также газуплотнения колошника доменной печи. Вместе с тем, как показывает практика, они достаточно быстро выходят из строя. Низкая продолжительность