

УДК 621.7.044.2

Драгобецкий В. В.  
Троцко О. В.  
Шлык С. В.

## РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СЛОЖНОЙ ВЫТЯЖКИ

В настоящее время для расчета нестационарных течений упругопластических сред с дислокационной кинетикой неупругого деформирования используется метод прямых.

Преимущества метода связаны с возможностью выявления перехода частиц деформированного материала из упругого состояния в пластическое, связанное с использованием лагранжевых координат. Однако метод не позволяет учесть изменение толщины заготовки в процессе деформирования, потерю устойчивости.

Для решения упругопластических задач деформирования, в том числе и динамических, используется схема предложенная П. Лаксом и Б. Вендрофом. Схема эффективна для решения гиперболических систем записанных в дивергентной форме, в частности, уравнений движения (уравнений равновесия) сплошной среды. Решение в каждый момент времени определяется в виде ряда Тейлора по степеням приращения времени. В расчетной схеме М. Уилконона [1] расчетная область заменяется четырехугольной сеткой, которая движется вместе материалом. Для построения разностных аналогов частных производных по координатам пользуются формулой Грина, устанавливающей связь между двойным интегралом по плоской области деформируемого тела и криволинейным интегралом по границе тела. Эти схемы расчета также имеют вышеуказанные недостатки.

Наиболее предпочтительны дискретные математические модели упругопластического деформирования, у которых заготовка заменяется физическими элементами с точкой приведения [2, 3]. Т. е. используется узловая схема, в которой все искомые величины определены в узловых точках расчетной сетки.

Целью работы является уточнение моделей упругопластического деформирования плоских листовых заготовок и адаптация методов расчета процесса сложной вытяжки для определения ее технологических параметров.

При математическом моделировании процесса вытяжки, в рамках безмоментной теории оболочек, в ряде случаев радиус скругления кромок матрицы не учитывается [1, 2]. В теории листовой штамповки скругления кромки матрицы приводят к приращению меридионального напряжения на участке заготовки, прилегающем к скругленной кромке вытяжной матрицы. Расчетная величина реакции матрицы на радиус округления учитывается действием перерезывающих (нормальных) и касательных усилий на заготовку. В действительности составляющая реакции радиуса скругления кромки матрицы на вертикальную ось штампа с проекцией усилия вытяжки на ту же ось создает крутящий момент  $M_B$ , который известных авторам методах расчета процесса вытяжки не учитывается. Наличие реактивного момента  $M_B$ , приводит к активации перемещения фланца заготовки.

Следует также отметить, что при вытяжке сложных деталей необходимо увеличивать сопротивление фланца путем применения системы перетяжных ребер и порогов. В методах расчета сопротивление фланца на радиусе закругления матрицы учитывают путем приложения к узловым точкам усилий контактного трения [1]. Как правило, расчетное перемещение заготовки дает плавное обтекание радиуса скругления матрицы. В реальных условиях происходит вырывание фланца заготовки и образование наплывов. Причем, чем дальше точки заготовки, обтекающие радиус скругления матрицы находятся от точки приложения равнодействующей давления пуансона на заготовку, тем наплывы больше. Известные методы численного моделирования это не улавливают. Это объясняется тем, что при давлении пуансона на заготовку и при контакте последней с поверхностью радиуса закругления матрицы возникает

реактивный момент, который «выдерживает» фланец заготовки из-под прижима. Поэтому при соприкосновении узла моделируемой заготовки с поверхностью радиуса скругления матрицы необходимо прикладывать к узлу реактивное усилие, действующее на заготовку со стороны поверхности матрицы. Кроме того, если штампуемая деталь имеет местные выштамповки, пуклевки, вырезы и т. д., то и в этом случае возникают дополнительные изгибающие моменты, действующие на элементы заготовки. При использовании уравнения равновесия в расчетной модели усилия уравнений моментов для каждого узла заготовки необходимо дополнить моментами кручения.

На практике компенсировать действие этих моментов кручения возможно при штамповке или с использованием эластичных сред, или при дополнительном нагружении заготовки на радиусе скругления матрицы со стороны пуансона, или путем создания противодействия на заготовку со стороны проема матрицы.

Несколько замечаний об изменении толщины заготовки в процессе сложной вытяжки. Изменение толщины заготовки в конечном итоге определяется на основании закона сохранения объема элементарной ячейки при выполнении условия несжимаемости материала:

$$\delta_{mn}^k = \delta_{mn}^o \left( \frac{A_{mn}^o}{A_{mn}^k} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где  $\delta_{mn}^o$  – начальная толщина слоя;

$m, n$  – нумерация узлов заготовки;

$k$  – количество слоев;

$A_{mn}^o, A_{mn}^k$  – метрические тензоры.

В некоторых случаях, когда в процессе формоизменения и по характеру деформирования заготовки (особенно толстолистовой) не избежать удара последней о поверхность матрицы возникает необходимость учета инерционных сил. А т. к. характер сил массовый, то при ударе заготовки о поверхность матрицы в каждом его сечении, а при использовании слоистой модели – слое, динамические напряжения будут разными.

В слое, прилегающем к деформирующему инструменту они минимальны, а у наиболее удаленного слоя максимальны. В этом случае необходимо учитывать массу заготовки при сосредоточении ее не в узлах приведения [1], а с разбиением узла приведения по каждому слою. В момент соударения масса наиболее удаленного слоя суммируется и равна общей массе заготовки в узле приведения слоя. Масса последующих слоев равна сумме масс предыдущих. Такая схема объясняет механизм интенсивного течения материала заготовки в угловые зоны в процессах импульсного и ударного деформирования.

Наиболее эффективным методом решения задач упругопластического деформирования оболочек является метод граничных элементов, позволяющий наиболее точно определить контуры исходной заготовки, усилия, напряжения и критические напряжения потери устойчивости [2].

Общий способ приведения процесса сложной вытяжки для получения деталей с разрезами и местными выштамповками основан на моделировании заданной оболочки сплошной оболочкой, которая не имеет локальных изменений формы ее контура. В этом случае по контуру разрезов (берегам разрезов) необходимо сосредоточить источники напряжений, обуславливающие скачки перемещений и углы поворота, а в локальных выштамповках – углы поворота. Компоненты линейных и сдвиговых деформаций  $\varepsilon_{ij}^L, \gamma_{ij}^L$ , обусловленные этими источниками напряжений, выражаются через сосредоточенные на контурах функционалы. Плотности функционалов представляют собой комбинации скачков перемещений и углов поворота, которые подставляются в разрешающие дифференциальные уравнения. Считается, что для деформируемой заготовки под действием внешней нагрузки по берегам разрезов

и выштамповок прикладываются усилия и моменты. Задачу о действии дополнительной нагрузки на места разреза (пробивки) и локальные выштамповки можно свести к задаче о действии дополнительного нагружения на места разреза в сплошной полой оболочке. Напряженное состояние представим в виде суммирования последовательных наложений основного напряженного состояния заготовки, вызванного внешней нагрузкой в сплошной полой оболочке, и возмущенного, вызванного наличием разрезов и выштамповок. Усилия и моменты в рассматриваемой заготовке представим в виде:

$$\begin{aligned} N_{\alpha}^{j+1} &= N_{\alpha}^j + N_{\alpha}; \\ Q_{\alpha\beta}^{j+1} &= Q_{\alpha\beta}^j + Q_{\alpha\beta}; \\ L_{\alpha}^{j+1} &= L_{\alpha}^j + L_{\alpha}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $N_i, Q_{\alpha\beta}, L_{\alpha}$  – усилия и моменты в рассматриваемой заготовке;

$\alpha = 1, 2$ ;

$j$  – номер итерации;

$\beta = 1, 2$ .

Необходимо учитывать, что берега возмущения (разрезы, выштамповки) нагружены одинаковыми по значению и противоположными по направлению усилиями и моментами.

В соответствие рассматриваемой с возмущениями оболочке ставим идентичную сплошную пологую оболочку с сосредоточенными на месте разрезов внутренними источниками (стоками) напряжений (дислокациями и дисалинациями). Плотность этих источников (стоков) по контуру возмущений совпадает с напряженно-деформированным состоянием в рассматриваемой оболочке. При этом усилия и моменты сохраняют непрерывность в произвольной точке заготовки, а функции, которые описывают перемещения  $u_{\alpha}$  ( $\alpha = 1, 2, 3$ ) и углы поворота  $\beta$  ( $\beta = 1, 2$ ) могут претерпевать скачки при переходе через контур возмущений.

В случае плоской задачи с системой криволинейных возмущений наряду с базисной системой координат  $X_1 O X_2$  введем в каждом возмущении локальную систему координат  $X_1^m O_m X_2^m$ . На основании зависимостей, связывающих компоненты деформаций в рассматриваемой заготовке с компонентами деформации ее срединной поверхности [1, 4], уравнения, связывающие деформации и напряжения: в упругой области обобщенный закон Гука, в пластической – теория течения, можно записать в локальной системе координат компоненты усилий и моментов в любой точке оболочки, вызванные произвольным распределением скачков перемещений и углов поворота по контуру возмущения  $K_m$ . Выполнив требования, так что суммарные усилия и моменты соответствовали заданным на каждом возмущении условиям (2), будем иметь систему сингулярных уравнений для определения неизвестных параметров процесса.

Предложенный метод расчета был использован для расчета контуров исходных заготовок процесса сложной вытяжки кузовных деталей автомобилей нового семейства КрАЗ (рис. 1).

Использование результатов расчета позволило практически исключить доводку геометрии исходной заготовки и геометрических параметров штампов.

В дальнейшем предполагается применение метода расчета для определения напряженно-деформированного состояния деформируемой заготовки:

- в случае возникновения трещины;
- для заготовки фланец, который имеет полукруглые вырезы;
- для заготовки имеющей технологические вырезы.

В первом случае возникновение трещины связано с использованием некачественной листовой стали, при формоизменении которой образуются трещины. В полученной детали трещину заваривают и используют деталь для дальнейшего производства.

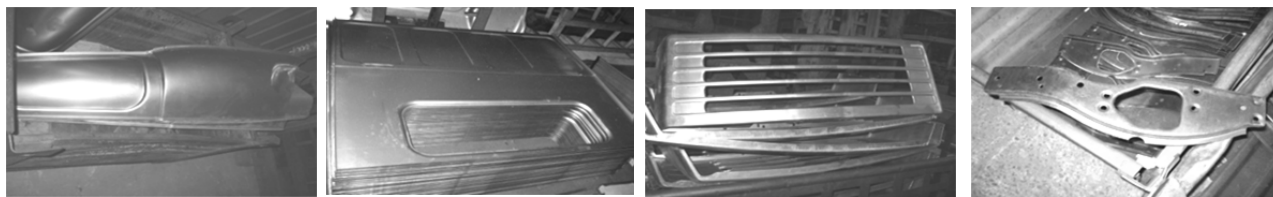


Рис. 1. Кузовные детали автомобилей семейства КраЗ

Применение метода во втором и третьем случае связано с использованием перспективных способов повышения качества штампуемых автокузовных деталей [3].

### ВЫВОДЫ

Произведено уточнение и расширение математических моделей напряженно-деформированного состояния и расчета технологических параметров процесса формоизменения при сложной вытяжке, унификация относительно различной конфигурации деталей с локальными вырезами и выштамповками, которые выполнены путем учета реактивных крутящих моментов, интенсифицирующих течение фланцевой части заготовки из под прижима, и ударных нагрузок на заготовку на заключительной стадии деформирования.

Предложен метод исследования влияния на напряженное состояние и конечные деформации при сложной вытяжке и наличии локальных изменений поверхности деталей в виде вырезов и выштамповок (ребер жесткости, пуклевки и т. д.), который основан на наложении решений, полученных методом конечных разностей для сплошной пологой оболочки с последующим приведением задачи упругопластического деформирования к сингулярным интегральным уравнениям. Данный метод позволяет уточнить геометрию исходной заготовки и выявить наиболее эффективные методы торможения фланца заготовки.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Повышение прочностных характеристик листовых деталей путем их взрывного формообразования с оптимизацией параметров технологического процесса* / В. К. Борисевич, С. Н. Солодянкин, В. П. Сабелькин, В. И. Исаенко // *Проблемы прочности*. – 1980. – № 9. – С. 113–116.
2. *Кузьменко В. И. Решение на ЭВМ задач пластического деформирования* / В. И. Кузьменко, В. Ф. Балакин. – К. : Техника, 1990. – 136 с.
3. *Жарков В. А. Анализ процессов вытяжки деталей сложной формы из листовых материалов* // В. А. Жарков, Г. Л. Тетери // *Известия вузов*. – 1983. – № 10. – С. 64–66.
4. *Троцко О. В. Метод расчета оптимального процесса формоизменения листовых деталей вагонных конструкций* / О. В. Троцко // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського*. – Кременчук, 2008. – № 1(48), ч. 2. – С. 40–44.

Драгобецкий В. В. – д-р техн. наук, проф. КрНУ;

Троцко О. В. – канд. техн. наук, доц. КрНУ;

Шлык С. В. – аспирант КрНУ.

КрНУ – Кременчугский национальный университет им. М. Остроградского, г. Кременчуг.

E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 05.03.2012 г.