

*Л.В.АВТОНОМОВА*, канд.техн.наук; *С.М.ДЕРГУН*;  
*В.И.ЛАВИНСКИЙ*, докт.техн.наук; *С.И.ПАНАСЕНКО*; НТУ «ХПИ»

## **ПРЕДЕЛЬНЫЕ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ВЫТЯЖКЕ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА**

Надана методика оцінки граничного тиску для формоутворення сферичної витяжки заданої глибини в тонкій пластині під дією рівномірного тиску. Кількісні дані приведені для пластин з кузовних автомобільних сталей.

The method of estimation of maximum pressures for creation of spherical extraction of the given depth in a lamina under action of the even pressure is given. Quantitative information is resulted for plates from basket motor-car steels.

**1. Введение.** Современное состояние машиностроения характеризуется широким использованием тонкостенных элементов в конструкциях. В частности, автомобилестроение уже невозможно представить без применения тонкостенных кузовных элементов. Повышение жесткости таких пластинчатых оболочечных элементов достигается за счет создания технологических вытяжек разнообразных форм или введения ребер жесткости. При ремонтных и восстановительных операциях кузовных элементов современных автомобилей большое значение приобретает достоверная информация о возможностях традиционных технологических процессов, использующих методы пластической обработки материалов. Одним из основных параметров в таких операциях является создание необходимых по величине давлений для формообразования вытяжек различных конфигураций. Достоверное определение требуемых уровней давлений при вытяжке даже простых форм невозможно без корректной информации о прочностных и пластических свойствах материала.

В настоящей работе предпринята попытка разработки методики оценки предельных по величине давлений для создания сферической по форме вытяжки. Вытяжка заданной глубины формируется в тонкой пластинчатой заготовке из специальной стали, применяемой в автомобилестроении для производства кузовных элементов. На основе результатов анализа разработанной механико-математической модели процесса вытяжки (штамповки) сферической лунки заданного радиуса в плоском стальном листе получены медианные зависимости предельных давлений от глубины лунки в заданном доверительном интервале, определяемом по случайным отклонениям физико-механических свойств материала.

**2. Механико-математическая модель.** Расчетная модель процесса штамповки сферической лунки радиуса  $R$  и максимальной глубины  $w$  в плоском стальном листе толщиной  $t$  схематично приведена на рис. 1. К круглой

листовой заготовке, которая на наружном радиусе обжата двумя массивными кольцами, прикладывается квазистатическое равномерное давление  $P(r) = p$ . Прижимные кольца закреплены в направляющих пресс-формы.

Сформированная расчетная модель процесса вытяжки отвечает условиям математической модели структурно связанных технологических систем. Основные принципы создания таких моделей описаны в работе [1].

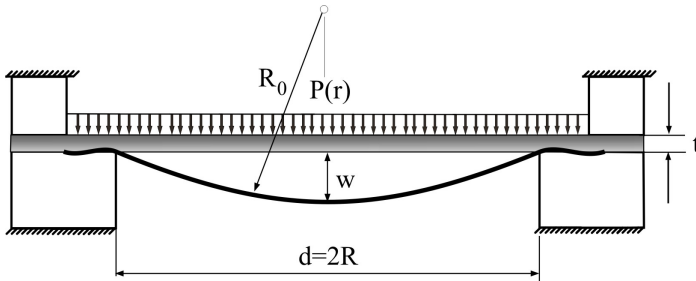


Рисунок 1 – Расчетная модель сферической вытяжки

Сила прижима заготовки в кольцах определяется из решения соответствующей смешанной контактной задачи для структурно связанных систем с использованием исследовательского программного комплекса SPACE-T [2,3]. Эффекты проскальзывания в опорных элементах наблюдаются при значительных прогибах заготовки, соизмеримых с ее размерами в плане ( $R/w > 1,5$ ). Отметим, что требуемые значения сил прижима опорных колец позволяют в рассматриваемом случае использовать мобильные нагрузочные устройства, что весьма важно при ремонтных работах.

Использование обобщенных математических моделей структурно связанных технологических систем является целесообразным при определении параметров вытяжки сложных форм, требующих использования несимметричных матриц и реализации достаточно непростых законов распределений давлений по поверхности листовой заготовки.

В случае анализа условий вытяжки осесимметричной формы введем упрощающие предположения, позволяющие достаточно просто оценить в физическом плане влияние реальных механических свойств материала на процессы пластического течения при формообразовании. При определении предельного давления для формообразования в тонкой пластине сферической лунки заданной глубины  $w$  примем, что форма лунки – сфера радиуса  $R_0$  (рис. 2).

Кроме этого примем, что влияние эффектов контактных взаимодействий в граничных закреплениях заготовки незначительно. Так как толщина пластинки  $t$  является достаточно малой величиной  $t/R \leq 0,1$ ;  $t/R_0 \leq 0,1$  по сравнению с радиусом сферической лунки  $R_0$  и радиусом круглой заготовки диаметром  $2R$ , то при рассматриваемых законах нагружения с высокой степенью достоверности можно принять закон равномерного распределения напряже-

ний по толщине заготовки. Другими словами, можно считать напряженное состояние при вытяжке безмоментным.

Кроме этого, предполагаем, что выполняются условия простого нагружения, приводящие к известным условиям деформационной теории пластичности.

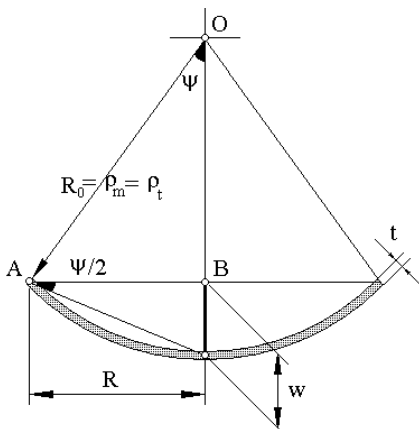


Рисунок 2 – Геометрическая схема

**3. Основные уравнения состояния.** При принятых выше допущениях, обобщенные уравнения состояния при холодной вытяжке приняты в виде тензорно-линейных соотношений:

$$\varepsilon_{ij} = A_{ijkl} \sigma_{kl}, \quad (1)$$

где  $\sigma = \sigma_{ij}$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_{ij}$  тензоры напряжений и деформаций;  $A_{ijkl}$  – компоненты тензора, которым определяются свойства деформирования материала. Большинство конструкционных материалов можно рассматривать кусочно-однородными с различными физико-механическими свойствами в пределах однородных областей. В пределах упругого деформирования соотношения

(1) отвечают обобщенному закону Гука. Для упруго-пластического деформирования приведенные соотношения в форме переменных параметров упругости соответствуют теории малых упруго-пластических деформаций Ильюшина, причем компоненты тензора  $A_{ijkl}$  определяются в виде:

$$A_{ijkl} = \frac{1}{E_*} \left[ (1 + \nu_*) \delta_{ik} \delta_{jl} - \nu_* \delta_{ij} \delta_{kl} \right], \quad (2)$$

где  $E_*$ ,  $\nu_*$  – переменные параметры упругости, которые имеют известные выражения через интенсивности напряжений и деформаций, отвечающих диаграмме деформирования. Соотношения (1), (2) являются справедливыми для простых или близких к ним процессах нагружения.

Для сложных процессов нагружения целесообразно использовать теории пластического течения. В работе использована теория Прандтля-Рейса с соотношениями:

$$d(\varepsilon_{ij})_p = \frac{1}{2G} \left[ d\sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{3\nu}{1+\nu} d\sigma_0 \right] + \frac{1}{\sigma_i} \sqrt{\frac{3}{2} d(\varepsilon_{ij})_p d(\varepsilon_{ij})_p} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0). \quad (3)$$

К уравнениям (3) добавлена зависимость между интенсивностью напряжений и мерой пластической деформации в виде  $\sigma_i = H(\chi(\varepsilon_i^p))$  и теория пластичности, ассоциированная с условиями пластичности для изотропных материалов с трансляционным анизотропным упрочнением:

$$d\varepsilon_{ij} = A_{ijk} d\sigma_{ij}. \quad (4)$$

Использование приведенных соотношений в дальнейших количественных расчетах предполагает наличие достоверной информации о диаграммах деформирования материала. Поэтому для прогнозирования параметров процесса вытяжки в заготовках из реальных автомобильных сталей были проведены стандартные испытания на растяжение.

Испытания проводились на разрывной машина FP 100/1, которая оснащена индукционным силовым измерителем и усовершенствованным диаграммным аппаратом для съема информации в бортовой компьютер. Из кузовных элементов (крылья, крышки капотов и другое) выбирались практически плоские участки, из которых далее были изготовлены стандартные плоские образцы. Результаты проведенных серийных испытаний (количество образцов в серии 7...15) для автомобильных сталей, используемых известными фирмами – VAZ, Mitsubishi, Opel, обработаны с помощью статистического пакета MicroCAL Origin 6.0. Медианные диаграммы растяжения с доверительной вероятностью 0,95, приведенные на рис. 3, далее использованы в расчетах по определению предельных давлений при вытяжке сферической формы заданной глубины.

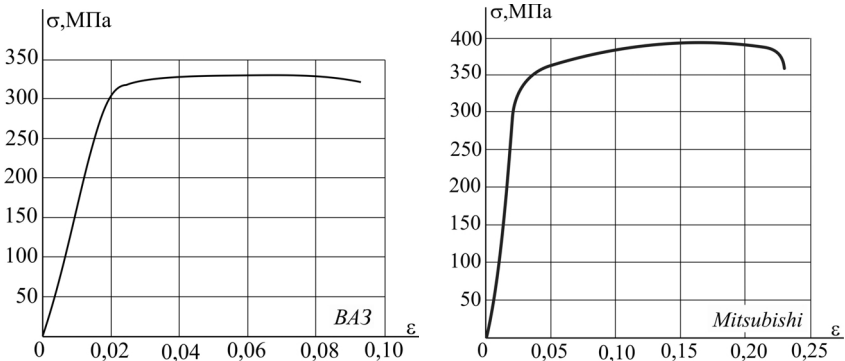


Рисунок 3 – Диаграммы деформирования автомобильных сталей

Отметим характерную особенность диаграмм деформирования автомобильных сталей, заключающуюся в практическом отсутствии зон упрочнения материала. Поэтому для таких сталей достаточно использовать соотношения деформационной теории пластичности (1), (2).

**4. Количественные результаты.** Решим задачу приближенно, принимая, что напряженное состояние является безмоментным и форма вытяжки близка к сферической. Как уже отмечалось, такое предположение сильно не искажает количественные результаты, по крайней мере, для рассматриваемых классов сталей. С учетом геометрической схемы процесса вытяжки (рис. 2)

для сферической формы интенсивность деформации равна  $\epsilon_i = \frac{4}{3} \frac{w^2}{R^2}$ . Задаваясь величиной прогиба  $w$ , далее в условиях простого нагружения по диаграмме деформирования (рис. 3) определяем величину интенсивности напряжений  $\sigma_i = \frac{pR^2}{4tw}$ . Принимая толщину плоской заготовки  $t = 1$  мм, радиус сферической вытяжки  $R = 30$  мм, легко определить величину давления  $p$ . Результаты указанных расчетов показаны на рис. 4.

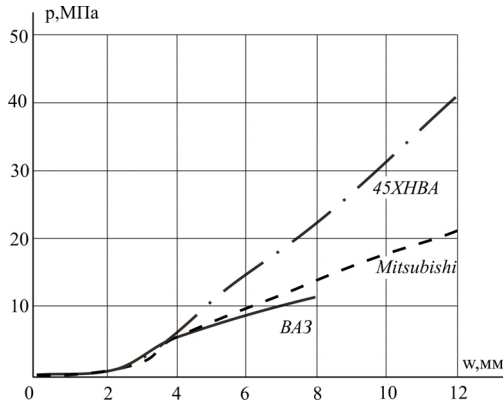


Рисунок 4 – Предельные давления для сферической вытяжки

**5. Выводы.** В настоящей работе изложен один из возможных подходов, позволяющий с заданной степенью достоверности получить прогноз на величину необходимого давления для формообразования сферической вытяжки в тонкой пластине. Представленные результаты могут быть приняты в качестве исходной информации для разработки технологических условий штамповки вытяжек в плоских заготовках. При анализе процессов вытяжки в заготовках из сталей, диаграммы деформирования которых имеют зоны упрочнения, необходимо использовать указанную ассоциированную теорию пластического течения.

**Список литературы:** 1. Автономова Л.В., Бондарь С.В., Лавинский В.И. Узгалянена математична модель структурно зв'язаних механічних систем // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003. – Вып. 12, т. 1. – С. 156-160. 2. Бондарь С.В., Зубатый С.С., Курчак Б.Н., Лавинский В.И. Программный комплекс SPACE-T для решения термоупругопластических контактных задач // Республ. межвед. науч.-техн. сборн. «Динамика и прочность машин». – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 57. – С. 24-34. 3. Лавинский В.И. Исследование прочности и жесткости структурно взаимосвязанных механических систем // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ. – 2000. – Вып. 116. – С. 86-97.

Поступила в редколлегию 05.09.2007