

DOI: 10.18721/JEST.26103
УДК 621.7.044

К.С. Арсентьева, В.С. Мамутов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Санкт-Петербург, Россия

УЧЕТ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ LS-DYNA® ПРИ ТОНКОЛИСТОВОЙ ВЫТЯЖКЕ

Исследовано влияние выбора модели материала и учета скоростей деформации при создании компьютерных моделей импульсного деформирования тонколистовых металлов. В конечно-элементном программном комплексе LS-DYNA разработаны компьютерные модели процессов вытяжки сферических деталей из тонколистового металла методом электрогидроимпульсной вытяжки. Компьютерные расчеты проводились для заготовок из латуни Л68 толщиной 0.24 мм и заготовок из алюминия 5754 толщиной 1 мм в матрицу диаметром 60 мм. Разработана методика уточнения коэффициента скоростного упрочнения металла на основе расчетов в комплексе LS-DYNA, с помощью которых определялся диапазон изменений скоростей эффективных деформации элементов заготовки. Проведено сравнение методов учета скоростного упрочнения металлов при задании различных моделей материала заготовки. Выполнена оценка применимости моделей материала заготовки для решения задач импульсного деформирования тонколистовых металлов.

Ключевые слова: импульсная вытяжка, тонколистовой металл, конечно-элементный комплекс LS-DYNA, скорости деформации, деформационное упрочнение.

Ссылка при цитировании: Арсентьева К.С., Мамутов В.С. Учет скоростей деформации в программном комплексе LS-DYNA® при тонколистовой вытяжке // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2020. Т. 26, № 1. С. 29–40. DOI: 10.18721/JEST.26103

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

X.S. Arsentyeva, V.S. Mamutov

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

STRAIN RATE INFLUENCE ON THIN SHEET METAL DRAWING SIMULATION USING LS-DYNA®

The article presents an investigation of the influence of material model selection and strain rate accounting on the calculation error during impulse sheet metal drawing simulation. Computer models of electrohydraulic thin sheet metal drawing processes have been developed in the LS-DYNA finite-element complex. Computer simulation in this study was carried out for 0.24 mm-thick CuZn33 brass sheet blank and 1mm-thick Aluminum 5754 under impulse drawing into a die 60 mm in diameter. Technique of refining of speed hardening coefficient of metal using LS-DYNA complex has been developed. The technique is based on preliminary computer calculations, which allow defining a changes range of elements effective strain rates in different parts of workpiece. The technique is simple to execute and implement.

Comparison of methods of the strain rate hardening accounting during usage of different material models of workpiece in computer simulations have been provided. The applicability of material models for high-speed computer simulation of thin sheet metal drawing has been assessed.

Keywords: impulse drawing, thin sheet metall, finite-element software LS-DYNA, strain rate, strain hardening

Citation: X.S. Arsenyeva, V.S. Mamutov, Strain rate influence on thin sheet metal drawing simulation using LS-DYNA®, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 26 (01) (2020) 29–40. DOI: 10.18721/JEST.26103

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Для производства сложных точных деталей в мелкосерийном и индивидуальном производстве наиболее эффективны импульсные методы, в частности электрогидроимпульсная (ЭГИ) штамповка [1, 2]. Импульсный характер нагружения, за счет уменьшения пружинения, позволяет повысить точность изготовления деталей в сравнении с квазистатическими методами деформирования [3–6]. ЭГИ штамповка является относительно простой технологией, не требует сложной и дорогостоящей оснастки [7, 8], однако экспериментальные исследования процессов, на которых основывается данная технология, затруднены [9]. Аналитические методы исследования импульсных процессов также неэффективны, поскольку являются приближенными: не учитывают нелинейность физико-механических процессов и оперируют не всей системой исходных уравнений.

С развитием современных ЭВМ появилась возможность численного решения сложных задач обработки металлов давлением во всей полноте технологической и физической постановки. Развитие универсальных конечно-элементных (КЭ) комплексов, таких как LS-DYNA, позволяет моделировать процессы с учетом множества влияющих факторов [10]. Программный комплекс LS-DYNA имеет явный (explicit) решатель и изначально разрабатывался для расчетов воздействия подводных взрывов на металлические конструкции, т. е. рассчитан для решения задач взаимодействия

жидкостей и газов с деформируемой конструкцией и ориентирован на быстротекущие термомеханические процессы. Комплекс LS-DYNA успешно применяется в исследовании импульсных процессов, в частности для расчетов ЭГИ штамповки тонколистовых металлов [5, 11–14]. Программный комплекс позволяет решать многие технологические задачи, важные для проектирования, в том числе оценить влияние скоростей деформации на механические свойства заготовки.

Задачи данной работы: рассмотреть методы задания вида кривой деформационного упрочнения в расчетах; провести компьютерное моделирование в конечно-элементном комплексе LS-DYNA импульсной вытяжки-формовки на примере свободной ЭГИ вытяжки-формовки тонколистовой заготовки; оценить применение различных моделей материала и соответствующих кривых деформационного упрочнения в компьютерных расчетах импульсной вытяжки-формовки.

Методы задания вида кривой деформационного упрочнения в расчетах. Механические свойства деформируемой заготовки имеют большое значение в процессах обработки металлов давлением и их расчетов. Достоверные механические характеристики металлов определяются в результате экспериментальных исследований – специальных испытаний образцов, которые позволяют построить кривые упрочнения материалов в координатах $\sigma_s - \epsilon_t$

[15]. Для дальнейших расчетов используют аппроксимированные кривые деформационного упрочнения.

Деформационное упрочнение материала заготовки при квазистатическом формоизменении учитывается степенным законом, соответствующим усредненной аппроксимации опытных данных по Холломану:

$$\sigma_s = B\varepsilon^m, \quad (1)$$

где σ_s и ε — обозначают истинные напряжения и истинную деформацию соответственно, B и m — коэффициенты аппроксимации кривой деформационного упрочнения, получаемые из опытных данных.

Процесс ЭГИ вытяжки-формовки относится к импульсным процессам, при которых скорости деформации превышают 10^2 с^{-1} и наблюдается дополнительное динамическое упрочнение металла по сравнению с квазистатическими испытаниями при скоростях деформации менее $(0.1...1) \text{ с}^{-1}$ [16, 17]. Следовательно, для расчетов импульсного деформирования необходимо дополнительно учитывать скоростное упрочнение материала заготовки. В инженерных расчетах скоростное упрочнение рекомендуется учитывать с помощью коэффициента динамичности K_d , устанавливаемого для определенного диапазона значений скоростей и степеней деформации, характерных для того или иного процесса¹. В рамках конечно-элементного программного комплекса LS-DYNA коррекцию расчетов, связанную с влиянием скоростей, характерных для импульсных процессов, можно осуществить несколькими способами.

Один из способов — при задании модели материала *MAT_POWER_LAW_PLASTICITY (MPL)* использовать коэффициент динамичности K_d ,

¹ Мамутов А.В. Технологии обработки материалов импульсным давлением. Технологии обработки концентрированными потоками энергии: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2008. 40 с

преобразуя степенной закон (1) в соответствующий:

$$\sigma_s = K_d B \varepsilon^m. \quad (2)$$

Также в программном комплексе существует модель пластичности, которая учитывает влияние скоростей деформации и обычно используется для расчетов сверхпластичных процессов формоизменения: *RATE_SENSITIVE_POWER_LAW_PLASTICITY (RSPL)*, соответствующая степенному закону:

$$\sigma_s = B \varepsilon^m \dot{\varepsilon}^n, \quad (3)$$

где $\dot{\varepsilon}$ — скорость деформации; n — коэффициент скоростного упрочнения.

Известно, что коэффициент скоростного упрочнения n для расчетов процессов импульсной штамповки определяется по следующей формуле [18]:

$$n = \theta_2 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) / \ln \dot{\varepsilon}, \quad (4)$$

где θ_2 — экспериментальная константа материала, определяемая по формуле:

$$\theta_2 \cong \ln(K_d) / \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right). \quad (5)$$

Подставляя выражение (5) в выражение (4) получаем:

$$n = \ln(K_d) / \ln(\dot{\varepsilon}). \quad (6)$$

Из чего следует вывод, что коэффициент скоростного упрочнения зависит от коэффициента динамичности, определяемого материалом заготовки и скоростью деформирования заготовки.

Скорость деформаций при ЭГИ штамповке обычно находится в пределах от 10^2 до 10^4 с^{-1} из-за чего коэффициент n для одного и того же материала и вида технологического процесса варьируется в достаточно широком диапазоне (табл. 1). Большее значение коэффициента n соответствует меньшим скоростям деформации; меньшее значение коэффициента n соответствует большим скоростям деформации.

Таблица 1

Параметры коэффициента n при ЭГИ вытяжке-формовке

Table 1

Parameters of coefficient n during electro-hydraulic drawing

Материал заготовки	Коэффициент n
Латунь Л68	0.0242...0.0485
Алюминий 5754	0.0544...0.1087

Величина диапазона приводит к тому, что использование тех или иных значений коэффициента n влечет за собой широкий разброс получаемых значений эффективной пластической деформации. В связи с этим предлагается новая методика уточнения коэффициента скоростного упрочнения n через коэффициент динамичности K_d .

Методика уточнения коэффициента скоростного упрочнения металла. Методика уточнения коэффициента скоростного упрочнения n реализуется с помощью расчетов в КЭ комплексе LS-DYNA.

Предварительный компьютерный расчет проводится с целью определения диапазона скоростей эффективной деформации с учетом характера нагружения, свойств материала, а также формы и размеров заготовки, что позволит уточнить диапазон скоростей деформации, актуальных для конкретного исследуемого процесса. Полученные данные подставляются в выражение (6), что позволяет уточнить диапазон значений коэффициента скоростного упрочнения n с учетом специфики конкретного процесса.

Последовательность методики показана на примере расчета ЭГИ вытяжки-формовки тонколистовых металлов. Компьютерная модель для расчета создавалась следующим образом. Для заготовки, матрицы и прижима применялись оболочечные модели. Тип элемента для заготовки брался *Thin Shell 163*. Заготовка задавалась многослойной (21 слой) моментной оболочкой по типу *Belytschko-Wong*, который позволяет учитывать изгибающую жесткость. Фактор изгиба (Shear Factor) задавался равным

0.833. Интегрирование напряжений по слоям осуществлялось трапецеидальным законом. Оснастка задавалась двухслойной оболочкой типа *Belytschko*. Материалы заготовок задавались моделями *MPL* и *RSPL*. Материалы прижима и матрицы предполагались абсолютно жесткими и задавались моделью *RIGID* с запретом перемещения и вращения.

Геометрия заготовок и оснастки показана на рис. 1. Начальное положение заготовки – плоскость XY , приложение нагрузки задавалось по оси Z . Для эффективного использования вычислительных ресурсов в расчете задавалась 1/4 заготовки и оснастки. Для линии, ограничивающей заготовку по плоскости симметрии ZX , устанавливался запрет на перемещение и скорость по оси Y и вращение по оси X . Для линии, ограничивающей заготовку по плоскости симметрии ZY , устанавливался запрет на перемещение и скорость по оси X и вращение по оси Y . При контрольном расчете с целыми заготовкой и оснасткой, расхождения в значениях величин скоростей деформации и эффективных пластических деформаций при прочих равных исходных данных не отмечено.

Характеристики материала заготовок даны в табл. 2. Задавалось полусухое трение, которое при решении задач не варьировалось, а его влияние на расчет не оценивалось. Параметры кривой деформационного упрочнения B и m для обоих материалов были определены с помощью аппроксимации опытных данных степенным законом Холломана (1).

Форма импульса давления задавалась зависимостью:

$$p = p_0 N_p (t/\theta)^a \exp(-bt/\theta) \quad (7)$$

где p_0 – амплитудное значение давления, θ – характеристическое время, за которое давление уменьшается в e раз, t – время. Нормирующие величины N_p , a , b определяются соотношениями: $N_p = \exp(b - 1)$; $a = bc$; $b = 1/(1 - c + c \ln c)$, где $c = t_m/\theta$ – коэффициент жесткости фронта давления; t_m – время нарастания давления. В предварительном компьютерном расчете коэффициент жесткости фронта выбирался средним: $c = 0.3$.

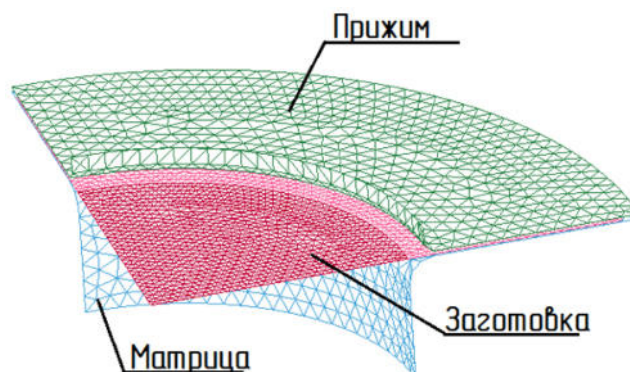


Рис. 1. Конечно-элементная модель матрицы, заготовки и прижима для ЭГИ вытяжки
 Fig. 1. Finite-element model of a die, workpiece and holder for an electro-hydraulic drawing

Таблица 2

Геометрические параметры и характеристики материала заготовки

Table 2

Geometric parameters and characteristics of the workpiece material

Материал заготовки		Латунь Л68	Алюминий 5754
Диаметр заготовки, мм		110	124
Толщина заготовки, мм		0.24	1
Диаметр отверстия матрицы, мм		60	60
Радиус скругления кромки матрицы, мм		3	5
Модуль Юнга (E), ГПа		115	71
Коэффициент Пуассона (ν)		0.34	0.3
Плотность (ρ), кг/м ³		8600	2660
Кулоновское трение	покоя	0.15	0.15
	движения	0.1	0.1
Параметры кривой деформационного упрочнения	B	742	414.7
	m	0.404	0.256
Коэффициент динамичности (K_d)		1.25	1.65

Амплитудная величина импульса давления подбиралась таким образом, чтобы максимальная деформация была ниже кривой FLD, соответствующей началу потери устойчивости (рис. 2).

Результаты расчета представлены ниже. При помощи программного комплекса LS-DYNA выводились графики изменения скорости эффективной деформации во времени $\frac{d\epsilon_{eff}}{dt}$ для элементов в центре заготовки и ближайшей области (рис. 3).

Компьютерные расчеты показали, что максимальные скорости деформаций достигаются

в центральной части заготовок и снижаются в точках в зависимости от удаленности от центра. Для латуни Л68 максимальные скорости деформаций для выбранного процесса, а также геометрии оснастки и заготовки, достигают 6100 с⁻¹; для алюминия – 3400 с⁻¹.

Полученные скорости позволяют рассчитать уточненные коэффициенты скоростного упрочнения металла n для процесса ЭГИ вытяжки-формовки тонколистовых заготовок (табл. 3). Полученные данные находятся в допустимых диапазонах значений коэффициента n для рассматриваемых технологических процессов.

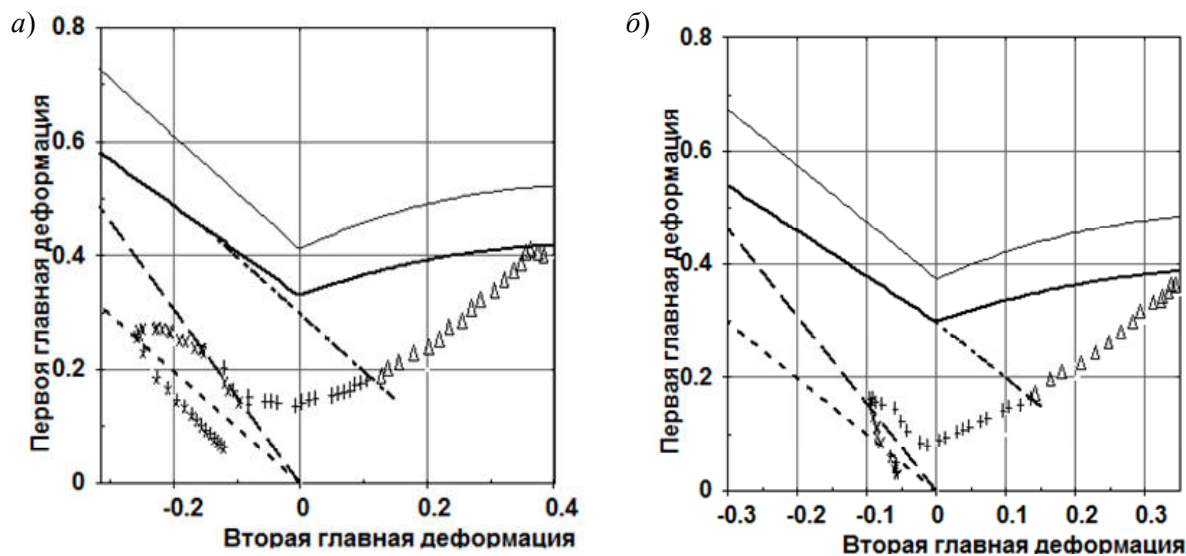


Рис. 2. Диаграмма предельных деформаций (FLD) заготовки, деформированной при ЭГИ вытяжке-формовке: *a* – для заготовки из латуни Л68; *b* – для заготовки из алюминия 5754

Fig. 2. Forming limit diagrams (FLD) of workpieces after electro-hydraulic drawing: *a* – CuZn33 brass; *b* – aluminum 5754

Результаты компьютерного моделирования с заданием разных видов кривой деформационного упрочнения. Для того, чтобы определить возможность использования описанных выше степенных законов и моделей материала для расчетов задач высокоскоростного деформирования тонколистовой заготовки, были проведены сравнительные расчеты процесса свободной ЭГИ вытяжки-формовки заготовок из латуни Л68 и алюминия 5754. Для расчетов с моделью материала *MPL* использовались те же данные, что и в предварительном расчете (табл. 2). Для расчетов с моделью материала *RSPL* добавлялся коэффициент скоростного упрочнения $n = 0.0257$ для латуни Л68 и $n = 0.0615$ для алюминия 5754. При работе с моделью материала *RSPL* коэффициент динамичности K_d при задании характеристик материала не использовался. Форма импульса давления задавалась зависимостью (7). Для пар расчетов амплитудное значение давления задавалось одинаковым.

По результатам компьютерных расчетов определялась относительная погрешность рас-

чета эффективных пластических деформаций (8). Сравнение проводилось по результатам расчетов, полученных с использованием рассмотренных моделей материала *MPL* и *RSPL*.

$$\delta_\epsilon = \frac{|\epsilon_{eff1}^p - \epsilon_{eff2}^p|}{\epsilon_{eff2}^p} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где ϵ_{eff1}^p – соответствует эффективным пластическим деформациям заготовки, рассчитанные по степенному закону *MPL*; ϵ_{eff2}^p – соответствует эффективным пластическим деформациям заготовки, рассчитанные по степенному закону *RSPL*.

Эффективная пластическая деформация близка к интенсивности тензора накопленных деформаций (эквивалентной деформации). Точнее, эффективная деформация – это интеграл по времени интенсивности тензора скоростей деформаций. Оба варианта вычисления эффективной деформации совпадают, когда тензоры накопленных деформаций и скоростей деформаций соосны, что практически имеет место в условиях данных расчетов.

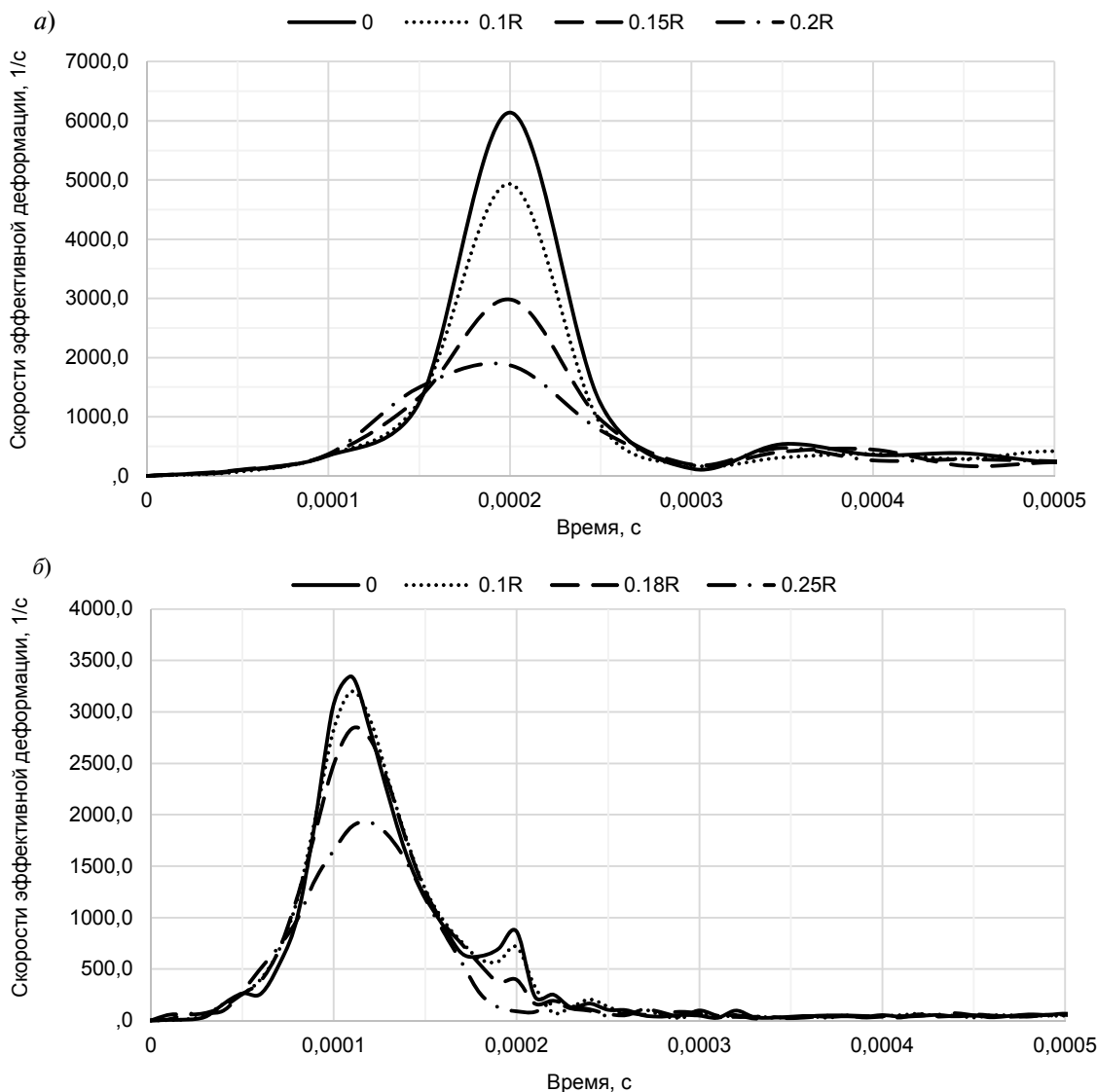


Рис. 3. График изменения скоростей деформации элементов центральной части заготовки с течением времени в зависимости от удаленности от центра (R – радиус заготовки): а) – латунь, б) – алюминий

Fig. 3. Changes of strain rates in time of workpiece elements depending on the element distance from the center (R – radius of the workpiece): a) – brass, b) – aluminum

Таблица 3

Параметры уточненного коэффициента n при ЭГИ вытяжке-формовке

Table 3

Parameters of the refined coefficient n during electro-hydraulic drawing

Материал заготовки	Коэффициент n
Латунь Л68	0.0257
Алюминий 5754	0.0615

На рис. 4 показаны относительные отклонения значений эффективных пластических деформаций, рассчитанных для модели материала MPL , от значений, рассчитанных для модели материала $RSPL$ для различных элементов заготовки.

Как видно из графиков, значения эффективных пластических деформаций, рассчитанных для модели материала MPL , имеют различные погрешности в зависимости от выбранного

элемента. Также следует отметить, что наибольшие отклонения наблюдаются в период времени до 100 мкс, который соответствует этапу начального разгона заготовки. При дальнейшем формоизменении наблюдаются отклонения в эффективных пластических деформациях менее 5 % для заготовки из латуни Л68 и менее 10 % для заготовки из алюминия 5754. К моменту остановки заготовки отличия в значениях эффективных пластических деформаций

для двух моделей материала не превышают 3 % (табл. 4), что свидетельствует о сопоставимости построенных моделей.

Также проводились сравнения по относительному профилю заготовок в момент останова. На рис. 5 показаны кривые для заготовок из латуни Л68. Как видно из графиков, отклонения по относительному профилю не превышают 1...3 %. Для заготовок из алюминия 5754 были получены аналогичные результаты.

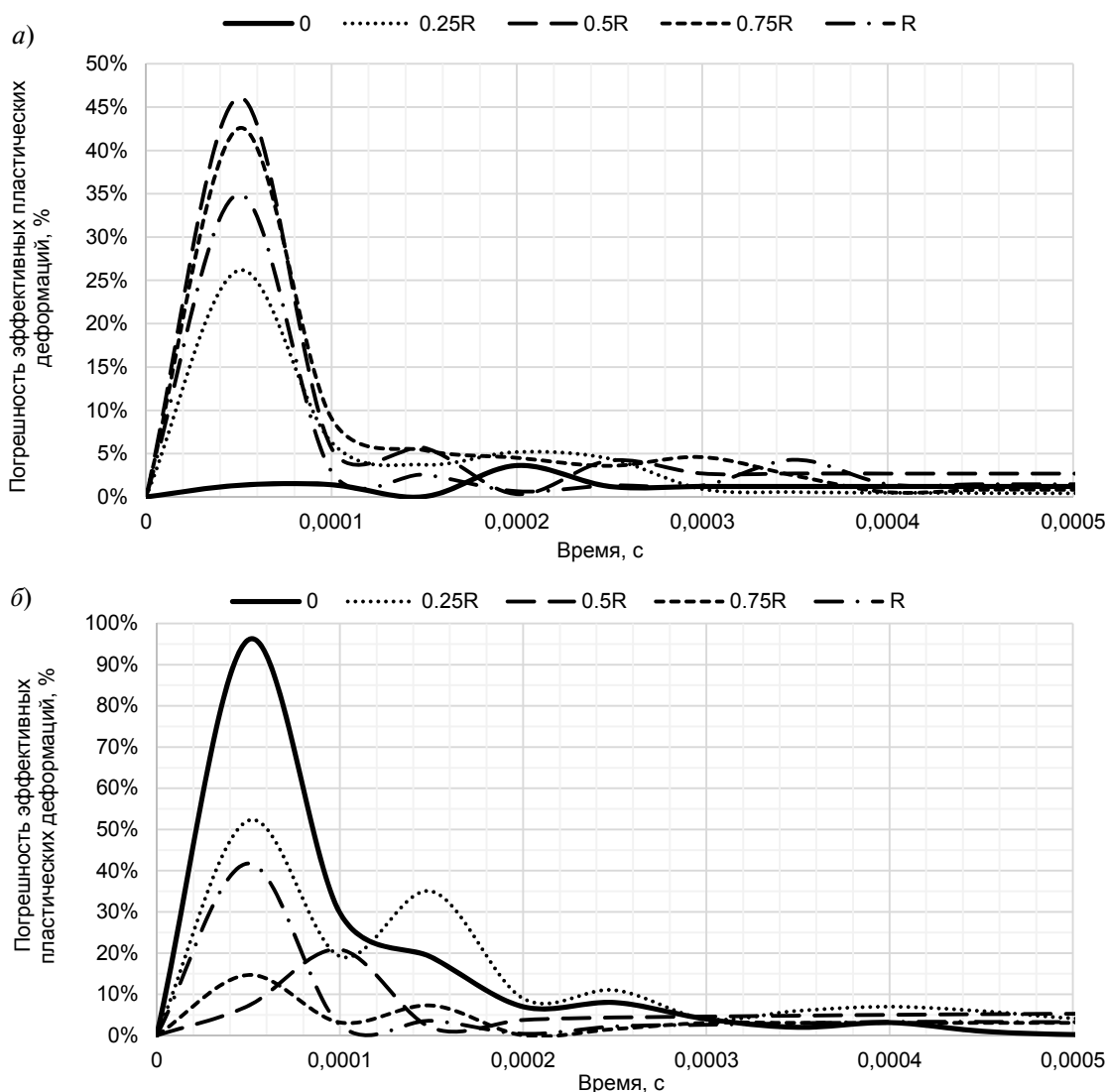


Рис. 4. Отклонения эффективных пластических деформаций для заготовки из латуни Л68 (а) и алюминия 5754 (б), рассчитанных для модели материала *MPL*, от значений, рассчитанных для модели материала *RSPL*

Fig. 4. Deviations of effective plastic strain for brass (a) and aluminum (b) workpieces, calculated for the *MPL* material model, from the values calculated for the *RSPL* material model

Таблица 4

Погрешность эффективных пластических деформаций δ_e в момент остановки заготовки

Table 4

The Error of effective plastic strain δ_e at the time of workpiece stopping

Материал	0	0,25R	0,5R	0,75R	R
Латунь Л68	1,22 %	0,42 %	2,71 %	0,82 %	1,47 %
Алюминий 5754	0,21 %	1,06 %	1,46 %	2,06 %	2,95 %

Примечание: R – радиус заготовки.

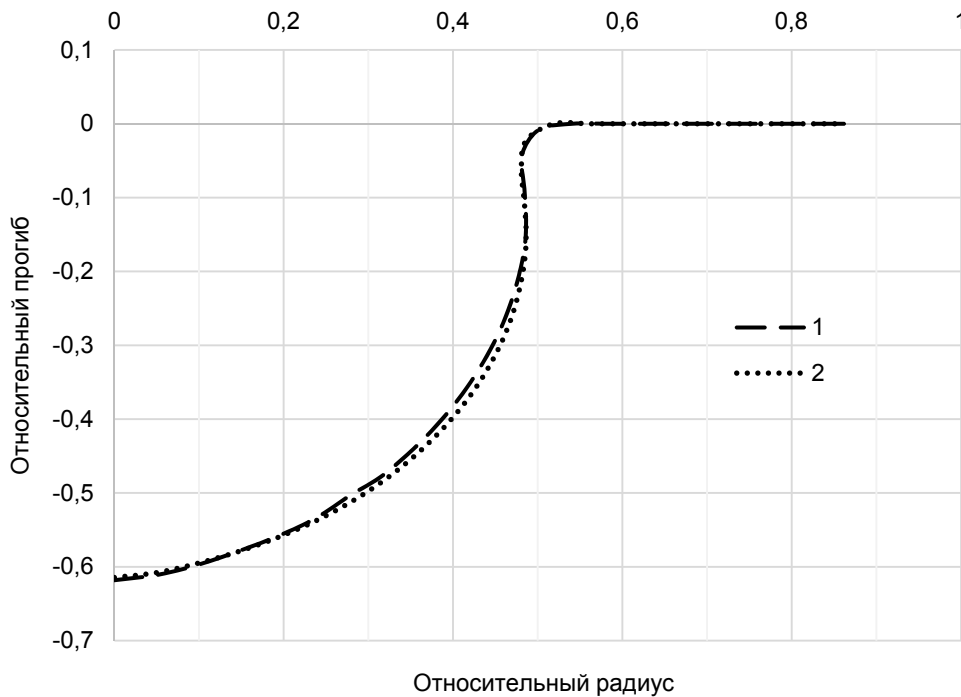


Рис. 5. Кривые относительного профиля заготовок из латуни Л68, полученных в момент остановки:
1 – MPL; 2 – RSPL

Fig. 5. Curves of the relative profile of brass workpieces obtained at the time of stopping: 1 – MPL; 2 – RSPL

Выводы

Были рассмотрены различные методы задания кривой деформационного упрочнения в компьютерных расчетах и соответствующие им модели материала заготовки. Отмечено, что для учета скоростей деформации в модели MPL используется коэффициент динамичности K_d , а в модели RSPL коэффициент скоростного упрочнения n . Разработана и представлена методика уточнения коэффициента скоростного

упрочнения n для процессов импульсной вытяжки-формовки тонколистового металла, которая учитывает геометрию заготовки и специфику процесса деформирования.

В рамках КЭ комплекса LS-DYNA разработаны компьютерные модели процессов вытяжки-формовки тонколистовых заготовок из латуни Л68 и алюминия 5754 при импульсном нагружении для моделей материала, учитывающих различные степенные законы деформационного упрочнения, и проведены соответ-

ствующие компьютерные расчеты свободной ЭГИ вытяжки-формовки тонколистовых заготовок.

Проведена оценка влияния выбора модели материала заготовки и соответствующего им вида кривой деформационного упрочнения на расчеты высокоскоростной вытяжки-формовки.

Модель материала *RSPL* и соответствующая ей кривая деформационного упрочнения (3) позволяет получать более точные результаты расчетов из-за применяемого вида степенного закона, однако использование данной модели связано с некоторыми трудностями. Во-первых, для использования модели требуется предварительный расчет, уточняющий коэф-

фициент скоростного упрочнения металла *n*. Во-вторых, применение данной модели в 2 – 2.5 раза увеличивает время счета одной задачи и использует больше компьютерных ресурсов, из-за чего зачастую необходимо укрупнять конечно-элементную сетку оснастки и заготовки, что может привести к погрешностям в расчетах.

Проведенное исследование позволяет сказать, что применение модели материала *MPL* и советующей кривой деформационного упрочнения (2) с коэффициентом динамичности дает погрешность расчетов 1...3 % в сравнении с моделью материала *RSPL* и является приемлемым для инженерных расчетов и исследования процессов импульсной вытяжки-формовки тонколистовых металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Здор Г.Н., Исаевич Л.А., Качанов И.В. Технологии высокоскоростного деформирования материалов. Минск: БНТУ, 2010. 456 с.
- [2] Linnemann M., Psyk V., Djakow E., Springer R., Landgrebe D. High-Speed Incremental Forming – New Technologies For Flexible Production Of Sheet Metal Parts // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 27. P. 21–26.
- [3] Mehdi Zohoor, Seyed Meysam Mousavi. Experimental analysis and smoothed particle hydrodynamics modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts // *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. Vol. 35. P. 16–28.
- [4] Jia Cheng, Daniel E. Green, Sergey F. Golovashchenko. Formability enhancement of DP600 steel sheets in electro-hydraulic die forming // *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. Vol. 244. P. 178–189.
- [5] Christopher Maris, Amir Hassannejadasl, Daniel E. Green, Jia Cheng, Yiteng Liang. Comparison of quasi-static and electrohydraulic free forming limits for DP600 and AA5182 sheets // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 235. P. 206–219.
- [6] Radha Krishna Lal, Vikas Kumar Choubey, Dwivedi J.P., Shravan Kumar. Study of factors affecting Springback in Sheet Metal Forming and Deep Drawing Process // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5, is. 2. P. 1. P. 4353–4358.
- [7] Юткин Л.А. Электродвигательный эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. 253 с.
- [8] Langstädtler L., Pegel H., Beckschwarte B., Herrmann M., Kuhfuss B. Flexible tooling for impulse forming // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 27. P. 130–137.
- [9] Старков Н.В., Старков И.Н. Определение параметров разрядного контура электрогидравлического пресса при штамповке листовых деталей сложной формы // *Электронная обработка материалов*. 2017. 53(1). P. 108–113.
- [10] Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006. 498 p.
- [11] Мамутов А.В., Мамутов В.С. Моделирование электрогидроимпульсной листовой формовки с применением комплекса LS-DYNA // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2014. Вып. 1 (190). С. 101–107.
- [12] Mamutov V.S., Mamutov A.V., Golovaschenko S.F. Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA®. 1th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming, Dearborn, USA, 2014, p. 9.
- [13] Лепеш Г.В., Иванова Е.С., Егоров К.А. Применение CAD/CAE технологий для исследования работоспособности эластичного обтюлятора в условиях импульсного нагружения высоким давлением // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2016. № 1 (35). С. 24–29.
- [14] Arash Jenab, Daniel E. Green, Ahmet T. Alpas, Sergey F. Golovashchenko. Experimental and numerical



analyses of formability improvement of AA5182-O sheet during electro-hydraulic forming // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 255. P. 914–926.

[15] **Третьяков А.В., Зюзин В.И.** Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. 224 с.

[16] **Мазуровский Б.Я., Сизев А.Н.** Электрогидравлический эффект в листовой штамповке. Киев: изд-во Наукова думка, 1983. 192 с.

[17] **Jitang Fan, Minqiang Jiang.** Strain hardenability of a gradient metallic alloy under high-strain-rate compressive loading // Materials & Design. 2019. Vol. 170. Article 107695.

[18] **Мамутов В.С., Мамутов А.В.** Теория обработки металлов давлением. Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 188 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АРСЕНТЬЕВА Ксения Сергеевна — кандидат технических наук ассистент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: xenia.ars@gmail.com

МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 15.11.2019

REFERENCES

[1] **G.N. Zdor, L.A. Isayevich, I.V. Kachanov,** Tekhnologii vysokoskorostnogo deformirovaniya materialov [Technologies of high-voltage deformation of materials: monograph]. Minsk: BNTU, 2010.

[2] **M. Linnemann, V. Psyk, E. Djakow, R. Springer, D. Landgrebe,** High-Speed Incremental Forming – New Technologies For Flexible Production Of Sheet Metal Parts, Procedia Manufacturing, 27 (2019) 21–26.

[3] Mehdi Zohoor, Seyed Meysam Mousavi. Experimental analysis and smoothed particle hydrodynamics modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts, Journal of Manufacturing Processes, 35 (2018) 16–28.

[4] **Jia Cheng, D.E. Green, S.F. Golovashchenko,** Formability enhancement of DP600 steel sheets in electro-hydraulic die forming, Journal of Materials Processing Technology, 244 (2017) 178–189.

[5] **Maris Christopher, Amir Hassannejadasl, D.E. Green, Jia Cheng, Yiteng Liang,** Comparison of quasi-static and electrohydraulic free forming limits for DP600 and AA5182 sheets, Journal of Materials Processing Technology, 235 (2016) 206–219.

[6] **Radha Krishna Lal, Vikas Kumar Choubey, J.P. Dwivedi, Shravan Kumar,** Study of factors affecting Springback in Sheet Metal Forming and Deep Drawing Process, Materials Today: Proceedings, 5 (2-1) (2018) 4353–4358.

[7] **L.A. Yutkin,** Elektrogidravlicheskiy effekt i yego primeneniye v promyshlennosti [Electro-hydraulic effect and its application in industry]. L.: Mashinostroyeniye, Leningr. otd-niye, 1986.

[8] **L. Langstädtler, H. Pegel, B. Beckschwarte, M. Herrmann, B. Kuhfuss,** Flexible tooling for impulse forming, Procedia Manufacturing, 27 (2019) 130–137.

[9] **N.V. Starkov, I.N. Starkov,** Opredeleniye parametrov razryadnogo kontura elektrogidravlicheskogo pressa pri shtampovke listovykh detaley slozhnoy formy [Determination of the parameters of the discharge circuit of an electro-hydraulic press during stamping of sheet parts of complex shape], Elektronnaya obrabotka materialov, 53(1) (2017) 108–113.

[10] **J.O. Hallquist,** LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, SA, 2006.

[11] **A.V. Mamutov, V.S. Mamutov,** Modelirovaniye elektrogidroimpulsnoy listovoy formovki s primeneniyyem kompleksa LS-DYNA, Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU, 1 (190) (2014) 101–107.

[12] **V.S. Mamutov, A.V. Mamutov, S.F. Golovaschenko,** Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA®, 1th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming, Dearborn, USA, (2014) 9.

- [13] **G.V. Lepesh, Ye.S. Ivanova, K.A. Yegorov**, *Primeneniye CAD/CAE tekhnologiy dlya issledovaniya rabotosposobnosti elastichnogo obturatora v usloviyakh impulsnogo nagruzheniya vysokim davleniyem* [Application of CAD/CAE technologies for research of operability of the elastic obturator in conditions of shock loading by the high pressure], *Tekhniko-tekhnologicheskiye problemy servisa*, 1 (35) (2016) 24–29.
- [14] **Arash Jenab, D.E. Green, A.T. Alpas, S.F. Golovashchenko**, *Experimental and numerical analyses of formability improvement of AA5182-O sheet during electro-hydraulic forming*, *Journal of Materials Processing Technology*, 255 (2018) 914–926.
- [15] **A.V. Tretyakov, V.I. Zyuzin**, *Mekhanicheskiye svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniyem* [Mechanical properties of metals and alloys during pressure processing]. M.: Metallurgiya, 1973.
- [16] **B.Ya. Mazurovskiy, A.N. Sizev**, *Elektrohidravlicheskiy effekt v listovoy shtampovke* [Electrohydraulic effect in Sheet Forming]. Kiyev: izd-vo Naukova dumka, 1983.
- [17] **Jitang Fan, Minqiang Jiang**, *Strain hardenability of a gradient metallic alloy under high-strain-rate compressive loading*, *Materials & Design*, 170 (2019), Article 107695.
- [18] **V.S. Mamutov, A.V. Mamutov**, *Teoriya obrabotki metallov davleniyem. Kompyuternoye modelirovaniye protsessov listovoy shtampovki* [Theory of metal forming. Computer modeling of sheet metal stamping processes]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006.

THE AUTHORS

ARSENTYEVA Xenia S. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: xenia.ars@gmail.com

MAMUTOV Viacheslav S. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

Received: 15.11.2019