XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Материалы межвузовской научной конференции. Ч. IV: С 39-40, 2002.

УДК 623.983:539.3

Ю.В. Чистякова (6 курс, каф. МиТОМД),
В.С. Мамутов, д.т.н., проф., И.А. Шапошников, к.т.н., доц.

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ШТАМПОВКИ

Несмотря на увеличение быстродействия вычислительной техники, применение многопроцессорных ЭВМ компьютерные расчеты высокоскоростного формоизменения металлов, связанные с решением неодномерных нелинейных смешанных задач математической физики, требуют значительных затрат времени. При этом речь может идти о десятках часов или даже дней для одного расчетного варианта. При проектировании оптимальных технологий высокоскоростной штамповки требуется информация по десяткам вариантов расчетов. Поэтому целесообразно при помощи сложной компьютерной модели, методов планирования эксперимента, методов теории подобия и размерностей, методов регрессионного анализа получать удобные для практического применения формулы расчета параметров процесса. Однако компьютерный эксперимент и его обработка имеют ряд особенностей по сравнению с физическим или технологическим экспериментом. Важной особенностью является возможность добиться полноты независимых размерных или безразмерных факторов в рамках рассматриваемой теоретической модели.

В качестве примера рассмотрен процесс высокоскоростного формоизменения тонколистовой заготовки, закрепленной по прямоугольному контуру. Рассматривалось влияние параметров процесса нагружения, геометрии заготовки и характеристик ее материала на среднюю $(\varepsilon_i)_{cp}$ и максимальную интенсивность тензора логарифмических деформаций $(\varepsilon_i)_{max}$:

$$\eta_1=(\varepsilon_i)_{cp} = [\iint\limits_{s_1 s_2} \varepsilon_i(s_1,s_2)\,ds_1 ds_2\,]/(L_{x1}L_{x2}),$$

$$\eta_2=(\varepsilon_i)_{max} = \max_{s_1,s_2} \varepsilon_i(s_1,s_2)\,.$$

В этих выражениях S_1, S_2 - лагранжевы координаты точек заготовки, $Lx1$, $Lx2$ - длины сторон прямоугольника, по которому закреплена заготовка.

На значения $(\varepsilon_i)_{cp}$, $(\varepsilon_i)_{ma}$ влияют следующие параметры процесса нагружения, геометрии заготовки и характеристики ее материала: меньшая сторона прямоугольного контура закрепления заготовки $\lambda_1 = L_{x1}$; большая сторона прямоугольного контура закрепления заготовки $\lambda_2 = L_{x2}$; толщина материала заготовки $\lambda_3 = h_0$; прогиб центра заготовки $\lambda_4 = x_3(0, 0)$; параметры кривой деформационного упрочнения $\lambda_5 = B$ и $\lambda_6 = m$; показатель скоростного упрочнения материала (по формуле Рейто) $\lambda_7 = m_1$; модуль продольной упругости материала заготовки $\lambda_8 = E$; коэффициент Пуассона материала заготовки $\lambda_9 = \nu$; плотность материала заготовки $\lambda_{10} = \rho$; амплитуда импульса давления $\lambda_{11} = p_0$; длительность импульса давления $\lambda_{12} = T$.

Задачей данного компьютерного эксперимента являлось получение зависимостей: $\vec{\eta}=\vec{\eta}(\vec{\lambda})$, где $\vec{\eta} \Leftrightarrow (\eta_1, \ldots, \eta_2)$ - вектор параметров отклика, $\vec{\lambda} \Leftrightarrow (\lambda_1, \ldots, \lambda_{12})$ - вектор независимых параметров. Не все параметры в пределах их изменения в реальных технологических процессах высокоскоростного формоизменения тонколистовой заготовки одинаково влияют на вектор отклика. Поэтому перед численным экспериментом имеет смысл уменьшить количество независимых параметров методами теории подобия и размерностей. Это позволит также получить общие результаты.

Использование формулы Рейто можно заменить применением постоянного скоростного коэффициента, определяемого соотношением

$$K_d = (\varepsilon_{ic} / \varepsilon_{i0})^{m_1},$$

где $\varepsilon_{ic} \in [10^3, 10^4]\ c^{-1}$ скорость деформаций в условиях высокоскоростной штамповки $\varepsilon_{ic} = 10^{-4}\ c^{-1}$ - стандартная скорость деформаций при статических испытаниях на прессе Гагарина. Подставив в формулу Рейто $\varepsilon_{ic} = 5 \cdot 10^3\ c^{-1}$, можно получить конкретное значение параметра аппроксимации динамической кривой деформационного упрочнения материала заготовки:

$$B_d = K_d B = (\varepsilon_{ic} / \varepsilon_{i0})^{m_1} B,$$

где B - параметр аппроксимации статической кривой упрочнения материала заготовки, который можно использовать в математическом эксперименте вместо двух параметров λ_5 и λ_7 в наборе факторов, представленных выше. Аналогичным образом можно поступить с упругими параметрами E, ν, которые для основных штампуемых металлов (медные сплавы, алюминиевые сплавы, никелевые сплавы, стали) варьируются в пределах $E \in [60, 120]$ *ГПа*, $\nu \in [0.25, 0.4]$. Данные параметры сказываются на процессе деформирования при разгрузке. Их влияние на активной стадии незначительно, и поэтому в эксперименте их величины фиксировались на некотором среднем уровне $E = 100$ *ГПа*, $\nu = 0.3$.

В качестве независимых факторов предложены следующие пять безразмерных комплексов:

- относительная ширина контура закрепления заготовки $\xi_1 = L_{x1} / L_{x2}$;
- показатель степени деформационного упрочнения материала заготовки $\xi_2 = m$;
- относительный прогиб заготовки $\xi_3 = \max\limits_{S_1,S_2} [x_3(s_1,s_2)/(L_{x1}/2)]$,
- относительная амплитуда давления $\xi_4 = p_0 \cdot L_{x1} / B_d \cdot h_0$,
- относительное время нагружения заготовки $\xi_5 = T/[L_{x1}/(B_d/\rho)^{1/2}]$.

Правильность выбора предлагаемых безразмерных параметров можно оценить инвариантностью решения $\vec{\eta} = \vec{\eta}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5)$ в исходном пространстве размерных параметров $\{\vec{\lambda}\}$. Для этого взяты два набора размерных параметров $\vec{\lambda}_1$ и $\vec{\lambda}_2$, соответствующие одинаковому вектору $\vec{\xi}$:

- вариант $\vec{\lambda}_1$: $Lx1 = 20$ *мм*, $L_{x2} = 30$ *мм*, $h_0 = 1$ *мм*, $B_d = 74$ *МПа*, $m = 0.44$, $\rho = 8500$ *кг/м*^{3}, $p_0 = 50$ *МПа*, $T = 50$ *мкс*;
- вариант $\vec{\lambda}_2$: $L_{x1} = 80$ *мм*; $L_{x2} = 120$ *мм*; $h_0 = 0.5$ *мм*; $B_d = 1480$ *МПа*; $m = 0.44$; $\rho = 2000$ *кг/м*^{3}; $p_0 = 12.5$ *МПа*; $T = 68.6$ *мкс*.

Компоненты вектора $\vec{\xi}$ при этом равнялись: $\xi_1 = 0.66667$; $\xi_2 = 0.44$; $\xi_4 = 1.35135$; $\xi_5 = 0.73765$. Величина параметра ξ_3 задавалась при численном решении на фиксированных уровнях с интервалом 0.05. В результате численных расчетов значения параметров отклика для двух вариантов расчета с разными исходными размерными данными $\vec{\lambda}_1$ и $\vec{\lambda}_2$, соответствующие одинаковому вектору $\vec{\xi}$ безразмерных параметров, совпадают в пределах трех-пяти значащих цифр.

Выводы:

1. Инвариантность решений $\vec{\eta} = \vec{\eta}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5)$ в исходном пространстве размерных параметров $\{\vec{\lambda}\}$ позволяет говорить о полноте комплекса безразмерных параметров и правильности выбора их вида.
2. Методика позволяет осуществлять косвенную оценку корректности численного решения с применением методов теории подобия и размерностей.