

УДК 621.7.044

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ФЛАНЦА ЗАГОТОВКИ ПРИ СЛОЖНОЙ ВЫТЯЖКЕ****С. П. Шлык, В. В. Драгобецкий, Н. Н. Мороз**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vldrag@polytech.poltava.ua

Рассмотрены схемы напряженно-деформированного состояния фланца заготовки при вытяжке деталей сложной формы. Материал фланца заготовки при сложной вытяжке рассматривается как состоящий из предварительно подвергнутых пластической деформации на перетяжных ребрах и порогах, и неупрочненный. Представлены зависимости для определения натяжения деформируемого материала заготовки и определения напряжений контактного трения. Установлены условия максимального торможения фланца заготовки при сложной вытяжке.

**Ключевые слова:** вытяжка, сложная форма, перетяжные ребра и пороги, фланец, трение.

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ ФЛАНЦЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ СКЛАДНІЙ ВИТЯЖЦІ****С. П. Шлик, В. В. Драгобецький, Н. Н. Мороз**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: vldrag@polytech.poltava.ua

Розглянуті схеми напружено-деформованого стану фланця заготовки при витяжці деталей складної форми. Матеріал фланця заготовки при складній витяжці розглядається як той, що складається з попередньо підданих пластичній деформації на перетяжних ребрах і порогах, і незміцнений. Приведені залежності для визначення натягу деформованого матеріалу заготовки і визначення напружень контактного тертя. Встановлено умови максимального гальмування фланця заготовки при складній витяжці.

**Ключові слова:** витяжка, складна форма, перетяжні ребра і пороги, фланець, тертя.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Штамповка деталей, имеющих форму сложных оболочек, широко применяемых в автомобилестроении, тракторостроении, вагоностроении, оказывается чрезвычайно затруднительной. Рабочие части пуансона, матрицы и прижимного кольца образованы сложными криволинейными поверхностями. Процессы формообразования таких деталей сопровождаются потерей устойчивости и повышенным использованием пластичности в растянутых частях заготовок. И если при вытяжке деталей простых конфигураций, особенно осесимметричных, в целях совершенствования процесса необходимо уменьшать сопротивление фланца путем рационального подбора смазок и рациональной геометрии радиуса закругления матрицы [1], то при вытяжке сложных деталей это сопротивление приходится увеличивать путем применения вытяжных порогов и ребер. Конструкторам и технологам при проектировании штампов и технологии сложной вытяжки необходимо решить комплекс задач: выявить и установить наиболее деформированные участки заготовки и вероятное течение металла, наиболее рациональное положение заготовки в пространстве, оптимальную поверхность прижима, необходимость применения перетяжных ребер и порогов, форму и размеры плоской заготовки.

Среди множества способов изменения условий перемещения фланца заготовки из-под прижима, которые позволяют повысить интенсивность торможения, наиболее эффективны в настоящее время [2] – это введение в конструкцию штампов одного или нескольких перетяжных ребер и порогов [3]. Вопросы применения перетяжных ребер и порогов достаточно глубоко описаны в отечественной и зарубежной литературе [4–6].

Выполнена достаточно глубокая и детальная классификация перетяжных ребер и порогов, которая включает более 50-ти видов ребер и около 40 перетяжных порогов и множество их сочетаний – перетяжных ребер с перетяжными порогами. При анализе и классификации рассмотрены различные варианты их геометрической формы, количество (рядность) и последовательность размещения [6].

Целью настоящей работы является выявление наиболее рациональной схемы напряженного состояния при сложной вытяжке и определение напряжений контактного трения на фланце заготовки.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Создание новых конструкций штампов идет по пути поиска новых геометрических форм и вариантов их расположения. Как правило, в таких случаях можно предположить, что наличие множества различных вариантов торможения фланца заготовки путем применения перетяжных порогов и ребер, свидетельствует о несущественных различиях в их эффективности. Поиски эффективных технических решений видимо следует вести в ином направлении. Наиболее эффективные пути торможения фланца заготовки и исключения потери устойчивости ее поверхности можно искать с позиций идеального процесса пластического деформирования. В этом случае внешние нагружения во всем очаге деформации создают однократное деформированное и скоростное состояние.

Таким образом, в настоящее время нет критериев оценки эффективности применения различных конструкций перетяжных ребер и порогов. Это, в свою очередь, привело к обширной номенклатуре рекомендуемых конструкций для интенсификации процесса торможения фланца заготовки при сложной вытяжке. При этом отсутствуют четкие количест-

венные и качественные характеристики применяемых схем торможения фланца.

В условиях однородного деформированного состояния (равномерности пластических деформаций) точность получаемых деталей выше. Равномерность распределения пластических деформаций определяется схемой нагружения заготовки. Нагружение фланцевой части заготовки при наличии перетяжных порогов и ребер происходит в следующей последовательности: локальный изгиб фланцевой части заготовки, радиальное сжатие, тангенциальное растяжение. Применение перетяжных порогов и ребер позволяет реализовать следующие схемы:

- а) простое нагружение (изгиб и радиальное сжатие);
- б) сложное нагружение в последовательности «радиальное сжатие – изгиб»;
- в) сложное нагружение в последовательности «изгиб – радиальное сжатие»;
- г) создание радиального сжатия при помещении фланцевой части в пластичные обкладки;
- д) изгиб с осевым нагружением;
- е) растяжение – изгиб;
- ж) изгиб – растяжение – изгиб;
- з) растяжение с изгибом.

В случае «а» фланец заготовки нагружается радиальным сжатием по всей поверхности. Эффективность принятой схемы нагружения фланца заготовки оценивалась по величине пружинения полосы из стали 08кп толщиной 0,8 мм. Вытяжке подвергалась центральная зона заготовки. Пуансон в поперечном сечении имел форму треугольника с углом при вершине 30° (рис. 1) с радиусом скругления 5 мм.

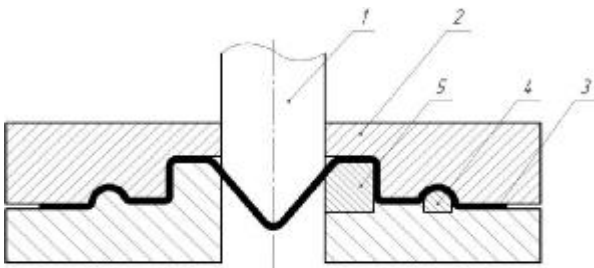


Рисунок 1 – Схема оценки эффективности торможения фланца заготовки: 1 – пуансон; 2 – прижимная плита; 3 – заготовка; 4 – перетяжное ребро; 5 – перетяжной порог

При этой схеме нагружения угол пружинения лежит в пределах  $10^\circ \pm 1^\circ$ .

Сложное нагружение в последовательности «радиальное сжатие – изгиб» возможно осуществить по более сложной схеме (рис. 2).

Результаты, полученные при данной последовательности нагружения незначительно отличаются от результатов, полученных по простому нагружению.

Вероятно, что наиболее эффективной схемой нагружения фланца заготовки является изгиб, который реализуется на перетяжных порогах и ребрах с радиальным сжатием фланцевой части заготовки и ее

сжатием в направлении, перпендикулярном течению металла.

Большой эффект это имеет с одной стороны для повышения пластичности материала, а с другой – для повышения сопротивления течению фланца заготовки. При вытяжке деталей сложной формы, как правило, используют матрицы, состоящие из прямолинейных, вогнутых и выпуклых участков контуров проема матрицы.

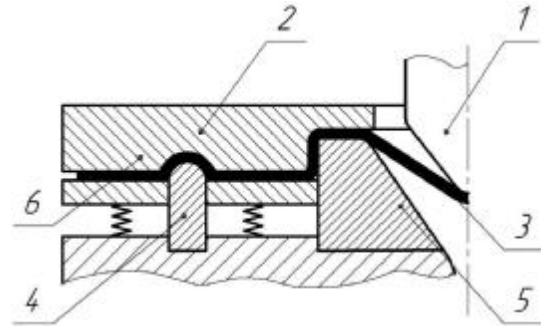


Рисунок 2 – Схема процесса:  
1 – пуансон; 2 – прижимная плита; 3 – заготовка;  
4 – перетяжное ребро; 5 – перетяжной порог;  
6 – промежуточная плита

На выпуклых участках сжимающие напряжения возникают в процессе перемещения фланца заготовки. Это приводит к утолщению материала фланцевой части заготовки на этих участках и созданию растягивающих напряжений на сопрягаемых с ними прямолинейных и вогнутых участках. Растягивающие напряжения приводят к утонению материала на этих участках и уменьшению давления прижима. Для устранения этого явления можно рекомендовать формовку рифтов глубиной 0,2 и 0,5 толщины заготовки, расположенных по периферии участков фланца заготовки с последующим их распрямлением по мере перемещения фланца заготовки. В результате этого создается дополнительное сопротивление течению материала фланца заготовки и создание сжимающих напряжений при распрямлении рифтов.

Влияние на эффективность торможения фланца заготовки при сложной вытяжке оказывают силы трения. Последние влияют на характер распределения деформаций и напряжений в зоне контакта фланцевой части заготовки с поверхностью прижима и на возможности формоизменения заготовки. В произвольном сечении фланца заготовки обобщенное усилие растяжения можно представить как сумму двух слагаемых:

$$F = F_{def} + F_{тр}, \quad (1)$$

где  $F_{def}$  – усилие деформирования фланцевой части заготовки;  $F_{тр}$  – сила трения, возникающая на участке длиной  $l_f - 1$  ( $l_f$  – ширина фланца,  $l$  – координата сечения фланца).

По мере удаления от поверхности перехода участка фланца заготовки к участку вытяжного ребра матрицы силы трения будут возрастать, если фланец представляет собой плоскую поверхность. Наличие перетяжных ребер и порогов изменяет распределение сил трения по фланцу заготовки. Так как при сложной вытяжке стремятся обеспечить жесткие условия трения, когда велико отношение давления прижима к текучести материала заготовки, инструмент имеет шероховатую поверхность, отсутствует технологическая смазка и т.д. В этом случае можно воспользоваться для определения удельной силы трения условием Прантля – Зибеля:

$$\tau_{\text{СК}} = 0,58(\sigma_s + \sigma_{s_{\text{max}}}) / 2, \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести в объеме металла вблизи контактной поверхности;  $\sigma_{s_{\text{max}}}$  – предел текучести предельно упрочненного материала, т.е. соответствующий максимальной степени и скорости деформации.

Составляющие усилия растяжения фланцевой части заготовки зависят от предела текучести, который также соответствует достигнутой степени деформации. В идеализированном случае, при отсутствии трения пластическая деформация элементов фланцевой части заготовки происходит в следующей последовательности. Сначала начнут деформироваться элементы фланца заготовки, менее подвергнутые пластической деформации. Это плоские участки фланца, которые расположены вне перетяжных ребер и порогов. Деформация этих участков будет продолжаться до тех пор, пока текущий предел текучести при растяжении не станет равным пределу текучести материала участка заготовки (перетяжной порог). После этого начинается совместная пластическая деформация участков фланца заготовки. Основным материалом, применяемым для изготовления облицовочных деталей автомобилей, которые получают сложной вытяжкой, является сталь 08кп. Диаграмма истинных напряжений для этой стали аппроксимируется в полином третьей степени или степенной функцией [7]:

$$\sigma_s = 240 + 1279\epsilon - 1599\epsilon^2 + 914\epsilon^3 = 230 + 548\epsilon^{0,6}, \quad (3)$$

где  $\sigma_s$  – текущий предел текучести материала заготовки.

При деформации 0,1 текущий предел текучести возрастает до 360 МПа при исходном 240 МПа. Недеформированный участок фланца заготовки длиной 0,1 м переместится на 0,01 м и не обеспечит натяжения деформируемого участка заготовки.

Наличие напряжений контактного трения существенно изменяет характер пластического течения фланцевой части заготовки. Для того, чтобы вовлечь в процесс пластической деформации неупрочненные участки фланца, необходимо преодолеть силы внешнего трения. Если на границе вытяжного ребра матрицы находится неупрочненный участок, то по-

следний значительно раньше вовлекается в процесс совместной пластической деформации заготовки. Натяжение деформируемой части заготовки в этом случае минимально. Поместив перетяжной порог у проема матрицы, текущее значение предела текучести которого равно

$$\sigma_s^\delta = \sigma_b + \mu q, \quad (4)$$

где  $\sigma_s^\delta$  – текущее значение предела текучести (деформационно упрочненный предел текучести);  $\mu$  – коэффициент трения для упругого контакта материала фланца заготовки на перетяжном пороге;  $q$  – давление прижима, получаем условие для максимального натяжения деформируемой части заготовки и максимальное торможение ее фланца.

Дополнительно увеличить сопротивление фланца заготовки пластическому течению возможно путем предварительной фиксации прижимом части заготовки, контактирующей с вытяжным ребром матрицы. В этом случае компенсируется момент, возникающий при изгибе элемента заготовки на вытяжном ребре матрицы и создаются дополнительные силы трения. Следовательно, существующий классификатор элементов торможения фланца заготовки при сложной вытяжке необходимо производить в рамках следующих составляющих: с прижимом и без прижима элемента заготовки на вытяжном ребре матрицы; реализуемой схемой напряженного состояния; последовательностью расположенных предварительно деформированных и недеформированных элементов фланца заготовки.

В рамках последней составляющей можно рассмотреть элементы с равномерной деформацией по перетяжному порогу (ребру) и с деформацией, увеличивающейся от проема матрицы к кромке заготовки.

При расположении неупрочненного элемента фланца заготовки у проема матрицы максимальное напряжение натяжения материала деформируемой части заготовки составит

$$\sigma_s^g = \sigma_s + 2 \cdot 0,58\sigma_s, \quad (5)$$

В процессе деформации необходимо преодолеть напряжения контактного трения, равные  $1,16\sigma_s$ . После этого начинается деформация этого элемента фланца заготовки.

В заключении общая зависимость для определения напряжений натяжения элемента заготовки может быть представлена в следующем виде:

$$\sigma_{s3} \sum_{i=1}^k \mu_y q + \sum_{j=1}^n \psi \cdot 0,58\sigma_s^\delta + \sum_{\lambda=1}^m 0,58\sigma_s^\delta + \sum_{j=1}^m 0,58\sigma_s^\delta, \quad (6)$$

где  $\mu_y$  – коэффициент трения не смазанных поверхностей;  $q$  – давление прижима фланца заготовки;  $\psi = 2f_0/m$ ;  $f_0$  – показатель сил трения;  $m$  – коэффициент Лоде.

Первое слагаемое определяет напряжения трения участков фланца заготовки, которые подверглись предварительной пластической деформации и у которых текущий предел текучести превосходит деформационный упрочненный предел текучести элемента заготовки, т.е. данный элемент фланца заготовки пластически не деформируется, а торможение его осуществляется напряжениями контактного трения. Поэтому на данном участке целесообразно воспользоваться законом трения Амонтона. Значение коэффициента трения в этом случае соответствует значениям 0,2 и 0,25 [7].

Второе и третье слагаемое определяют напряжения трения пластически деформируемых участков заготовки в жестких и максимально жестких условиях трения. Последнее слагаемое связано с пластической деформацией элементов фланца заготовки. Первые три слагаемых соответствуют напряжениям контактного трения на фланце заготовки, а последнее – его пластической деформации.

**ВЫВОДЫ.** Наиболее эффективный метод торможения фланца заготовки при сложной вытяжке соответствует объемной схеме напряженно-деформированного состояния фланцевой части заготовки в условиях преобладания сжимающих напряжений, что достигается при применении продольных и поперечных перетяжных ребер и порогов.

Схема силового воздействия на деформируемую заготовку подбирается таким образом, чтобы исключить действие реактивных сил и моментов, препятствующих торможению фланцевой части заготовки.

тровки путем дополнительного нагружения деформируемой части заготовки со стороны матрицы и создания сжимающих напряжений на скругленной кромке матрицы.

У кромки матрицы следует располагать перетяжные пороги, форма которых соответствует предельной деформации штампуемого материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.
2. Zharkov V.A. Theory and Practice of Deep Drawing. – London: Mechanical Engineering Publication Limited, 1995. – 601 p.
3. Zharkov V.A. Theory of the Drawing of Cylindrical Parts from Sheet Materials // Journal of Materials Processing Technology. – 1992. – № 31. – PP. 379–392.
4. Yashida K. High – Strength Steel Sheets and Press Techniques for Automobile Bodies// Nippon Steel Technical Report. – 1989. – № 23. June. – PP. 1–7.
5. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – М.: Машиностроение. 1979. – 520 с.
6. Жарков В.А. Исследование вытяжки деталей в штампе с перетяжными ребрами // Кузнечно-штамповочное производство. – 1994. – № 10. – С. 5–9.
7. Аверкиев А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.

#### REGULARITIES OF DEFORMATION OF BLANC FLANGE IN COMPLEX DRAWING

**S. Shlyk, V. Dragobetskyi, N. Moroz**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: vldrag@polytech.poltava.ua

This paper considers scheme of the stress-strain state of the blank flanges under the drawing of complex components. In a complex drawing the material of blank flanges is regarded as non-hardened and composed after the previous plastic deformation on constrict edges and thresholds. The regularities for calculation of the blank tension and the contact friction stresses while the blanc deforming are presented. The conditions for maximum slowdown of the blank flange edge for the complex draw-forming are specified.

**Key words:** draw-forming, complex form, constrict edges and thresholds, flange, friction.

#### REFERENCES

1. Tomlenov A. *Theory of Plastic Deformation of Metals*. – Moscow: Metallurgy, 1972. – 408 p. [in Russian]
2. Zharkov V. *Theory and Practice of Deep Drawing*. – London: Mechanical Engineering Publication Limited, 1995. – 601 p.
3. Zharkov V. Theory of the Drawing of Cylindrical Parts from Sheet Materials// *Journal of Materials Processing Technology*. – 1992. – № 31. – PP. 379–392.
4. Yashida K. High – Strength Steel Sheets and Press Techniques for Automobile Bodies// *Nippon Steel Technical Report*. – 1989. – № 23. June. – PP. 1–7.
5. Romanovskii V. *Guide of Cold Forming*. – Moscow: Mashinostroenie. 1979. – 520 p. [in Russian]
6. Zharkov V. Research of Drawing Parts Stamped with Constrict Edges // *Forging and Stamping Production*. – 1994. – № 10. – PP. 5–9. [in Russian]
7. Averkiev A. *Evaluation Methods of Sheet Metal Stamping*. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 176 p. [in Russian]

Стаття надійшла 26.09.2012.  
Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Саленком О.Ф.