

УДК 621.982:669.295

Адаменко Б. И.
Борисевич В. В.
Морголенко А. С.

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ГОФРОВ ВО ВРЕМЯ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ

Существует большое разнообразие деталей, изготавливаемых методом листовой штамповки, в частности с помощью эластичных сред, имеющих в своей конструкции элемент типа «гофр». С другой стороны, тем же термином иногда пользуются при определении такого дефекта, как результат складкообразования, потери устойчивости при редуцировании оболочечных заготовок (поперечных гофр), или при получении выпуклого борта в виде продольных гофров. Противоречие в подходах [1, 2, 5], применяемых при исследовании данных явлений, представляется в использовании в первом случае формообразующих операций с обязательным применением формообразующих поверхностей жесткого инструмента, когда как во втором случае подобные же поверхности получаются с помощью комбинации продольного нагружения с поперечным изгибом. Разрешение данного противоречия видится в рассмотрении т. н. комбинированного напряженного состояния и учета потери устойчивости при формообразующих операциях. Такой новый подход в технологии и анализе процесса требует дополнительного исследования факторов, прежде всего напряженно-деформированного состояния, которые влияют на такие особенности листовой штамповки, когда требуемые геометрические параметры готового продукта получаются за счет так называемой потери устойчивости.

Цель работы экспериментальная проверка предлагаемой методики определения параметров продольных гофр, которая может быть применена при проектировании операций листовой штамповки эластичной средой, когда формируется пространственный борт возле плоского фланца для прогнозирования некоторых параметров получаемого изделия.

В результате работы даны общие оценки возможности листовых формоизменяющих операций и на основе проведенных опытов, предложена методика определения параметров продольных гофров, формирующихся при получении выпуклого борта.

При формообразовании выпуклого борта в его плоскости возникают тангенциальные сжимающие напряжения σ_t , вызванные действием внешнего давления со стороны эластичной или жидкостной матрицы q_n . В зависимости от геометрических параметров получаемой детали, механических свойств штампуемого материала и так же особенностей схемы нагружения формообразование выпуклого борта может сопровождаться, а может и не сопровождаться потерей устойчивости.

Согласно известным исследованиям [1] рассматривается три стадии формообразования выпуклого борта:

1. Равномерное пластическое деформирование до момента возникновения потери устойчивости.

2. Период интенсивного гофрообразования до момента соприкосновения гофр с поверхностью пуансона или формблока.

3. Период распрямления (посадки) гофр до полного прилегания борта к формблоку.

При этом при условии отсутствия потери устойчивости, требуемое давление можно найти из следующего выражения:

$$q_n = \frac{3\sigma_0 R s_0^2 + \Pi s_0^3}{6R(A - R\varphi)^2} + \frac{\left(\sigma_0 + \frac{\Pi x}{R_\sigma + x}\right) s_0}{R_\sigma} \left[1 + \frac{x}{2(R_\sigma + x)}\right], \quad (1)$$

где σ_0 начальный предел текучести,

$R_б$ – радиус борта формблока в плане,

s_0 – толщина заготовки,

Π – параметр линейной аппроксимации диаграммы деформирования,

x – расстояние от ребра формблока,

R – радиус изгиба нейтральной оси.

Вместе с этим из практики известно, что при даже небольших деформациях на фланце борта наблюдаются образование радиальных конических складок, при этом при определенных условиях последние с нарастанием давления разглаживаются. На данный процесс, прежде всего, оказывает влияние твердость эластичного пуансона.

Для выявления характера потери устойчивости важно знать условия формирования определенной формы и количества складок. Известно, что формирование складок начинается сразу же по достижении значений напряжений, близких к пределу текучести и вызывающих потерю устойчивости элемента, длина которого больше или равна критической длины элемента. Можно найти количество складок исходя из равенства периметра борта, потерявшего устойчивость и периметра борта исходной заготовки:

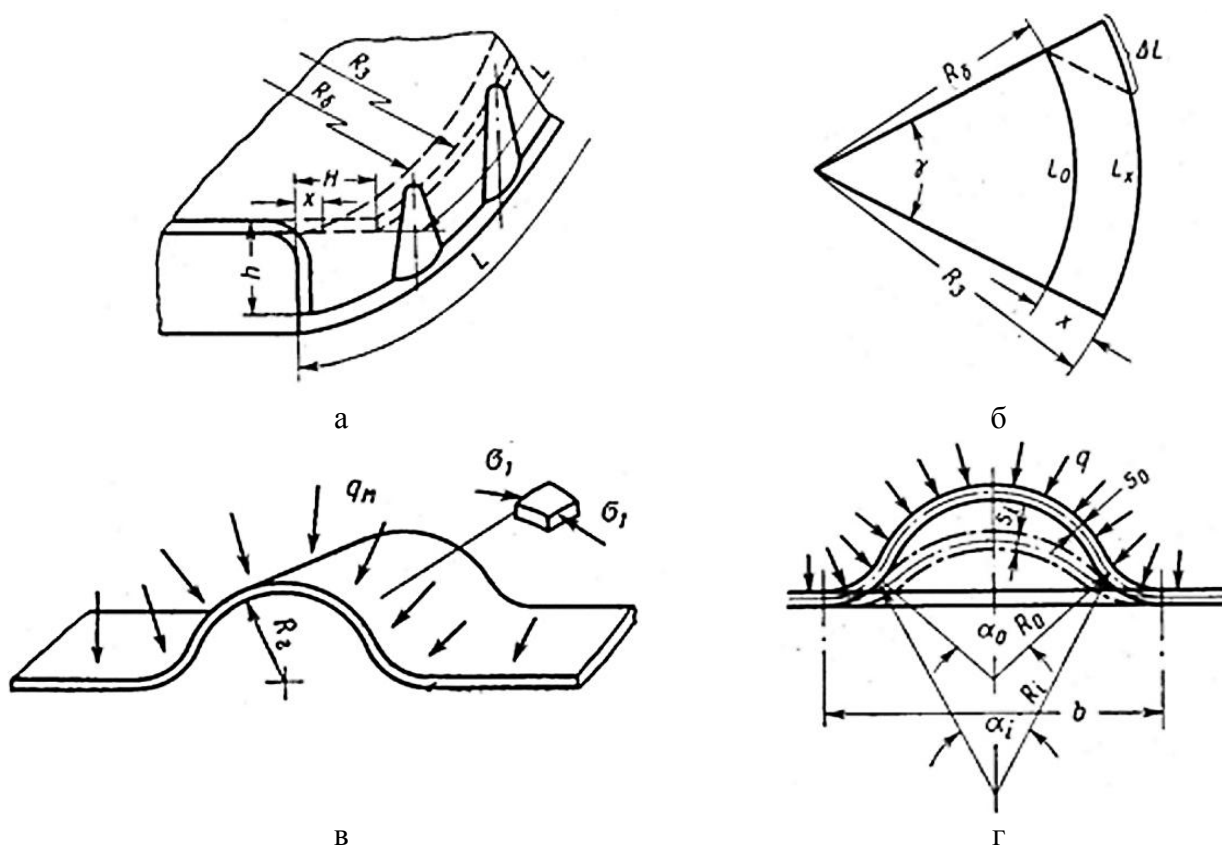


Рис. 1. Схема для анализа геометрических параметров гофрообразования при гибке-формовке выпуклого борта

Избыток материала, расходуемый на образование гофр при потере устойчивости можно найти как:

$$\Delta L = \frac{\pi \gamma H}{180}, \tag{2}$$

а количество гофр

$$n = \frac{\Delta L}{1,14 R_\Gamma} = \frac{2,74}{R_\Gamma} \cdot \frac{\gamma}{180}. \tag{3}$$

Из анализа данной зависимости соблюдается определенное соотношение между s_0 и R_r , количество гофров зависит от радиуса борта в плане и определяется в основном шириной фланца оформляемого борта H и углом охвата γ .

Как видим, в данной методике отсутствует возможность прогнозирования количества полученных гофров, т. к. этот параметр связывается непосредственно с геометрическими параметрами полученных гофров, при этом полностью игнорируется тот факт, что при угле наклона борта, близком к нулю, потери устойчивости вообще не происходит. Кроме того очевидно, что при достаточно большой относительной толщине данное явление также отсутствует. Было бы также интересно дать хотя бы приблизительную оценку соответствия количества гофров уровню прилагаемого давления.

С целью проверки возможности прогнозирования параметров продольных гофров выпуклого борта с учетом выше упомянутых факторов была проведена серия экспериментов, которая подтвердила зависимость количества получаемых гофров от угла наклона борта и относительной толщины заготовки (табл. 1).

Таблица 1

Экспериментальные данные

№ п/п	Размеры пуансона			Количество гофров из эксперимента
	α°	h	D	
1	30	13,9	60	3
2	35	13,1	62,3	4
3	40	12,5	64,5	4
4	45	11	66,2	6
5	50	10,5	68,4	6
6	55	9,2	69,7	8
7	60	8	71	9
8	65	7	72,5	9
9	70	5,5	73,2	9
10	75	4,2	73,7	11
11	80	2,8	74,6	10
12	85	2,4	74,8	10
13	90	1,6	75	11

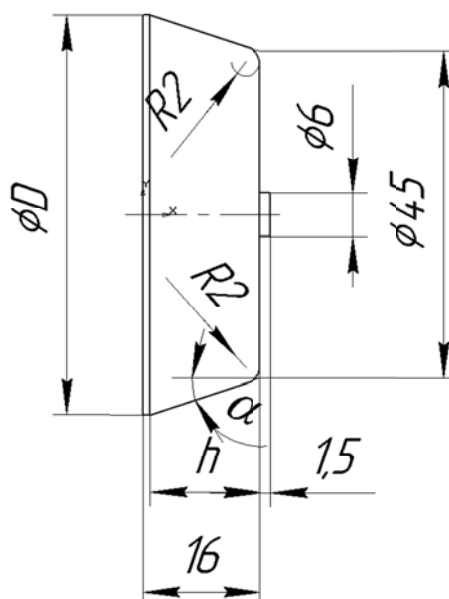


Рис. 2. Размеры пуансона



Рис. 3. Отштампованные образцы с переменным углом наклона борта ($S=1$, материал АмГ-АМ)



Рис. 4. Образцы с одинаковым углом наклона борта 60° , отштампованные при разном давлении: 10 Мпа, 20 Мпа, 30 Мпа, 40 Мпа ($S = 1$, материал АмГ-АМ)



Рис. 5. Образцы с одинаковым углом наклона борта 60° разной толщины: а – 1 мм, б – 1,5 мм, в – 2 мм, г – 3 мм (материал АмГ-АМ)



Рис. 6. Образец после приложения давления, позволяющего полностью выгладить гофры



Рис. 7. Деформация толстостенной заготовки

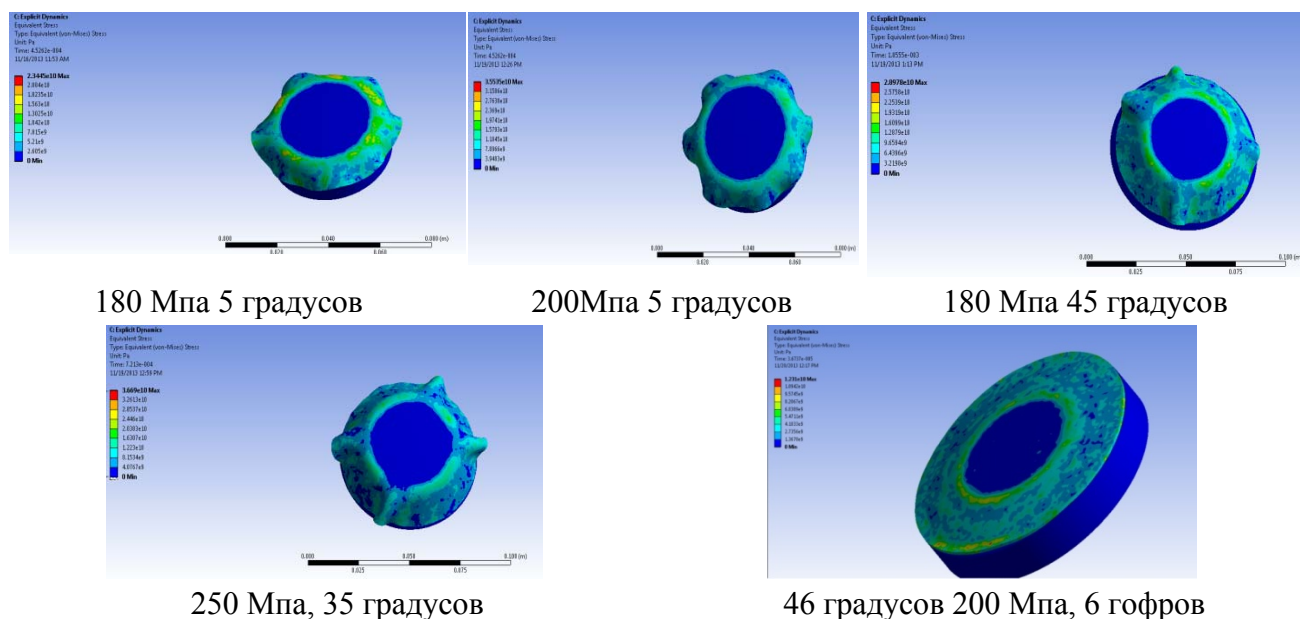


Рис. 8. Деформация толстостенной заготовки по переходам

В случае возникновения поперечных гофров при анализе устойчивости заготовок при пластическом формоизменении используют статический критерий устойчивости, при использовании которого аналитические решения получаются более простыми. Сущность статического критерия устойчивости состоит в том, что рассматриваются состояния равновесия, бесконечно близкие к основному состоянию равновесия, т. е. при некотором значении нагрузки наряду с основной формой возможна другая форма равновесия, а именно при несколько искривленной заготовке.

Общее дифференциальное уравнение устойчивости записывается в виде [1]:

$$\frac{d^2(\delta M)}{dx^2} + \sigma_x \frac{sd^2\omega}{dx^2} + \frac{1}{R_{cp}} \cdot \delta \Gamma = 0; \quad (4)$$

$$\delta M = \int_{-s/2}^{+s/2} \delta \sigma_x z dz; \quad \delta \Gamma = \int_{-s/2}^{+s/2} \delta \sigma_y dz,$$

где R_{cp} – радиус срединной поверхности исходной заготовки; $\delta \Gamma$ – изменение дополнительно возникшей при потере устойчивости окружной силы, вследствие выпучивания срединной поверхности заготовки, ω – прогиб срединной поверхности заготовки.

ВЫВОДЫ

1. Действующее давление в самой малой степени влияет на количество гофров. При всех давлениях количество гофров остается практически одинаковым (9 при угле наклона борта 60°). Решающим является влияние величины давления, во-первых, на самом начальном этапе нагружения, когда в силу малой устойчивости периферийной в пределах зоны заготовки происходит множественное возникновение, если так можно выразиться, начальных гофров в виде волнистости края, большинство из которых затем выглаживается, и, во-вторых, на конечном этапе формоизменения, когда происходит полная локализация нормальных гофров. При дальнейшем повышении давления возможно полное исчезновение гофров (рис. 6).

2. Угол борта влияет на количество гофров. Естественно предположить, что при угле наклона борта, близком к нулю, количество гофров так же стремится к нулю. Очевидно также, что величина борта в этом смысле играет ту роль, что чем больше радиус начальной заготовки, тем более выраженно проявляются гофры.

3. Толщина заготовки решающим образом влияет как на величину, так и на количество гофров. Общеизвестно, что при операции свертки достаточно толстых заготовок потери устойчивости вообще не происходит. Чем тоньше заготовка, тем на все меньшей дистанции происходит потеря устойчивости и, следовательно, больше количество формируемых гофров.

Вышеприведенные исследования позволяют повысить вероятность предсказания количества формируемых гофров не только при операциях вытяжки или отбортовки, но и при всех операциях, когда формируется пространственная выпуклая стенка из первоначальной плоской заготовки или заготовки одинарной кривизны.

При этом необходимо учитывать такой эффект, как разнородность трения между полиуретаном, заготовкой и стальным инструментом, особенно при деформировании относительно толстых заготовок (рис. 7). Такое явление объясняется «абсолютной» твердостью стального инструмента (матрицы) и реальной твердостью эластичной среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмар – М. : Наука, 1967. – 984 с.
2. Яковлев С. С. Условие потери устойчивости стенки трубной заготовки из анизотропного материала / С. С. Яковлев, Д. В. Дудка – Известия ТулГУ. Технические науки, 2011. – Вып. 1. – С. 14–21.
3. Яковлев С. С. Критерий локальной потери устойчивости ортотропного анизотропно упрочняющегося листа / С. С. Яковлев, К. С. Ремнев. – Известия ТулГУ. Технические науки, 2011. – Вып. 4. – С. 13–21.
4. Яковлев С. С. Критерий локальной потери устойчивости ортотропного анизотропно упрочняющегося листа / С. С. Яковлев, К. С. Ремнев. – Известия ТулГУ. Технические науки, 2011. – Вып. 4. – С. 109–113.
5. Исаченков Е. И. Штамповка резиной и жидкостью [Текст] / Е. И. Исаченков. – М. : Машиностроение, 1967. – 367 с.
6. Бирюков Н. М. Теоретические основы гофрообразования при вытяжке деталей летательных аппаратов из листовых заготовок : дисс. на соиск. уч. степ, док-ра техн. наук / Н. М. Бирюков. – М., 1974. – 291 с.
7. Пашкевич А. Г. Гофрообразование при обжиге тонкостенных оболочек осевым усилием деформирования / А. Г. Пашкевич, А. В. Орехов. – Известия вузов. – Машиностроение, 1979. – № 10. – С. 122–126.
8. Предотвращение гофрообразования при обжиге тонкостенных цилиндрических оболочек / М. Н. Горбунов [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство, 1977. – № 1. – С. 18–20.

REFERENCES

1. Vol'mir A. S. Ustojchivost' deformiruemykh sistem / A. S. Vol'mar – M. : Nauka, 1967. – 984 s.
2. Jakovlev S. S. Uslovie poteri ustojchivosti stenki trubnoj zagotovki iz anizotropnogo materiala / S. S. Jakovlev, D. V. Dudka – Izvestija TulGU. Tehniceskie nauki, 2011. – Vyp. 1. – S. 14–21.
3. Jakovlev S. S. Kriterij lokal'noj poteri ustojchivosti ortotropnogo anizotropno uprochnjajushhegosja lista / S. S. Jakovlev, K. S. Remnev. – Izvestija TulGU. Tehniceskie nauki, 2011. – Vyp. 4. – S. 13–21.
4. Jakovlev S. S. Kriterij lokal'noj poteri ustojchivosti ortotropnogo anizotropno uprochnjajushhegosja lista / S. S. Jakovlev, K. S. Remnev. – Izvestija TulGU. Tehniceskie nauki, 2011. – Vyp. 4. – S. 109–113
5. Isachenkov E. I. Shtampovka rezinoj i zhidkost'ju [Tekst] / E. I. Isachenkov. – M. : Mashinostroenie, 1967. – 367 s.
6. Birjukov N. M. Teoreticheskie osnovy gofroobrazovanija pri vytjazhke detalej letatel'nyh apparatov iz listovyh zagotovok : diss. na soisk. uch. step, dok-pa tehn. nauk / N. M. Birjukov. – M., 1974. – 291 s.
7. Pashkevich A. G. Gofroobrazovanie pri obzhime tonkostennyh obolochek osevim usiliem deformirovanija / A. G. Pashkevich, A. V. Orehov. – Izvestija vuzov. – Mashinostroenie, 1979. – № 10. – S. 122–126.
8. Predotvrashhenie gofroobrazovanija pri obzhime tonkostennyh cilindricheskikh obolochek / M. N. Gorbunov [i dr.] // Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo, 1977. – № 1. – S. 18–20.

Адаменко Б. И. – гл. конструктор ГАХК «АРТЕМ»

Борисевич В. В. – доц. «ХАИ»

Морголенко А. С. – ст. науч. сотр. «ХАИ»

ГАХК «АРТЕМ» – Государственная акционерная холдинговая компания «АРТЕМ», г. Киев;

«ХАИ» – Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков.

E-mail: vladimir_borys@yahoo.ca

Статья поступила в редакцию 13.03.2014 г.