

УДК 621.983.044: 620.1

А.В. Мамутов (асп., каф. МиТОМД)

ДИАГРАММЫ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ТОНКОЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВЫТЯЖКЕ-ФОРМОВКЕ ПОЛИУРЕТАНОМ

В современном мелкосерийном листоштамповочном производстве вытяжка-формовка тонколистовых материалов полиуретаном является одним из эффективных способов изготовления сложных по форме, точных деталей за счет низкой себестоимости изделий и сжатых сроков подготовки производства. Импульсный характер нагружения и высокоскоростное деформирование, например при магнитно-импульсной штамповке, способствуют увеличению точности за счет уменьшения пружинения, а также дают возможность осуществлять формообразующие операции в условиях более высоких уровней критических деформаций по сравнению с квазистатической штамповкой на традиционном кузнечно-прессовом оборудовании.

Оценка предельных деформаций тонколистовой вытяжки-формовки обычно осуществляется по диаграммам Келера-Гудвина, определяющим зависимость критической величины первой главной логарифмической деформации ε_1 от значения второй главной деформации ε_2 или от отношения деформаций $\alpha = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$. Проблемой расчетов процессов высокоскоростной вытяжки-формовки полиуретаном тонколистовых материалов является практическое отсутствие в литературе данных по диаграммам предельных деформаций. Нет также описания методик их получения. Поэтому целью данной работы являлась разработка методики экспериментального получения динамической диаграммы предельных деформаций и апробирование полученной методики для ряда тонколистовых металлов, используемых при изготовлении заводских деталей.

Исследовались особенности разрушения тонколистовых материалов в условиях квазистатической и высокоскоростной осесимметричной формовки, когда разрушение сопровождается пластической неустойчивостью. Эксперименты проводились для меди М1, латуни Л68 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 0.1...0.5 мм. Размеры экспериментальной оснастки выбирались таким образом, чтобы в условиях импульсного нагружения обеспечить высокую скорость деформаций при распределении компонент тензора логарифмических деформаций вдоль образующей заготовки, как при квазистатическом формоизменении. Это необходимо, чтобы эффекты пластических волн в заготовке не влияли на механику разрушения заготовки. Степень квазистатичности деформированного состояния определялась отношением средней интенсивности деформаций при высокоскоростном (d) и квазистатическом (c) деформировании при одинаковом прогибе центральной точки заготовки:

$$\eta_\varepsilon = \left[\int_0^{R_0} \varepsilon_i^d(r_0) dr_0 \right] / \left[\int_0^{R_0} \varepsilon_i^c(r_0) dr_0 \right].$$

Наибольшее влияние на параметр η_ε оказывает безразмерная длительность импульса давления:

$$\xi_T = 0.5T(\sqrt{B/\rho}) / R_m,$$

где T - длительность давления, действующего на заготовку; B - параметр степенной аппроксимации кривой упрочнения; R_0 - радиус заготовки; R_m - радиус очага матрицы. Размеры опытной оснастки были выбраны таким образом, чтобы длительности импульса давления в эластичной среде $T \cong 400...500$ мкс соответствовало значение безразмерного времени $\xi_T \cong 7...9$, что обеспечивало выполнение условия $|\eta_\varepsilon - 1| < 0.02...0.03$. Скорость деформации при этом находилась в пределах $d\varepsilon_i/dt \in [10^3...10^4] \text{ c}^{-1}$.

Сравнением квазистатического и высокоскоростного вариантов нагружения заготовки установлено, что особенностью разрушения заготовки при квазистатической нагрузке полиуретаном является высокая скорость деформаций, характерная для процессов высокоскоростной штамповки. Скорость деформации при пластической неустойчивости имела порядок:

$$d\varepsilon_i/dt \cong (\varepsilon_i^+ - \varepsilon_i^-)/T^* \cong 10^3 \dots 10^4 \text{ c}^{-1},$$

где $\varepsilon_i^- = \ln(h_0/h^-)$, h^- - интенсивность деформаций и толщина, предшествующие пластической неустойчивости; $\varepsilon_i^+ = \ln(h_0/h^+)$, h^+ - интенсивность деформаций и толщина после нарушения сплошности. Это в значительной степени объясняет обнаруженный для исследованных материалов эффект, заключающийся в том, что критические деформации разрушения ε_i^+ при квазистатических и высокоскоростных испытаниях близки в пределах доверительного интервала опытных данных. За счет ограниченной энергии, сообщаемой технологической системе при импульсном нагружении, путем частичного использования резерва пластичности, соответствующего этапу пластической неустойчивости, можно без нарушения сплошности приблизиться к деформации разрушения ε_i^+ , что невозможно при квазистатическом нагружении. Этим в значительной степени определяется увеличение критического прогиба при импульсном нагружении по сравнению с квазистатическим.

Близость величин ε_i^+ (также ε_i^-) при квазистатическом и импульсном нагружении полиуретаном для исследованных материалов позволяет получать динамическую диаграмму разрушения тонколистовых материалов на гидравлическом прессе. Такие экспериментальные зависимости по типу диаграмм Келера (правая часть диаграммы Келера-Гудвина) в координатах главных логарифмических деформаций $\varepsilon_i^+ = f(\alpha)$, где $\alpha \in [0 \dots 1]$, получены для указанных выше материалов. Испытания проводились для круглой в плане заготовки ($\alpha = 1$) и при формовке заготовки, закрепленной по прямоугольному контуру, что обеспечивало вариацию отношения главных деформаций в пределах $\alpha \in [0 \dots 1]$. Величина α в зависимости от соотношения сторон прямоугольника b и l в диапазоне $\alpha \in [0.5 \dots 1.0]$ определялась по формуле, полученной из численного решения краевой задачи квазистатического формоизменения тонколистовой заготовки с закрепленным по прямоугольнику контуром. Статистическая обработка результатов компьютерного эксперимента, проведенного по плану полного факторного эксперимента 5×6 , в котором параметры l/b и m варьировались в следующих диапазонах: $l/b \in [1, 3]$, $m \in [0.25, 5.0]$, позволила получить с погрешностью аппроксимации около 3 % искомую зависимость в виде:

$$(\varepsilon_2/\varepsilon_1)_c = 1 - 1.546 \cdot (1 - b/l)^{0.931} \cdot m^{0.114}.$$

Полученные диаграммы предельных деформаций использованы совместно с расчетными методиками при проектировании технологий изготовления реальных заводских деталей оптических приборов из тонколистовых материалов.

Выводы. Установлено, что в условиях пластической неустойчивости при квазистатическом формоизменении тонколистовой заготовки полиуретаном скорости деформации имеют порядок $10^3 \dots 10^4 \text{ c}^{-1}$, что характерно для процессов импульсной штамповки. Данная особенность использована для разработки методики получения диаграмм предельных деформаций тонколистовых материалов для процесса высокоскоростной вытяжки-формовки. Получены диаграммы предельных деформаций для меди М1, латуни Л68 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной $0.1 \dots 0.5 \text{ мм}$, которые использованы при проектировании технологий изготовления реальных заводских деталей оптических приборов из тонколистовых материалов.