

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОБОЛОЧЕК В ОПЕРАЦИЯХ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ

© 2010 А.В. Ткачѳв¹, В.И. Корольков²

¹ ОАО «Воронежское акционерное самолѳостроительное общество»

² Воронежский государственный технический университет

Поступила в редакцию 01.04.2010

Рассматривается подход к оценке вероятности гофрообразования при ротационной вытяжке тонкостенных заготовок.

Ключевые слова: гофрообразование, ротационная вытяжка, тонкостенная заготовка

Потеря устойчивости пластического сжатия в окружном направлении вызывает образование гофров и является наиболее часто наблюдаемым технологическим отказом при ротационной вытяжке без преднамеренного утонения. При ротационной вытяжке с утонением потери устойчивости в форме гофрообразования практически не наблюдаются. Возможно лишь образование гофр при обратном способе вытяжки с утонением вследствие упругой потери устойчивости. Определение критической силы сжатия для этого случая рассматривается во многих работах, например [1, 2]. Однако так как деформирование происходит на оправке, то эта потеря устойчивости выражается в небольшом отклонении от цилиндричности заготовки. Это явление в большинстве случаев не рассматривается как технологический отказ и не оказывает заметного влияния на качество детали. Образование кольцевых складок возможно при деформировании очень тонких заготовок $h_0 < 0,4$ мм, если превышена допустимая степень редукиции на проходе. Но чаще в этом случае вначале произойдет отказ в виде шейкообразования или разрушения. Поэтому гофрообразование при ротационной вытяжке с утонением рассматривать не будем.

На основе наблюдений можно утверждать, что гофрообразование при ротационной вытяжке без преднамеренного утонения зависит от нескольких факторов. Среди них увеличивают вероятность гофрообразования:

увеличение подачи инструмента на оборот, f ; уменьшение ширины фланца, F ; уменьшение толщины заготовки, h_0 ; уменьшение диаметра ролика, D_R . В работе [3] утверждается, что предсказать гофрообразование можно, опираясь на линейную зависимость, в которой коэффициент пропорциональности зависит в основном от диаметра деформирующего ролика. Эта зависимость получена на основе экспериментальных данных для однопроходной вытяжки с широким фланцем. Однако гофрообразование при этом виде обработки наблюдается, как правило, при подходе инструмента к краю заготовки, т.е. при небольшой ширине фланца. В этой области формула не работает.

При многопроходном (ступенчатом) деформировании наступление неустойчивости обусловлено не накопленной деформацией, а приращением деформации на данном проходе. Предельное устойчивое приращение окружной деформации при сжатии можно определить, зная число волн возмущения (гофров). Для случая осесимметричного деформирования из [4] получим формулу для предельного приращения окружной деформации:

$$\Delta \varepsilon_{\varphi}^* = -0,14 \lambda^2 \cdot \left(\frac{h}{\rho} \right)^2, \quad (1)$$

где λ – число волн возмущения; h – толщина оболочки; ρ – удаление от оси вращения.

Формула (1), очевидно, предсказывает начальный момент зарождения волн. Так, на основании опыта изготовления деталей из малоуглеродистой и нержавеющей сталей цилиндрической, конической и оживальной формы диаметром 500-700 мм из заготовки толщиной 3 мм можно утверждать, что число

Ткачѳв Александр Васильевич, первый заместитель генерального директора. E-mail: admin@air.vrn.ru
Корольков Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой самолѳостроения. E-mail: korolkov_vi@bk.ru

образующихся гофр равно от 14 до 21. Приращение деформации, посчитанное по формуле (1), для таких деталей получается близким к нулю.

Предельное приращение деформации зависит от показателя упрочнения материала, о чем свидетельствуют наблюдения и данные работы. При этом, если с увеличением показателя упрочнения вероятность шейкообразования уменьшается, то вероятность гофрообразования, наоборот, увеличивается. Так как приращение деформаций на проходе зависит от относительной подачи на оборот, то в качестве предельного параметра можно рассматривать подачу инструмента на оборот f . Определить предельную подачу можно по полуэмпирической формуле, полученной на основе экспериментов и зависимостей:

$$f_{\text{пр}} = 3 \cdot \exp(-5,8n) \cdot \frac{h^2 \cdot F}{\rho \cdot \cos \vartheta} \quad (2)$$

Здесь n – показатель упрочнения; F – ширина фланца; h – толщина оболочки; ϑ – угол между касательной к оболочке и осью X ; ρ – удаление точки от оси вращения. Из этой формулы видно, что с увеличением угла ϑ предельная подача возрастает, следовательно, уменьшается и вероятность гофрообразования. При $\vartheta = \pi / 2$ имеем предельный случай – цилиндрическая оболочка. Подача $f_{\text{пр}}$ стремится при этом к бесконечности, что подтверждается опытными данными, цилиндрические участки оболочки не подвержены гофрообразованию.

На проходе относительную подачу не изменяют, хотя современные системы ЧПУ позволяют варьировать подачи. Изменение подачи вызывает некоторый скачок в скорости движения ролика, провоцирующий возмущение, способное зародить гофр. Поэтому для назначения подачи необходимо определить $f_{\text{пр}}$ для разных точек оболочки. Выделив из полученных значений минимальное, назначаем подачу по формуле

$$f = f_{\text{пр}} / n_c, \quad (3)$$

где n_c – коэффициент запаса по устойчивости сжатия ($n_c > 1$).

Недостатком формулы (2) является то, что она в большей степени приемлема для деталей, формообразование которых осуществляется с большим фланцем, например, деталей ступенчатой формы или при однопро-

ходной вытяжке из листа. Если в процессе формообразования многопроходной вытяжкой фланец мал, то эта формула дает заниженные значения $f_{\text{пр}}$. Так, возникновение невысоких гофр на заготовке с небольшим фланцем не всегда является браковочным признаком. Такие гофры могут саморазглаживаться при правильном ведении процесса.

Механизм саморазглаживания заключается в следующем. Пусть в какой-то момент времени нарушается условие устойчивости сжатия. С этого момента приращение окружной деформации можно рассматривать как поперечную деформацию при одноосном растяжении элемента оболочки в меридиональном направлении. В операциях ротационной вытяжки, за исключением раздачи и отбортовки, $\Delta \varepsilon_m > 0$, $\Delta \varepsilon_\varphi < 0$. При одноосном растяжении изотропного материала отношение главных деформаций равно $\alpha = \frac{\Delta \varepsilon_\varphi}{\Delta \varepsilon_m} = -0,5$.

Следовательно, если $\Delta \varepsilon_\varphi \geq 0,5 \Delta \varepsilon_m$, то сжимающих напряжений в окружном направлении не возникает, а условие

$$\Delta \varepsilon_\varphi = -0,5 \cdot \Delta \varepsilon_m \quad (4)$$

можно считать предельным для изотропного материала. Для трансверсально-изотропного материала условие (4) запишется в виде

$$\Delta \varepsilon_\varphi = \alpha_0 \cdot \Delta \varepsilon_m, \quad (5)$$

где α_0 – отношение главных деформаций при одноосном растяжении. Соответственно, условие

$$\Delta \varepsilon_\varphi > \alpha_0 \cdot \Delta \varepsilon_m \quad (6)$$

будет условием саморазглаживания гофр.

Для трансверсально-изотропного материала с параметром анизотропии r параметр α_0 определяется по формуле

$$\alpha_0 = -\frac{r}{1+r}. \quad (7)$$

Окончательно условие отсутствия гофрообразования запишем в виде

$$\frac{\Delta \varepsilon_\varphi}{\alpha_0 \Delta \varepsilon_m} \geq 1 \quad (8)$$

При ротационной вытяжке, особенно многопроходной, реализуются сложные траектории движения инструмента и, как следствие, различное деформированное состояние оболочки вдоль меридионального сечения. Нарушение условия (8) на одном или даже на нескольких небольших несложных участках не обязательно должно привести к появлению гофр. Избыток металла на небольшом участке перераспределяется на соседних участках за счет локальности и цикличности деформирования. Поэтому необходимо рассматривать вероятность гофрообразования.

Определим вероятность гофрообразования на проходе. При расчете кинематики процесса и деформированного состояния используется линейное конечно-элементное описание меридионального сечения оболочки. Требуется установить вероятность наступления гофрообразования при выполнении прохода на массиве событий ξ_i для каждого элемента оболочки i , определяемых выражением

$$\xi_i = \frac{\Delta \varepsilon_{\varphi_i}}{\alpha_0 \cdot \Delta \varepsilon_{m_i}} \geq 1 \quad (9)$$

Если разбиение достаточно частое, и число элементов велико, например, ≥ 50 , то вероятность отказа можно вычислить по простой формуле

$$P(\xi) = 1 - \frac{m}{n}, \quad (10)$$

где m – число случаев, когда $\xi_i \geq 1$; n – общее число случаев, т.е. в данной ситуации – число элементов. Рассчитать вероятность отказа можно и с учетом события ξ_i с помощью формулы

$$P(\xi \geq 1) = 1 - \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^1 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{1-\bar{\xi}}{\sigma} \right)^2} d\xi \quad (11)$$

где $\bar{\xi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i$ – математическое ожидание

события ξ ; $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\xi_i - \bar{\xi})^2}{n-1}}$ – среднеквадратичное отклонение.

Другим критерием наступления гофрообразования может служить отношение площадей поверхности оболочки до и после прохода

$$k_{\Gamma} = P_j / P_{j-1}, \quad (12)$$

где P_{j-1} , P_j – площадь поверхности деформируемой части оболочки до и после прохода. Если $k_{\Gamma} > 1$, то вероятность гофрообразования невелика, и наоборот.

Сравнение расчетов с опытными данными показывает, что критерий (8) хорошо фиксирует момент наступления неустойчивости по гофрообразованию, а формулы (10) и (11) достоверно определяют вероятность необратимого процесса складкообразования. При этом порогом допустимой вероятности гофрообразования следует считать величину $P=0,5$. При превышении этого значения возможность саморазглаживания гофров резко снижается.

Иногда при проектировании процесса ротационной вытяжки некоторых деталей вероятность гофрообразования получается достаточно высокой. Бытующее мнение многих технологов, что уменьшением подачи f всегда можно избежать гофрообразования, неверно. Формула (3) является весьма приближенной и не отражает многих факторов, влияющих на предельную подачу, таких, например, как диаметр и радиус рабочей кромки ролика, угол установки ролика, форму траектории движения инструмента и др. К тому же уменьшение подачи снижает производительность процесса. Поэтому, кроме уменьшения относительной подачи, увеличения площади контакта ролика и заготовки, разупрочнения с помощью термообработки, можно рекомендовать следующий прием разглаживания гофров на обратных проходах. Область заготовки между фланцем и оправкой наиболее часто подвержена гофрообразованию в начальной стадии развития. Если реализовать преобладание растягивающих меридиональных деформаций в этой области, то гофры уменьшаются. Для этого на обратном проходе осуществляется отступ не менее, чем на треть длины средней линии этой консольной зоны, внедрение – плавный вход ролика в контакт с заготовкой, и обжатие участка заготовки между точками 2 и 3 (рис. 1). При такой форме траектории фланец приподнимается, что увеличивает его жесткость, и получается вариант деформирования, близкий к деформированию промежуточной зоны. Жесткий фланец практически не подтягивается в зону деформации, поэтому деформирование происходит за счет увеличения площади поверхности данной зоны. А увеличение поверхности возможно только за счет растягивающих деформаций, которые и способствуют разглаживанию возникших

волн. Однако успех описанного приема зависит от правильного выбора точки касания заготовки роликом, угла касания, подачи и плавности движения ролика. Этот прием эффективен при ручном управлении или с помощью ЧПУ. При управлении с помощью гидрокопировального устройства достичь положительного результата практически невозможно. Интенсивные

обратные проходы при этом обычно ускоряют процесс гофрообразования. Гофры, образовавшиеся на фланце, разгладить удается очень редко. Всегда дает положительные результаты только снятие остаточных напряжений с помощью подрезки фланца резцом или разупрочняющая термическая обработка.

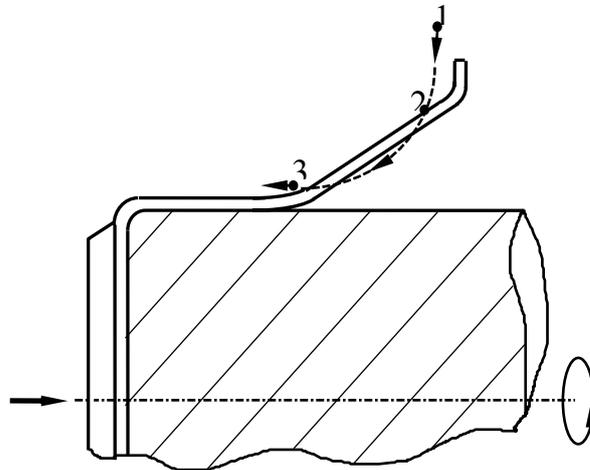


Рис. 1. Траектория движения ролика на обратном проходе при разглаживании гофров

Выводы: моделирование процесса позволяет определить момент зарождения гофров, опробовать варианты их предупреждения или устранения и спроектировать процесс с некоторым запасом. Такой подход показал свою эффективность в предупреждении технологических отказов, в создании стабильного устойчивого технологического процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
2. Григолюк, Э.И. Устойчивость оболочек / Э.И. Григолюк, В.В. Кабанов. – М.: Наука, 1978. – 359 с.
3. Hayama, M. Deformation Modes and Wimpkung of Flange on Shear Spinning / M. Hayama, T. Murota, H. Kudo // Bul. JSME. – 1966. – V.9. – P. 423.
4. Дель, Г.Д. Устойчивость пластического сжатия листов // Изв.вузов. Строительство и архитектура. – 1987. - №1. – С. 28-31.

**RESEARCH OF SHELL STABILITY IN OPERATIONS OF
ROTATIONAL ROLLING OUT**

© 2010 A.V. Tkachyov¹, V.I. Korolkov²

¹JS «Voronezh Aircraft Building Joint Stock Company»

²Voronezh State Technical University

The approach to an estimation of goffering forming probability is considered at a rotational rolling out of thin-walled workpieces.

Key words: *goffering forming, rotational rolling out, thin-walled preform*

Alexander Tkachyov, First Assistant to the General Director.

E-mail: admin@air.vrn.ru

Vladimir Korolkov, Doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of the Aircraft Building Department. E-mail: korolkov_vi@bk.ru