

## **Влияние уменьшения сопротивления материала пластической деформации после предварительно малой деформации противоположного знака при моделировании процесса сложной вытяжки автокузовных деталей**

*Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского*

Рассмотрена физическая сущность трансляционной анизотропии деформируемых листовых заготовок, связанная с эффектом Баушингера. Дан анализ теорий пластичности изотропного материала с анизотропным упрочнением. Получены зависимости для определения изгибающих моментов с учетом трансляционного упрочнения при изгибе по сравнительно большому радиусу, радиуса нейтрального слоя, продольной силы и радиуса нейтрального слоя при гибке с растяжением. Разработана численная математическая модель, учитывающая трансляционную анизотропию. Дан анализ результатов расчета автокузовных деталей.

**Ключевые слова:** анизотропия, эффект Баушингера, сложная вытяжка, напряжения.

### **Введение**

Одним из основных методов изготовления деталей в автомобильной промышленности является листовая штамповка. Исследования направлены на совершенствование и развитие методов расчета процесса формоизменения тонколистовых автокузовных деталей при сложной вытяжке и повышение эффективности листоштамповочного производства деталей грузовых автомобилей. Необходимо учитывать, что в условиях вытяжки деталей сложной конфигурации имеет место комплекс особенностей, связанных с пластическим деформированием элементов заготовки, часть из которых пластически деформируются в условиях непропорционального деформирования, а также плоского и объемного, напряженного и деформированных состояний.

Изыскание путей повышения эффективности листоштамповочного производства неразрывно связано с сокращением отхода металла и приближением формы и размеров заготовок к готовым изделиям, совершенствованием методов расчета формоизменения, упрочнением механизма деформирования заготовки и оценкой влияния отдельных факторов на процесс сложной вытяжки.

### **Обзор последних источников и публикаций**

Эффект Баушингера наблюдается при изменении знака (реверса) напряжений. Его возникновение по данным работ [1-3] связано с возникновением остаточных напряжений после пластического деформирования и снятия нагрузки в микроскопических объемах металла. Это следствие неоднородного распределения напряжений в зернах, различно ориентированных до разгрузки. При однородном растягивании металла с последующими разгрузке и сжатии, обнаружили снижение предела текучести при сжатии. Разрушение может наблюдаться даже по отношению к исходному, ненаклепанному материалу [1].

## **Выделение нерешенной раньше части общей проблемы**

Эффект Браушингера проявляется при прямом и противоположном нагружении путем смещения поверхности пластичности [4, 5]. Это приводит к изменению условия пластичности Мизеса и асоцированного закона течения. Такой вид анизотропии называется трансляционным. В работах О.Ю. Ишлинского допускается степенная зависимость координаты центра поверхности пластичности от деформации. Эта теория подтвердилась в работах В. Прагера и Ф. Ходжа. Однако эта модель удовлетворительно соответствует экспериментальным данным при малых упруго-пластических деформациях [4]. В теории пластичности, которая учитывает трансляционное упрочнение рассматривали Ю.И. Кадашевич и В.В. Новожилов. В этой теории девиатор напряжений заменяется на девиатор активного напряжения. При этом координата центра поверхности пластичности зависима от плоскости деформирования. Более точное соответствие с экспериментом больших пластических деформаций достигается при предположении, что поверхность нагружения испытывает перенос и одновременно расширяется во всех направлениях [4].

В целом существующие методы расчета и моделирования процесса сложной вытяжки облицовочных деталей транспортных средств не учитывают реверса напряжений при деформировании, эффект повышения пластических свойств материала не используется и не учитывается.

## **Цель исследований**

Разработка метода расчета процесса вытяжки деталей сложной пространственной конфигураций с учетом реверса напряжений на фланцевой части заготовки и оценка целесообразности уточнения методов расчета процесса сложной вытяжки путем учета изменения пластических свойств материала.

## **Основной материал и результаты**

Вид нагружения при котором листовая заготовка подвергается многократному изгибу наблюдается при перетягивании листа по цилиндрической поверхности в некоторых операциях гибки, вытяжке коробчатых деталей и деталей сложной формы, правки, в процессах формоизменения в лабиринте тормозных порогов и ребер прижимных устройств штампов для сложной вытяжки. Для металлов, обладающих эффектом Браушингера, необходим учет его влияния на энергосиловые и кинематические параметры при многократном изгибе. При решении задач упруго-пластического формирования металлов, обладающих эффектом Браушингера, в рамках теории течения, поверхность течения представляет собой круговой цилиндр, в девиаторной плоскости – окружность, центр которой смещен от начала координат. Смещение центра определяется параметрами анизотропии, в том числе и эффектом Браушингера [4]. При расчете энергосиловых параметров в предложенной модели, расчете напряженного состояния заготовки эффект Браушингера не учитывается. При определении изгибающего момента смещение нейтрального слоя учтено, а то, что кривые упрочнения при сжатии и растяжении различны, не учитывается.

При относительно небольшой кривизне пути деформирования явлением деформационной анизотропии, в частности эффект Браушингера можно пренеб-

речь с распространением закона единой кривой на непропорциональное деформирование [6-8]. В противном случае, когда направляющие тензора напряжений и деформаций не совпадают между собой в процессе деформирования привлекается усложненная модель Г. Бакхауза [9]. В этой теории отношение приращения пластической деформации к приращению напряжения изменяется вдоль поверхности текучести. Однако для практического использования этой теории необходимо проведение комплекса экспериментальных исследований по определению перемещения центра поверхности текучести, функции влияния, характера изменения напряжений после изменения направления нагружения. При решении ряда практических задач листовой штамповки, например, инженерным методом, учет реверса напряжений не вызывает больших затруднений.

При изгибе по сравнительно большому радиусу, без учета упрочнения величина изгибающего момента с учетом эффекта Баушингера для единицы ширины заготовки определяется из выражения:

$$M = \int_{r_H}^R \sigma_S r \cdot dr + \int_{r_1}^{r_H} (-\bar{\sigma}_S) r \cdot dr = 0,5 \left[ \sigma_S R^2 + \bar{\sigma}_S r^2 - r^2 (\sigma_S + \bar{\sigma}_S) \right], \quad (1)$$

где  $\sigma_S, \bar{\sigma}_S$  – пределы текучести при растяжении и сжатии;

$R, r_1$  – радиусы кривизны наружной и внутренней поверхности;

$r_H$  – радиус кривизны нейтрального слоя.

При изгибе моментом широкой полосы, совместное решение уравнения равновесия и условия пластичности Треска-Сен-Венана для зоны растяжения и сжатия позволяет найти распределение меридиональных и широтных напряжений по толщине заготовки. При этом в зоне сжатия используется предел текучести для сжимающих напряжений. На нейтральной поверхности при  $r = r_H$  меридиональные напряжения для зон растяжения и сжатия равны между собой [4]. Формула для определения радиуса нейтрального слоя принимает вид

$$r_H = R \frac{\sigma_S}{\sigma_S + \bar{\sigma}_S} \cdot r_1 \frac{\bar{\sigma}_S}{\sigma_S + \bar{\sigma}_S} \leq \sqrt{R r_1}, \quad (2)$$

где  $\sqrt{R r_1}$  – радиус нейтрального слоя без учета эффекта Браушингера.

Следовательно, у материалов, обладающих эффектом Браушингера, радиус нейтрального слоя и зона сжимающих напряжений меньше и пружинение меньше.

При больших радиусах кривизны и тонколистовых заготовках когда  $R/r_1 \approx 1$ , радиус нейтрального слоя будет равен

$$r_H = \frac{r_1 (\sigma_S - \sigma_{S'})}{2\sigma_{S'}} \pm \sqrt{0,25 r_1^2 \left( \frac{\sigma_S}{\sigma_{S'}} - 1 \right)^2 + \frac{\sigma_S}{\sigma_{S'}} R r_1}. \quad (3)$$

При изгибе с растяжением или сжатием величина продольной силы выразится следующим образом

$$N = \int_{r_H}^R \sigma_S dr + \int_{r_1}^{r_H} (-\sigma_{S'}) dr = \sigma_S (R - r_H) - \sigma_{S'} (r_H - r_1). \quad (4)$$

С учетом  $r_1 = R - S; r_H = R - 0,5S - C,$

где  $S$  – толщина заготовки;

$C$  – расстояние между нейтральной и серединной поверхностью:

$$N = 0,5S(\sigma_S - \sigma_{S'}) + C(\sigma_S + \sigma_{S'}) = \sigma_{\theta cp} \cdot S, \quad (5)$$

где  $\sigma_{\theta cp}$  – среднее по толщине напряжение, вызванное действием продольной силы.

Из (5) следует:

$$C = \frac{\sigma_{\theta cp} \cdot S - 0,5(\sigma_S - \sigma_{S'}) \cdot S}{\sigma_S + \sigma_{S'}}. \quad (6)$$

Отсюда

$$r_H = \frac{R + r_1}{2} - \frac{\sigma_{\theta cp} \cdot S}{\sigma_S + \sigma_{S'}} + 0,5S \frac{(\sigma_S - \sigma_{S'})}{\sigma_S + \sigma_{S'}}. \quad (7)$$

При  $\sigma_{\theta cp} = \sigma_S$ , зона сжатия отсутствует (без учета эффекта Баушингера).

Учет этого эффекта практически не сказывается на величине продольной силы.

Аналогичные результаты можно получить для схемы объемного напряженно-деформированного состояния при гибке.

При вытяжке осесимметричных деталей также возникает необходимость учета эффекта Баушингера. Материал фланцевой части заготовки подвергается сжатию, а затем растяжению. При перетекании через радиус скругления матрицы происходит его изгиб в перпендикулярном направлении к растяжению в плоскости фланца и последующее растяжение.

При вытяжке крупногабаритных листовых деталей кузова автомобиля широко применяют на прижиме тормозные ребра и пороги. Их основное назначение уменьшить ширину фланца под прижимом и размер заготовки. Производственный опыт показывает, что после расчета размеров, формы и положения заготовки в штампе после проведения ряда пробных процессов вытяжки приходится корректировать эти параметры. Одной из причин неточности определения геометрии заготовки является не учет реверса напряжений (эффект Баушингера) при перетекании материала по тормозным порогам и ребрам. Решение этой задачи с учетом эффекта Баушингера довольно сложно [7, 8] и результаты могут быть получены с использованием численных методов решения задач упругопластического формоизменения. Рассмотрим уточнение метода решения задачи сложной вытяжки предложенного в работе [9]. Используем систему уравнений движения штампуемой тонколистовой оболочки [9] и уравнения равновесия для моментов:

$$\nabla_{\beta} L^{\alpha\beta} + \left\{ \begin{matrix} \alpha \\ \beta\gamma \end{matrix} \right\} \cdot L^{\beta\gamma} + \left\{ \begin{matrix} \beta \\ \gamma\delta \end{matrix} \right\} \cdot L^{\alpha\delta} = Q^{\alpha}, \quad (8)$$

где  $\left\{ \begin{matrix} \alpha \\ \beta\gamma \end{matrix} \right\}$  – символ Кристоффеля  $\alpha$ -го ряда;

$\nabla_{\beta}$  – знак ковариантного дифференцирования;

$L^{\alpha\beta}$  – изгибающие моменты;

$Q^{\alpha}$  – перерезывающие силы.

Вычисление деформаций по толщине заготовки производится на базе модели с подслоями. При определении тензора приращение деформаций на каждом

шаге интегрирования (в рамках метода конечных разностей), последний разлагается на упругую и пластическую компоненты. Тензор упругих деформаций связан с тензором напряжений обобщенным законом Гука. Пластические компоненты тензора приращения деформаций выражаются через напряжения по закону пластического течения:

$$\Delta \varepsilon_{\alpha\beta} = \lambda \frac{\partial \Phi^T}{\partial \sigma_{\alpha\beta}}, \quad (9)$$

где  $\lambda$  – множитель Лагранжа;

$\Phi^T$  – функция текучести.

Однако при учете реверса напряжений условия перехода материала в пластическое состояние, которое графически в шестимерном пространстве изображается фиксированной поверхностью, следует учитывать асимметричность и эксцентриситет этой поверхности. Это связано с уменьшением предела текучести при сжатии. При расчете напряжений поверхность нагружения (поверхность кругового цилиндра), также асимметрична и имеет эксцентриситет.

Определив напряжения по обобщенному закону Гука, проверяем условие пластичности анизотропно упрочняющего материала  $\Phi_K$ . Поверхность пластичности строим по методике В.А. Огородникова [4]. Значение трех характеристик материала: диаграммы растяжения, зависимость отношения предела текучести на сжатие после растяжения к интенсивности напряжений от интенсивности деформаций и диаграммы испытания автокузовного материала на растяжение до предельной деформации и последующее сжатие, взяты из экспериментальных исследований представлены в работах А.Д. Матвеева [2, 3].

В этом случае, когда  $\Phi_K - \sigma_S < 0$ , где  $\sigma_S$  – предел текучести, пластическое течение отсутствует. Напряжения равны расчетным по обобщенному закону Гука. Если  $\Phi_K - \sigma_S = 0$ , пластическое течение только наступило.

При  $\Phi_K - \sigma_S > 0$ , процесс деформирования происходит пластически, т.е. напряжение на шаге итерации выходит за поверхность текучести. После этого определяем главные напряжения в каждой узловой точке заготовки. Если условие текучести в главных напряжениях не попадает на поверхность текучести применяется метод возвращения вектора напряжений на площадку текучести, разработанный Уитмером [9], после определения напряжений в каждом слое и в каждом узле заготовки проводим вычисление мембранных сил и изгибающих моментов  $L^{\alpha\beta}$ :

$$L^{\alpha\beta} = \int_{-0,5\delta+\Delta}^0 \left[ \sigma_{\alpha 1} (\delta_1^\beta - x^3 B_1^\beta) + \sigma_{\alpha 2} (\delta_2^\beta - x^3 B_2^\beta) \right] (G \cdot A^{-1})^{0,5} x^3 dx^3 + \int_0^{0,5\delta-\Delta} \left[ \sigma_{\alpha 1} (\delta_1^\beta - x^3 B_1^\beta) + \sigma_{\alpha 2} (\delta_2^\beta - x^3 B_2^\beta) \right] (G \cdot A^{-1})^{0,5} x^3 dx^3, \quad (10)$$

где  $G = \left| G_{\alpha\beta} \right| = \left| A_{\alpha\beta} - 2 x^3 B_{\alpha\beta} \right|$ ,  $A_{\alpha\beta}$  – тензор,  $B_{\alpha\beta}$  – тензор кривизны.

Решая систему уравнений равновесия находим усилие деформирования соответствующее принятому шагу перемещения пуансона. На заключительной стадии получаем диаграмму усилие-перемещение по которой подбираем пресс.

По предложенному методу произведен расчет технологического процесса

сложной вытяжки детали «пол кабины» автомобиля семейства КрАЗ (рис. 1).

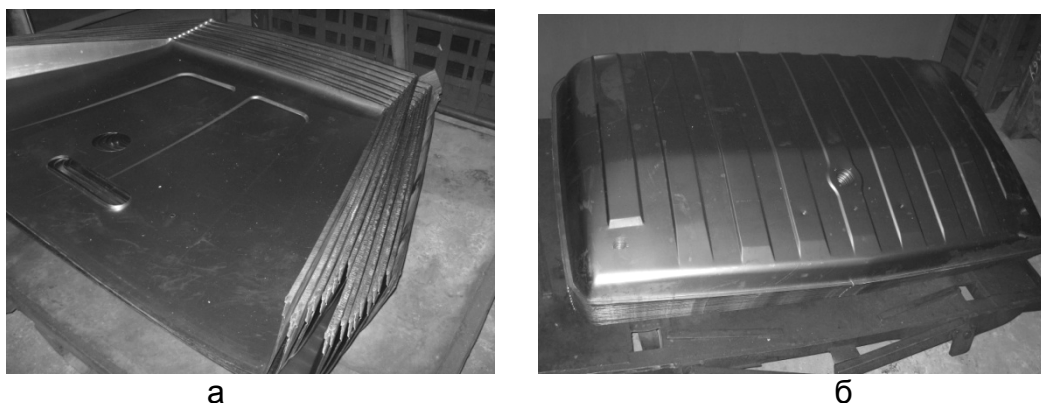


Рис. 1. Корпусные детали кабины автомобиля КрАЗ: а – капот; б – крыша

В результате счета установлено, что усилие пресса является завышенным на 24,8%. Участки заготовки вытягиваемые через перетяжной порог и ребро имеют избыточную площадь на 15%. В результате счета также установлено, что эффективность перетяжного порога с точки зрения торможения фланца заготовки достаточно высока, однако в этом случае реверса напряжений не происходит и резерв пластичности фланца не используется. Более эффективно использование цилиндрического ребра, сопряженного с радиусом скругления матрицы. Это позволяет максимально использовать повышение пластических свойств материала заготовки при реализации эффекта Баушингера.

### Выводы

Установлена целесообразность учета эффекта Баушингера в методах моделирования процесса вытяжки деталей сложной пространственной конфигурации. Обеспечение условий, реализующих реверс напряжений позволяет снизить усилие формообразования на 15-20%, выявить дополнительные ресурсы повышения пластических свойств материала фланцевой части заготовки с экономией листового проката при производстве облицовочных деталей автомобилей.

### Список литературы

1. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов / Я.Б. Фридман – В двух частях. Часть первая. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
2. Воронцов А.Л. О корректном построении и правке теоретических моделей процессов обработки металлов давлением [Текст] / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство, 2011. – № 5. – С. 12-20.
3. Бондарь В.С. Многократный пластический изгиб листа из металла, обладающего эффектом Баушингера [Текст] / В.С. Бондарь, А.Д. Матвеев, Данин // Кузнечно-штамповочное производство, 1989. – № 8. – С. 19-21.
4. Матвеев А.Д. Работа перетяжного порога вытяжных штампов [Текст] / А.Д. Матвеев, В.В. Кладников, И.Ю. Ананченко, В.А. Халдинов, В.А. Гуров // Кузнечно-штамповочное производство, 1989. – №8. – С. 16-19.
5. Огородников В.А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении: Учеб. пособие / В.А. Огородников. – К.: УМК ВО, 1989. – 152 с.

6. Бакхауз Г. Анизотропное упрочнение. Теория в сопоставлении с экспериментом / Г. Бакхауз // Механика твердого тела, 1976. – № 6. – С. 120-129.

7. Шапиевская В.А. Экспериментальные методы определения параметров эффекта Баушингера [Текст] / В.А. Шапиевская // Кузнечно-штамповочное производство, 2011. – № 1. – С. 3-6.

8. Воронцов А.Л. К вопросу о контактном трении, кривых упрочнения и эффекте Баушингера [Текст] / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство, 2011. – № 4. – С. 38-42.

9. Уитмер В. Большие динамические деформации балок, колец, пластин, оболочек / В. Уитмер // Ракетная техника и космонавтика. – М.: Ил., 1963. – № 8. – С. 111-123.

**Рецензент:** д-р техн. наук В.Е. Зайцев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 30.12.2013

### **Вплив зменшення опору матеріалу пластичної деформації після задалегідь малої деформації протилежного знаку при моделюванні процесу складного витягу автокузовних деталей**

Розглянута фізична суть трансляційної анізотропії листових заготовок, що деформуються, пов'язаної з ефектом Баушингера. Наведено аналіз теорій пластичності ізотропного матеріалу з анізотропним зміцненням. Отримані залежності для визначення згинаючих моментів з урахуванням трансляційного зміцнення при згинанні в порівнянні більшого радіусу, радіусу нейтрального шару, повздовжньої сили і радіусу нейтрального шару при згинанні з розтягуванням. Розроблена числова математична модель, що враховує трансляційну анізотропію. Приведено аналіз результатів розрахунку автокузовних деталей.

**Ключові слова:** анізотропія, ефект Баушингера, складне витягування, напруження.

### **Influence of diminishing of resistance of material a flowage after preliminary smoll deformation of opposite sign at the design of process of difficult extraction of details of motor-car baskets**

The physical essence of transmitting anisotropy of deformable sheet billets connected with the effect of Baushinger is considered. The analysis of the theories of plasticity of isotropic material with anisotropic hardening is given. The dependences for determining bending moments are received taking into account transmitting hardening at bending on a rather large radius, a radius of a neutral layer, longitudinal force and radius of a neutral layer at bending with tensile ductility. The mathematical model of the drawing process of items with complex configuration which is taken into account transmit anisotropy is developed. The analysis of the calculation results of lorry sheet billets.

**Keywords:** anisotropy, effect of Baushinger, complex extend, pressure.