

DOI: 10.18721/JEST.240113
УДК 621.7.044

К.С. Арсентьева, В.С. Мамутов

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

ДИНАМИЧЕСКАЯ КРИВАЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ВЫТЯЖКИ-ФОРМОВКИ В КОМПЛЕКСЕ LS-DYNA®

В условиях электрогидроимпульсной вытяжки-формовки с использованием конечно-элементного программного комплекса LS-DYNA 971 исследовано влияние вариантов задания параметров динамической кривой деформационного упрочнения на погрешность расчета. Компьютерный расчет проводился для заготовки из латуни Л68 толщиной 0,24 мм при свободной вытяжке в матрицу диаметром 60 мм. Исследовалось влияние на разные степени деформации вида кривой квазистатического деформационного упрочнения, получаемой на основе испытаний образцов на растяжение и способа многократно прокатываемой металлической полосы. Проведено сравнение методов аппроксимации кривой деформационного упрочнения и получения параметров аппроксимации, оценено их влияние на последующие компьютерные расчеты. Выполнено сравнение погрешности учета динамического упрочнения с помощью постоянного коэффициента динамичности и с использованием функциональной зависимости Cowper-Symonds.

ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ ВЫТЯЖКА-ФОРМОВКА; КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ КОМПЛЕКС LS-DYNA 971; КВАЗИСТАТИЧЕСКАЯ КРИВАЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ; ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ; ПОСТОЯННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ДИНАМИЧНОСТИ; ЗАВИСИМОСТЬ COWPER-SYMONDS.

Ссылка при цитировании:

К.С. Арсентьева, В.С. Мамутов. Динамическая кривая деформационного упрочнения при расчетах электрогидроимпульсной вытяжки-формовки в комплексе LS-DYNA® // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 130–140. DOI: 10.18721/JEST.240113.

X.S. Arsentyeva, V.S. Mamutov

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

DYNAMIC STRAIN HARDENING CURVE IN SIMULATION OF ELECTRO-HYDRAULIC SHEET METAL FORMING USING LS-DYNA®

The article presents an investigation of the influence that variation of the parameters of a dynamic strain hardening curve has on the calculation error in electro-hydraulic impulse metal drawing. Finite-element LS-DYNA 971 code was used. Computer simulation in this study was carried out for 0.24 mm-thick CuZn33 brass sheet blank under free drawing into a die 60 mm in diameter. We have investigated the influence of the type of quasi-static strain hardening curve. We have considered two different techniques of obtaining the curves: the tensile test method and the method of repeatedly rolled metal strip with different degrees of deformation. Moreover, we have considered methods of approximating the strain hardening curve and methods of obtaining the approximation coefficients for computer calculations. We have also estimated the error of taking into account dynamic hardening with a constant dynamic coefficient in comparison with using the Cowper-Symonds functional dependence.

ELECTRO-HYDRAULIC SHEET METAL DRAWING; FINITE-ELEMENT SOFTWARE LS-DYNA 971; QUASI-STATIC STRAIN HARDENING CURVE TYPE; ALLOWANCE OF THE DYNAMIC HARDENING; CONSTANT DYNAMIC COEFFICIENT; COWPER-SYMONDS RELATION.

Citation:

X.S. Arsentyeva, V.S. Mamutov. Dynamic strain hardening curve in simulation of electro-hydraulic sheet metal forming using LS-DYNA®, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 130–140, DOI: 10.18721/JEST.240113.

Введение

Электрогидроимпульсная (ЭГИ) вытяжка-формовка тонколистовых и особо тонколистовых металлов – один из наиболее эффективных процессов ЭГИ штамповки в условиях мелкосерийного производства [1, 2]. Схема ЭГИ вытяжки-формовки в открытую матрицу представлена на рис. 1.

При подаче управляющего импульса на разрядник *D* ЭГИ установки происходит высоковольтный разряд предварительно

заряженной конденсаторной батареи *C* на искровой промежуток между электродами *1* в рабочей жидкости *2*, которая заполняет разрядную камеру *3*. В канале разряда выделяется электрическая энергия и образуется низкотемпературная плазма высокого давления. При расширении плазменной полости в рабочей жидкости возникает импульсное давление, за счет которого осуществляется вытяжка-формовка листовой заготовки *4* в соответствии с профилем матрицы *5*.

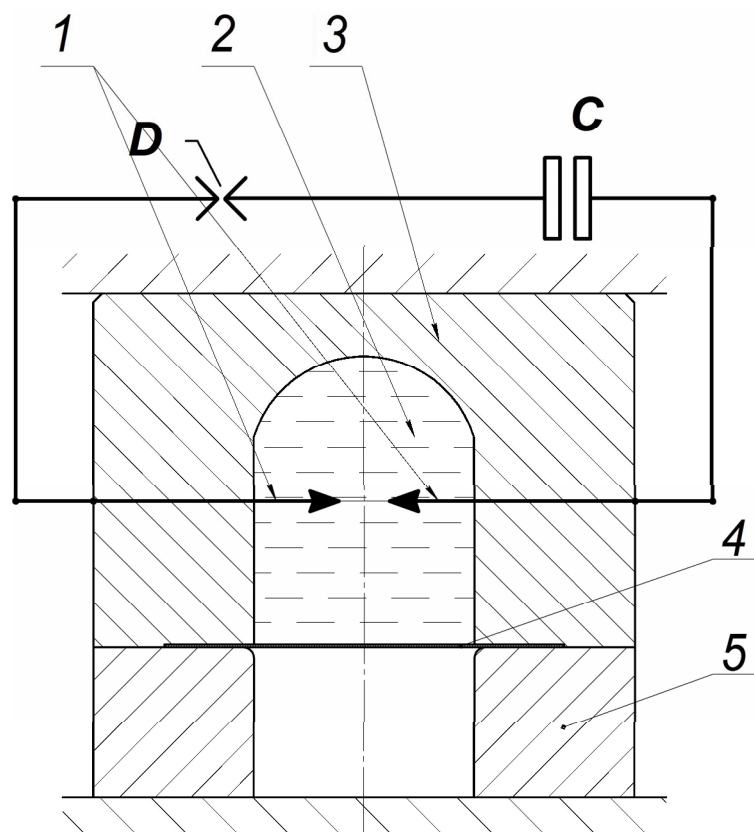


Рис. 1. Схема ЭГИ вытяжки-формовки: 1 – электроды; 2 – рабочая жидкость; 3 – разрядная камера; 4 – листовая заготовка; 5 – матрица
 Fig. 1. Scheme of electro-hydraulic impulse drawing: 1 – electrodes; 2 – pressure transmitting liquid; 3 – discharge chamber; 4 – sheet metal blank; 5 – die

При правильном проектировании технологии данный процесс обеспечивает низкую себестоимость получаемых деталей и сжатые сроки подготовки производства за счет простоты технологической оснастки по сравнению со штамповкой в жестких инструментальных штампах. Кроме того, можно обеспечить более высокую точность и качество изделий за счет импульсного нагружения и незначительного пружинения заготовки [3], а также замедления начала деструкционной пластичности. Данный процесс характеризуется рядом сложных физико-механических явлений преобразования электрической энергии конденсаторов сначала в энергию плазмы, потом в энергию сжатой жидкости, а затем в энергию пластического деформирования заготовки. Большое число факторов, значимо влияющих на процесс, требует его трудоемкой экспериментальной отладки либо корректного компьютерного моделирования, чтобы проектируемая технология была работоспособной.

С развитием современных ЭВМ и вычислительных методов появилась возможность численного решения таких сложных задач во всей полноте технологической и физической постановки. Один из наиболее эффективных конечно-элементных (КЭ) комплексов для расчета процессов импульсной штамповки — LS-DYNA [4] — изначально разработан для расчетов воздействия подводных взрывов на металлические конструкции. С начала 2010-х годов он начал применяться для расчетов процессов импульсной листовой штамповки [5]. При этом первоначально давление на заготовку предполагалось заданным. Дальнейшее развитие моделирования позволило учитывать динамику развития плазменного канала и гидродинамику жидкости [6–8], что дало возможность получить реальное давление на подвижной заготовке. Использование специальных типов моментных оболочек позволяет оценить вероятность складкообразования

при формоизменении материала, как это показано в работах [9, 10]. В указанных выше работах при задании параметров динамической кривой деформационного упрочнения металла влияние скорости деформации учитывалось экспериментальным интегральным коэффициентом — некоторой постоянной величиной, корректирующей зависимость деформационного упрочнения. В реальном процессе вытяжки-формовки в каждой точке заготовки для разных моментов времени коэффициент скоростного упрочнения имеет разные значения, особенно в силу того, что деформирование начинается с центра заготовки при неподвижном фланце из-за большой его инерционности в направлении образующей заготовки. Используя комплекс LS-DYNA, можно применять различные физические модели и подходы для учета скоростного упрочнения металла, однако оценка их применимости для расчета процесса вытяжки-формовки ранее не производилась.

Целью нашей работы была оценка влияния параметров динамической кривой деформационного упрочнения металла в условиях ЭГИ вытяжки-формовки на расчеты, осуществляемые с помощью КЭ комплекса LS-DYNA.

Динамическая кривая деформационного упрочнения

Динамическая кривая деформационного упрочнения определяет зависимость напряжения текучести σ_s от интенсивности тензора накопленных деформаций ε_i и скорости деформаций $\dot{\varepsilon}_i = d\varepsilon_i / dt$:

$$\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i). \quad (1)$$

Применение такой зависимости необходимо для расчета процессов импульсной штамповки, где скорости деформаций достигают до величины $\dot{\varepsilon}_i = 10^3 - 10^4 \text{ с}^{-1}$. Динамическое сопротивление текучести при ЭГИ штамповке может на 40–60 % пре-

вышать статическое напряжение текучести, что в свою очередь определяет уровень дополнительной погрешности при неучете данного фактора. В современных расчетных моделях чаще всего зависимость (1) представляют в виде произведения статической и динамической составляющей:

$$\sigma_s = f_s(\varepsilon_i) f_d(\dot{\varepsilon}_i), \quad (2)$$

хотя динамический эффект зависит и от величины деформации.

Статическую составляющую кривой деформационного упрочнения $\sigma_s = f_s(\varepsilon_i)$ чаще всего получают путем испытания образцов специальной формы на растяжение [11]. При этом для инженерных расчетов листовой штамповки вместо зависимости $f_s(\varepsilon_i)$ часто используют зависимость условных напряжений σ_{s0} от относительной (инженерной) деформации ε_e [12]. Из такой зависимости можно получить, кроме начального напряжения текучести σ_{s0} , также предел прочности и относительное удлинение при разрыве образца, необходимые для простых инженерных расчетов процессов обработки давлением. Для компьютерных расчетов используют параметры аппроксимации зависимости истинных напряжений от истинных деформаций, $\sigma_s = f_s(\varepsilon_i)$, полагая, что в условиях простого нагружения при испытаниях сумма приращений интенсивности тензора накопленных деформаций совпадает с эффективной деформацией. При этом достаточно часто экспериментальные данные аппроксимируют степенной зависимостью Холломана

$$\sigma_s = B \varepsilon_i^m, \quad (3)$$

где B и m – коэффициенты аппроксимации.

Главным недостатком испытания образцов на растяжение является незначительная деформация до момента шейкообразования, когда тензор напряжений сохраняет одноосный вид. Однако компьютерные расчеты даже при листовой штам-

повке часто осуществляются при значительно больших деформациях, и реальная кривая деформационного упрочнения может сильно отличаться от аппроксимированной зависимости (3), полученной при растяжении образца.

Более предпочтителен способ получения статической кривой деформационного упрочнения, представленный в работе [13]. При указанном способе предварительно термообработанная на максимальную пластичность металлическая полоса многократно прокатывается на разные степени деформации. Для каждой степени деформации вырезается образец и испытывается на растяжение. Определяется начальное напряжение текучести σ_{s0} и строится зависимость $\sigma_s = \sigma_{s0} = f_s(\varepsilon_i)$. Величина ε_i определяется для каждой степени деформации. Такой способ более трудоемок по сравнению с однократным растяжением, но параметры аппроксимации полученной зависимости можно использовать при расчете процессов с большими деформациями.

Более сложно с экспериментальной точки зрения определение динамической добавки $f_d(\dot{\varepsilon}_i)$. Существует достаточно много способов экспериментальной оценки влияния скорости деформации на параметры кривой деформационного упрочнения. Однако не все они пригодны при скоростях деформаций, характерных для ЭГИ вытяжки-формовки, из-за возможного влияния волновых процессов в образце и в опытной оснастке на результаты испытаний. Достаточно приемлемыми испытаниями для таких скоростей деформаций являются метод импульсной раздачи кольцевых образцов и метод поперечного удара, результаты практической апробации которых для ряда листовых металлов представлены в работе [14]. В них для определенного диапазона скоростей деформации, характерных для испытания, определяется некоторый интегральный коэффициент динамичности

$$f_d(\dot{\varepsilon}_i) = K_d, \quad (4)$$

при помощи которого можно упрощенно учитывать скоростное упрочнение зависимость

$$\sigma_s = K_d f_s(\varepsilon_i). \quad (5)$$

При степенной аппроксимации упрочнения (3) в этом случае можно использовать зависимости

$$\sigma_s = B_d \varepsilon_i^m; \quad B_d = K_d B. \quad (6)$$

Зная величину K_d , скорость деформации при динамическом испытании, а также скорость деформации, при которой динамическая кривая близка к квазистатической (нормирующая скорость деформаций), можно определить соответствующую функцию $f_d(\dot{\varepsilon}_i)$. Обычно в современных моделях металлов, например в модели Джонсона–Кука, значение нормирующей скорости деформаций выбирается $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$ [15].

Далее делается оценка погрешности применения динамической кривой деформационного упрочнения (6) при расчете ЭГИ вытяжки-формовки при помощи КЭ комплекса LS-DYNA.

Модель динамического упрочнения металла в КЭ комплексе LS-DYNA

В рамках КЭ комплекса LS-DYNA коррекцию расчетов, связанную с учетом влияния больших скоростей, можно осуществить несколькими способами. Рассмотрим наиболее часто применяемую для расчетов листовой штамповки модель *MAT_018: MAT_POWER_LAW_PLASTICITY (MPL). Данная модель предполагает изотропный материал и позволяет учитывать деформационное и скоростное упрочнение металла.

Модель MPL использует степенной закон деформационного упрочнения. При этом для учета динамического упрочнения степенную зависимость (3) можно скорректировать скоростным коэффициентом K_d (6).

Кроме того, в модели MPL может быть учтена скоростная зависимость по формуле Cowper-Symonds:

$$f_d(\dot{\varepsilon}_i) = 1 + \left(\frac{d\varepsilon / dt}{C} \right)^P, \quad (7)$$

параметры C и P которой могут быть определены по величинам K_d , скорости деформации при динамическом испытании, а также нормирующей скорости деформаций. При выборе зависимости (6) коэффициенты C и P в карте *MAT_POWER_LAW_PLASTICITY не задаются.

Исходные расчетные данные

В качестве материала принята латунь Л68. Предполагалась ее изотропность. Согласно данным работы [13] для выбранного материала зависимость истинного напряжения (в кГ/мм²) от инженерной деформации, полученная методом многократной прокатки полосы, имеет вид

$$\sigma_{02} = 12 + 3,6(100\varepsilon_e)^{0,62}. \quad (8)$$

Переходя от инженерной деформации к истинной деформации

$$\varepsilon_i = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (9)$$

и аппроксимируя (например, с помощью MS Excel) зависимость (8) формулой (3), можно получить коэффициенты аппроксимации: $B = 661 \text{ МПа}$; $m = 0,356$ при $\varepsilon_e^* \leq 0,4$ и $B = 742 \text{ МПа}$; $m = 0,4$ при $\varepsilon_e^* \leq 0,7$. Здесь ε_e^* – верхняя граница диапазона инженерной деформации, в котором осуществлялась аппроксимация.

Значение коэффициента динамического упрочнения – $K_d = 1,25$ – взято из работы [16]. При расчете задавались также: $E = 115 \text{ ГПа}$ (модуль Юнга); $\nu = 0,34$ (коэффициент Пуассона); $\rho = 8600 \text{ кг/м}^3$ (плотность); кулоновское трение со значениями коэффициента при трении покоя $\mu = 0,15$ и при движении $\mu = 0,1$.

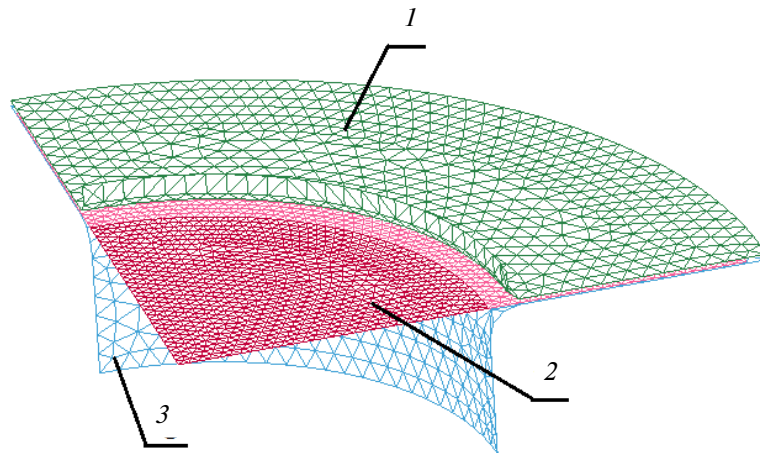


Рис. 2. Геометрическая модель вытяжки-формовки: 1 – прижим; 2 – заготовка; 3 – матрица
 Fig. 2. Geometrical model of drawing: 1 – sheet holder; 2 – blank; 3 – die

Для варианта расчета с использованием скоростной зависимости упрочнения по формуле Cowper-Symonds (7) в диапазоне скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_i \in [10^3-10^4] \text{ c}^{-1}$ при значении $K_d = 1,25$ получены величины $C = 4,58 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$ и $P = 8,413$ с учетом $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ c}^{-1}$.

Оценка влияния параметров динамической кривой деформационного упрочнения осуществлялась для процесса свободной вытяжки-формовки круглых в плане заготовок диаметром 110 мм и толщиной 0,24 мм в матрицу с диаметром очка 60 мм и радиусом скругления кромки 3 мм. Материалы матрицы и прижима предполагались абсолютно жесткими и задавались моделью RIGID. С учетом плоскостей симметрии бралась 1/4 часть заготовки (рис. 2).

Для заготовки использовалась модель оболочки по типу Belytschko-Wong, позволяющая при соответствующем задании карт контакта учесть текущую толщину материала. Дополнительный зазор между заготовкой – матрицей – прижимом задавался 5 % от толщины материала заготовки и полагался фиксированным в процессе формоизменения заготовки.

Импульсное давление задавалась равномерно по площади свободной части заготовки временным соотношением

$$p = p_0 N_p (t/\theta)^a \exp(-bt/\theta), \quad (10)$$

где t – время; p_0 – амплитудное значение давления; θ – характеристическое время,

за которое давление уменьшается в e раз. Нормирующая величина N_p , определяется соотношениями

$$N_p = \exp(b - 1); \quad a = bt^*, \\ b = 1/(1 - t^* + t^* \ln t^*); \quad t^* = t_m/\theta,$$

где t_m – время нарастания давления.

Рассматривались два варианта импульса давления – с относительным временем нарастания давления $t^* = 0,1$ и $t^* = 0,5$ при характеристической длительности давления $\theta = 1200$ мкс. Величина импульса давления при этом подбиралась таким образом, чтобы максимальная деформация была близка к нижней кривой предельных деформаций (FLD) (рис. 3). На диаграммах показано деформированное состояние точек вдоль образующей заготовки.

Численный эксперимент и анализ результатов

При поведении численного эксперимента оценивалось:

- влияние на результаты расчетов верхней границы аппроксимации статической кривой деформационного упрочнения ($\epsilon_e^* \leq 0,4$ и $\epsilon_e^* \leq 0,7$) при постоянном коэффициенте динамичности ($K_d = 1,25$);
- влияние на результаты расчетов того, как задается динамическое упрочнение: постоянным коэффициентом $K_d = 1,25$ или зависимостью Cowper-Symonds со значениями параметров $C = 4,58 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$, $P = 8,413$.

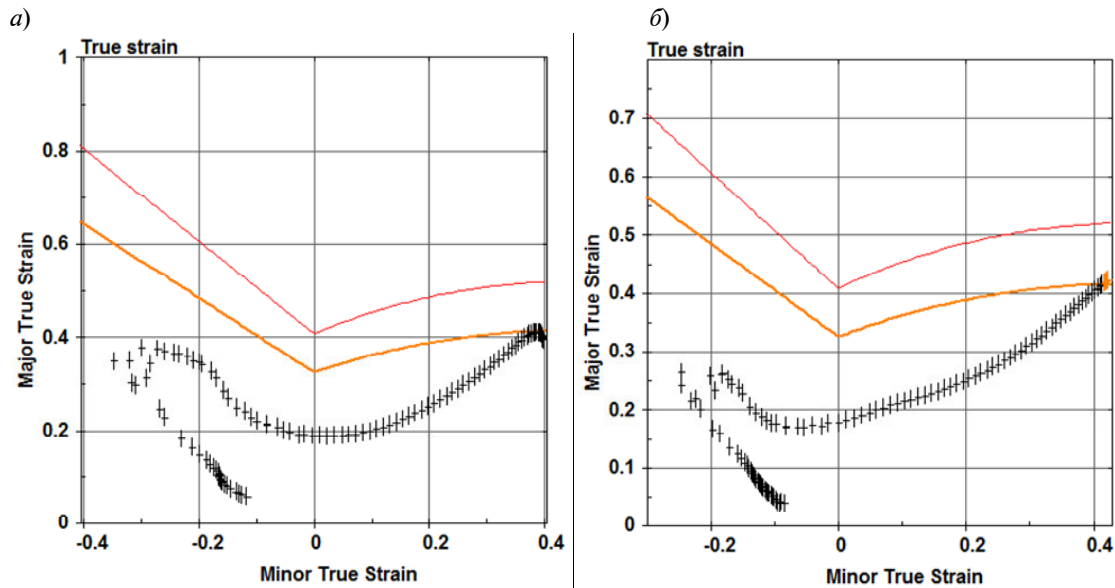


Рис. 3. Диаграммы предельных деформаций в координатах «первая истинная главная деформация – вторая истинная главная деформация» для параметров расчета:

а) $\varepsilon_e^* \leq 0,7$, $K_d = 1,25$, $t^* = 0,1$, $p_0 = 57$ МПа;

б) $\varepsilon_e^* \leq 0,7$, $K_d = 1,25$, $t^* = 0,5$, $p_0 = 72,5$ МПа

Fig. 3. Forming limit diagrams in the coordinates «major true strain – minor true strain» for the calculation parameters:

а) $\varepsilon_e^* \leq 0,7$, $K_d = 1,25$, $t^* = 0,1$, $p_0 = 57$ МПа;

б) $\varepsilon_e^* \leq 0,7$, $K_d = 1,25$, $t^* = 0,5$, $p_0 = 72,5$ МПа

При этом относительное время нарастания давления для каждого расчетного варианта варьировалось: $t^* = 0,1$ и $t^* = 0,5$.

Для выбранных вариантов максимальные значения скоростей деформаций для характерных точек заготовки (1 – центр заготовки, 2 – вблизи радиуса закругления кромки матрицы, 3 – на краю фланца), полученные в расчетах, показаны на рис. 4.

В технологическом аспекте важной характеристикой является деформация точек заготовки в конце процесса деформирования. На рис. 5 представлена зависимость от времени эффективной пластической деформации для одного из вариантов расчета. Данная зависимость позволяет определить значения конечных величин деформаций и сравнить результаты для указанных выше вариантов расчета.

Результаты расчетов эффективной деформации ε_{ef} в характерных точках заготовки в момент ее остановки представлены в таблице.

Величины эффективной деформации в характерных точках заготовки в момент ее остановки

Effective plastic strain in the points of blank at the end of the movement

Вариант расчета и основные параметры	Время нарастания давления t^* , с	Эффективная деформация ε_{ef}		
		в точке 1	в точке 2	в точке 3
MPL1 $\varepsilon_e^* \leq 0,7$, $K_d = 1,25$	0,1	0,806	0,236	0,174
	0,5	0,856	0,207	0,146
MPL2 $\varepsilon_e^* \leq 0,4$, $K_d = 1,25$	0,1	0,755	0,219	0,145
	0,5	0,763	0,189	0,123
MPL3 $\varepsilon_e^* \leq 0,7$, $P = 8,413$, $C = 4,58 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$	0,1	0,787	0,237	0,186
	0,5	0,868	0,213	0,142

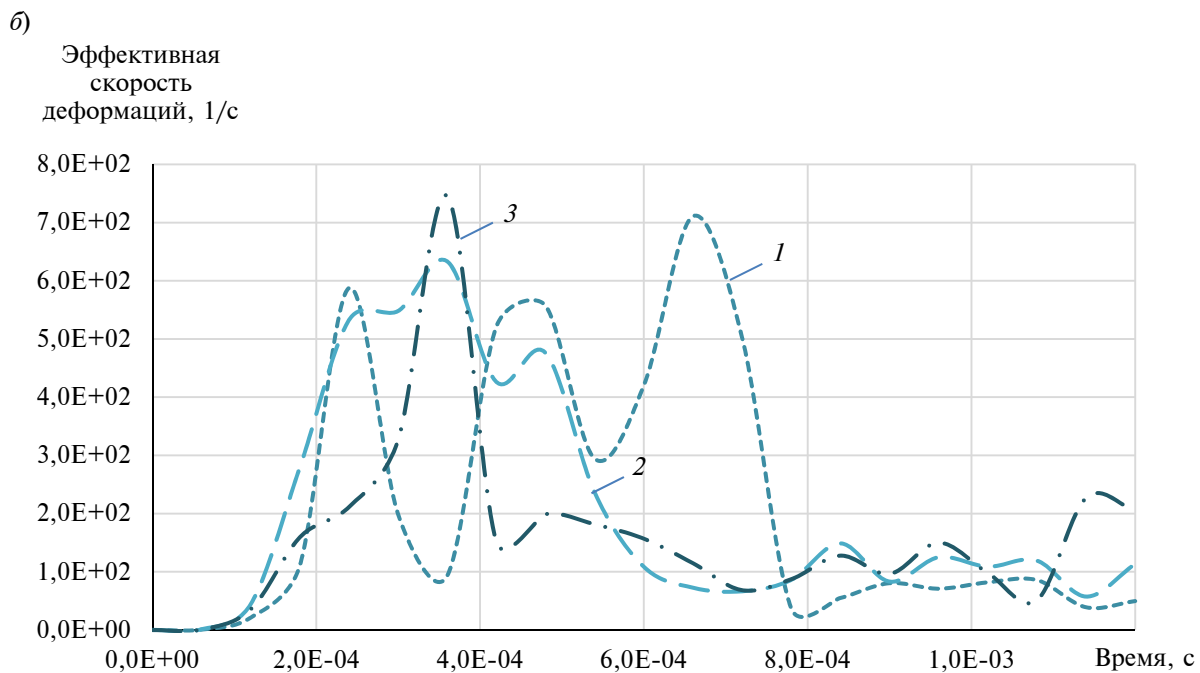
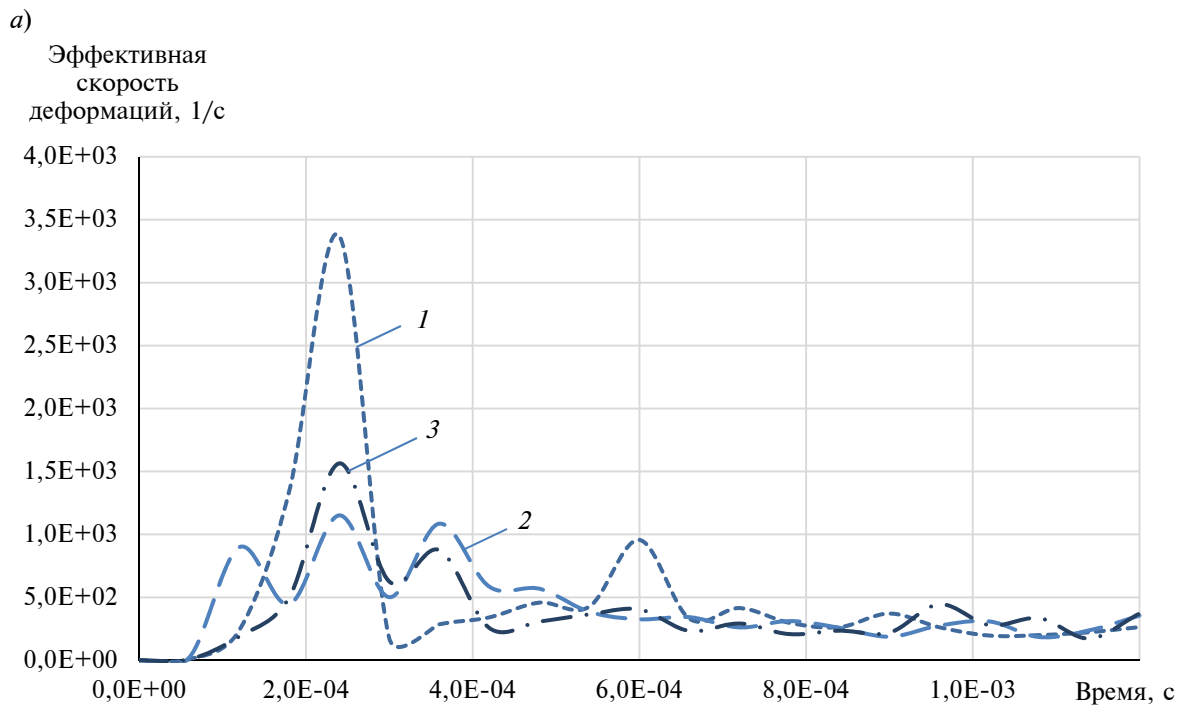


Рис. 4. Зависимость эффективных скоростей деформации характерных точек (1, 2, 3) заготовки от времени для следующих параметров расчета:

a – $\varepsilon_e^* \leq 0,7$, $K_d = 1,25$, $t^* = 0,1$, $p_0 = 57$ МПа;

b – $\varepsilon_e^* \leq 0,7$, $K_d = 1,25$, $t^* = 0,5$, $p_0 = 72,5$ МПа

Fig. 4. The dependence of effective plastic strain-rate in representative sheet metal blank points (1, 2, 3) on time for the calculation parameters:

a – $\varepsilon_e^* \leq 0,7$, $K_d = 1,25$, $t^* = 0,1$, $p_0 = 57$ МПа;

b – $\varepsilon_e^* \leq 0,7$, $K_d = 1,25$, $t^* = 0,5$, $p_0 = 72,5$ МПа

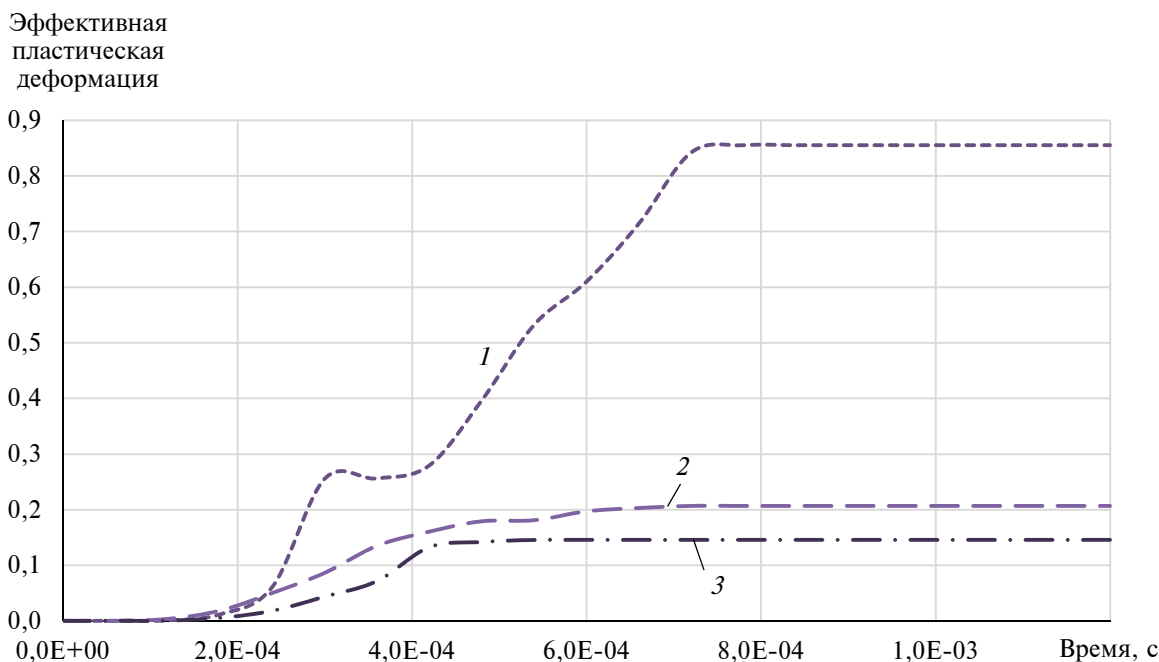


Рис. 5. Зависимость эффективных пластических деформаций характерных точек заготовки (1, 2, 3) от времени для варианта расчета с данными $\varepsilon_e^* \leq 0,7$; $K_d = 1,25$, $t^* = 0,5$, $p_0 = 72,5$ МПа
 Fig. 5. The dependence of effective plastic strain in representative sheet metal blank points (1, 2, 3) on time for the calculation parameters $\varepsilon_e^* \leq 0,7$; $K_d = 1,25$, $t^* = 0,5$, $p_0 = 72,5$ МПа

Выполнено сравнение результатов расчетов вариантов *MPL1* и *MPL2*, полученных при постоянном коэффициенте динамического упрочнения, но при разных интервалах аппроксимации квазистатической кривой упрочнения. Судя по данным таблицы, величины эффективной деформации в центре заготовки равны $\varepsilon_{ef} = 0,806$ при давлении с коротким фронтом $t^* = 0,1$ и $\varepsilon_{ef} = 0,856$ при давлении с фронтом $t^* = 0,5$. Данные величины находятся на границе интервала аппроксимации кривых упрочнения $\varepsilon_e^* \leq 0,7$. Эффективная деформация для варианта *MPL2* в центре заготовки, равная $\varepsilon_{ef} = 0,755$ при давлении с коротким фронтом $t^* = 0,1$ и $\varepsilon_{ef} = 0,763$ при давлении с фронтом $t^* = 0,5$, отличается от варианта для *MPL1* на 6 % при $t^* = 0,1$ и 11 % при $t^* = 0,5$. Так как при испытании на растяжение образцов в большинстве металлов для границы интервала аппроксимации выполняется условие $\varepsilon_e^* \leq 0,4$, то можно ожидать еще большей величины погреш-

ности расчета. На фланцевой части заготовки расхождение результатов может достигать 20 %.

Также выполнено сравнение результатов расчетов вариантов *MPL1* и *MPL3*, проведенных при постоянстве границы диапазона инженерной деформации ε_e^* , в котором осуществлялась аппроксимация, но при разных способах задания динамического упрочнения. Погрешность расчета для менее точного варианта расчета *MPL1* с использованием постоянного коэффициента динамичности имеет погрешности примерно 2,5 % при $t^* = 0,1$ и 1,4 % при $t^* = 0,5$. С учетом более простого способа задания динамического упрочнения такие погрешности вполне допустимы при инженерных расчетах.

Заключение

С использованием КЭ комплекса LS-DYNA 971 исследовано влияние вариантов задания параметров модели *MAT_POWER_LAW_PLASTICITY* на по-



грешность расчета эффективной деформации в характерных точках листовой заготовки в условиях свободной ЭГИ вытяжки-формовки. Установлено, что при использовании кривой квазистатического деформационного упрочнения, полученной на основе испытаний образцов на растяжение, расхождение результатов расчетов по сравнению с кривой упрочнения, полу-

ченной многократной прокаткой, может превышать 10 %, а на фланцевой части заготовки может даже достигать 22 % и более. Показано, что учет динамического упрочнения постоянным коэффициентом динамичности дает погрешность расчета порядка 2,5 % по сравнению с использованием функциональной зависимости Cowper-Symonds.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Здор Г.Н., Исаевич Л.А., Качанов И.В. Технологии высокоскоростного деформирования материалов. Минск: БНТУ, 2010. 456 с.
2. Тараненко М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы. Харьков: Изд-во ХАИ, 2011. 272 с.
3. Чачин В.Н. Листовая штамповка с использованием импульсных нагрузок. Киев: УМК ВО, 1989. 108 с.
4. Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006. 498 p.
5. Mamutov, A.V., Mamutov, V.S. Finite element simulation of sheet metal forming using LS-DYNA code // Proceedings of SPIE. 2005. Vol. 6253. P. 0G1–0G4.
6. Головащенко С.Ф., Мамутов А.В., Мамутов В.С. Методика компьютерного моделирования электрогидроимпульсного формоизменения тонколистовых металлов с применением программного комплекса LS-DYNA 971 // Металлообработка: научно-производственный журнал. 2012. № 3(69). С. 23–29.
7. Мамутов А.В., Мамутов В.С. Моделирование электрогидроимпульсной листовой формовки с применением комплекса LS-DYNA // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 1(190). С. 101–107.
8. Mamutov V.S., Zdor G.N. Mechanics of loading and deforming of thin-sheet blank at electro-hydraulic forming // International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.). 2017. Vol. 11. No 5. P. 332–336.
9. Mamutov A.V., Mamutov V.S., Matveev S.A. Finite element modeling of shell wrinkling in impulse drawing of thin sheet metal // Proceedings of SPIE. 2004. Vol. 5400. P. 240–243.
10. Арсентьева К.С. Складкообразование при импульсной и квазистатической вытяжке-формовке тонколистовых деталей // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 1. С. 190–199. DOI: 10.18721/JEST.230119.
11. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1976. 488 с.
12. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1971. 782 с.
13. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. 224 с.
14. Вагин В.А., Здор Г.Н., Мамутов В.С. Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов. Минск: Наука и техника, 1990. 208 с.
15. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // Eng. Fract. Mech. 1985. Vol. 21. No 1. P. 31–48.
16. 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 — аспирант 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: 13.12.2017

REFERENCES

- [1] **Zdor G.N., Isaevich L.A., Kachanov I.V.** Tekhnologii vysokoskorostnogo deformirovaniia materialov. Minsk: BNTU, 2010. 456 s. (rus.)
- [2] **Taranenko M.E.** Elektrogidravlicheskaia shtampovka: teoriia, oborudovanie, tekhnoprotsessy. Khar'kov: Izd-vo KhAI, 2011. 272 s. (rus.)
- [3] **Chachin V.N.** Listovaia shtampovka s ispol'zovaniem impul'snykh nagruzok. Kiev: UMK VO, 1989. 108 s. (rus.)
- [4] **Hallquist J.O.** LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, SA, 2006. 498 p.
- [5] **Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Finite element simulation of sheet metal forming using LS-DYNA code. *Proceedings of SPIE*. 2005. Vol. 6253. P. 0G1–0G4.
- [6] **Golovashchenko S.F., Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Metodika komp'iuternogo modelirovaniia elektrogidroimpul'snogo formoizmeneniia tonkolistovykh metallov s primeneniem programmnogo kompleksa LS-DYNA 971. *Metalloobrabotka: nauchno-proizvodstvennyi zhurnal*. 2012. № 3(69). С. 23–29. (rus.)
- [7] **Mamutov V.S., Shaposhnikov I.A.** Experimental estimation of efficacy of coil systems for electromagnetic stamping by polyurethane. *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 1(190)(2014) 101–107. (rus.)
- [8] **Mamutov V.S., Zdor G.N.** Mechanics of loading and deforming of thin-sheet blank at electro-hydraulic forming. *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)*. 2017. Vol. 11. No 5. P. 332–336.
- [9] **Mamutov A.V., Mamutov V.S., Matveev S.A.** Finite element modeling of shell wrinkling in impulse drawing of thin sheet metal. *Proceedings of SPIE*. 2004. Vol. 5400. P. 240–243.
- [10] **Arsentyeva X.S.** Wrinkling issues in thin sheet metal during impulse and quasi-static metal forming, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 23(1)(2017) 190–199. DOI: 10.18721/JEST.230119. (rus.)
- [11] **Polukhin P.I., Gun G.Ia., Galkin A.M.** Soprotivlenie plasticheskoi deformatsii metallov i splavov. M.: Metallurgii, 1976. 488 s. (rus.)
- [12] **Romanovskii V.P.** Spravochnik po kholodnoi shtampovke. L.: Mashinostroenie, 1971. 782 s. (rus.)
- [13] **Tret'iakov A.V., Ziuzin V.I.** Mekhanicheskie svoistva metallov i splavov pri obrabotke davleniem. M.: Metallurgii, 1973. 224 s. (rus.)
- [14] **Vagin V.A., Zdor G.N., Mamutov V.S.** Metody issledovaniia vysokoskorostnogo deformirovaniia metallov. Minsk: Nauka i tekhnika, 1990. 208 s. (rus.)
- [15] **Johnson G.R., Cook W.H.** Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Eng. Fract. Mech.* 1985. Vol. 21. No 1. P. 31–48.
- [16] **Mamutov V.S., Mamutov A.V.** Teoriia obrabotki metallov davleniem. Komp'iuternoe modelirovanie protsessov listovoi shtampovki. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006. 188 s. (rus.)

AUTHORS

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

E-mail: xenia.ars@gmail.com

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

E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

Received: 13.12.2017