

## **Исследование потери устойчивости при формоизменении цилиндрических тонкостенных заготовок**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ"*

Разработана методика моделирования процесса формоизменения тонкостенных заготовок с учетом возможности потери устойчивости. Методика основана на проведении численного моделирования различных видов потери устойчивости с учетом пластического деформирования заготовки. Учтены различные факторы, а именно продольная и радиальная составляющие нагрузки. Показано, что полный учет параметров потери устойчивости возможен только при 3D моделировании. На примере тестовой задачи проведена оценка погрешности расчета потери устойчивости с использованием предложенной методики. Сформулированы задачи дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** потеря устойчивости, гофр, формоизменение, математическое моделирование, тонкостенная заготовка

### **Введение**

При производстве деталей трубопроводов немаловажное значение имеет штамповка наконечников, переходников и законцовок. Форма заготовок для таких деталей представляет собой тонкостенный цилиндр, а исходный материал – листовая или трубный полуфабрикат. Часто встречающимся элементом таких деталей является поперечный гофр или фланец. Такие детали получают в подавляющем большинстве случаев по схеме раздачи-обжима каким-либо методом гидроэластичной штамповки.

Эта операция связана с некоторыми трудностями, прежде всего с дефектами типа разрушения вследствие исчерпания ресурса пластичности, чрезмерным утонением и складкообразованием или различными видами потери устойчивости.

В то же время необходимо отметить возможность получения данного элемента формы в основном за счет потери устойчивости, т.е. при штамповке существует возможность влиять на формообразование элементов типа гофра с помощью управления потерей устойчивости. Суть подхода состоит в том, что при образовании гофра как следствия потери устойчивости не происходит утонения заготовки, напряженно-деформированное состояние гораздо более равномерно, что не вызывает опасности разрушения.

### **Постановка задачи исследования**

Классическое решение задачи НДС цилиндра для области упругих деформаций дано Г. Ламе, а также А. В. Гадолиным. В своей работе «Пластичность» А. А. Ильюшин много внимания уделил вопросам устойчивости цилиндрических оболочек за пределами упругости [1]. Одним из фундаментальных трудов считается монография А.С. Вольмира «Устойчивость упругих систем», где достаточно полно рассмотрена проблема нелинейных задач теории устойчивости цилиндрических оболочек [2]. Основные операции штамповки деталей из трубчатых заготовок исследованы в работе М. Н. Горбунова [3], где получены аналитические зависимости для расчета силовых и технологических параметров. Анализ процесса деформирования цилиндрической оболочки со свободными и неподвижными тор-

цами изложен в работе Е. И. Исаченкова [4]. Из современных работ можно упомянуть исследования Е.И. Третьяковой [5], в которых разработана математическая модель деформирования трубных заготовок в условиях плоской задачи с учётом анизотропии механических свойств и описаны условия потери устойчивости заготовки при обжиге в зависимости от параметров инструмента и заготовки, а также В. И. Фоменко [6], где рассмотрены условия, позволяющие избежать потери устойчивости при формообразовании гофров как облегченных фланцев.

Необходимо отметить большую роль начальных несовершенств системы, что существенно уменьшает критические значения нагрузок. С учетом этого поступают некоторые современные исследователи, моделируя процесс потери устойчивости фланца при вытяжке коробчатой детали пуансоном с плоским торцом заданием геометрически неравномерной сетки КЭ [7], учитывая неравномерность заготовки по толщине (разнотолщинность приводит к изменению требуемых для деформирования нагрузок в различных сечениях, что косвенно моделирует физическую неоднородность). Отклонение геометрии вводили по равномерному закону в диапазоне  $\pm 5\%$  от номинала. Основанием для выбора указанного диапазона отклонений послужил анализ допусков на размер по толщине и колебаний механических свойств широкого ассортимента листовых материалов. Стоит отметить, что подобные несовершенства КЭ модели возможны и непреднамеренно благодаря некорректному разбиению на сетку КЭ, приближенному характеру ее модификации при нахождении конечного решения.

Можно сделать вывод об ограниченности современных исследований моделирования процессов листовой штамповки созданием упрощенных двухмерных моделей и рассмотрением процесса потери устойчивости только лишь как фактор, ограничивающий возможности процессов обжима-раздачи. Недостатки исследования потери устойчивости в области моделирования процессов формообразования тонкостенных заготовок особенно проявляются в сфере создания полных трехмерных моделей формообразования таких заготовок и в использовании потери устойчивости как формообразующего фактора при листовой штамповке пространственных тонкостенных заготовок.

Данная работа посвящена исследованию возможности использования систем трехмерного компьютерного конечно-элементного анализа для моделирования различных видов потери устойчивости и степени достоверности получаемых при этом результатов.

### Метод решения

Потерей устойчивости считается начало больших перемещений  $\{u\}$  при отсутствии существенных увеличений нагрузок (рис. 1).

Прежде всего необходимо различать классическую постановку задачи как нахождение собственных значений при заданных граничных условиях. Примеры потери устойчивости при такой постановке задачи представлены на рис. 2.

В системах конечно-элементного анализа можно находить пределы устойчивости систем, решая как линейную задачу нахождения собственных значений, так и нелинейную задачу.

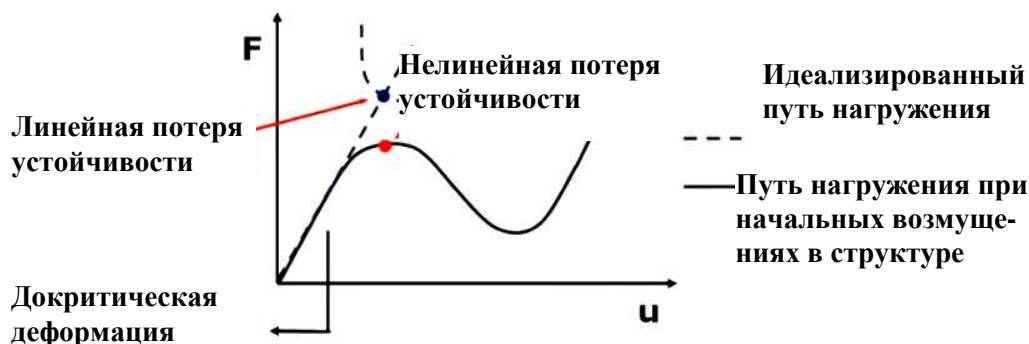


Рис. 1. Зависимость перемещений от нагрузки при линейной и нелинейной потере устойчивости

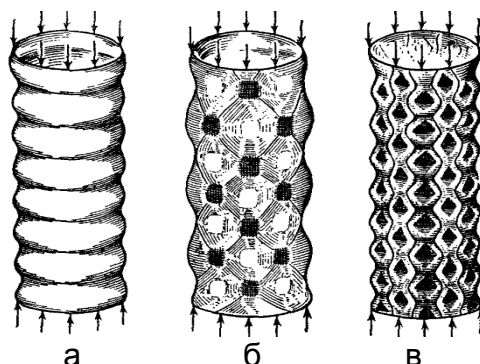


Рис. 2. Различные формы выпучивания оболочки [2]: а – осесимметричная, б – «шахматная», в – ромбовидная

Решение линейной задачи предсказывает теоретическое сопротивление потери устойчивости идеальной упругой системы или так называемые точки бифуркации, что эквивалентно классическому решению Эйлера. Несмотря на то, что критические уровни для реальных систем существенно меньше, решения, найденные по классической теории, могут быть использованы как начальные возмущения для получения более реальных решений. Кроме того, получение их не стоит больших затрат компьютерных ресурсов.

Чтобы найти решение, в системе КЭ анализа сперва должно быть найдено НДС для состояния перед потерей устойчивости

$$\{P_0\} = [K_e]\{u_0\}, \quad (1)$$

где  $P_0$  – первоначально приложенная нагрузка.

При этом решается система уравнений равновесия в приращениях

$$\{P_0\} = [[K_e] + [K_\alpha(\sigma)]]\{\Delta u\}, \quad (2)$$

где  $P$ ,  $u$  и  $\sigma$  – приложенная нагрузка и соответствующие ей перемещение и напряжение соответственно;

$[K_e]$  – упругая матрица жесткости;

$[K_\alpha(\sigma)]$  – начальная матрица напряжений.

Полагая, что НДС системы перед потерей устойчивости является линейной функцией приложенной нагрузки:

$$\{P\} = \lambda\{P_0\}, \quad \{u\} = \lambda\{u_0\}, \quad \{\sigma\} = \lambda\{\sigma_0\}, \quad (3)$$

результатирующее уравнение в приращениях для всего диапазона начального нагружения можно записать как

$$\{\Delta P\} = [[K_e] + \lambda [K_\alpha(\sigma_0)]]\{\Delta u\}. \quad (4)$$

Начало потери устойчивости будет соответствовать условию приближительного равенства нулю приращения нагрузки при дальнейшем увеличении перемещений:

$$\Delta P \approx 0. \quad (5)$$

В результате имеем

$$[[K_e] + \lambda [K_\alpha(\sigma_0)]] \{\Delta u\} = \{0\}, \quad (6)$$

что требует выполнения

$$\det [[K_e] + \lambda [K_\alpha(\sigma_0)]] \{\Delta u\} = \{0\}. \quad (7)$$

В КЭ модели с  $n$  степенями свободы данное уравнение выражается в многочлене  $n$ -го порядка относительно  $\lambda$  (собственных значений). Собственный вектор  $\{\Delta u\}_n$  представляет собой в этом случае деформацию, наложенную на систему во время потери устойчивости. Упругая критическая нагрузка  $P_{cr}$  определяется самым нижним рассчитанным пределом  $\lambda$ .

Задача о продольном сжатии тонкостенной цилиндрической оболочки с полностью закрепленными концами была смоделирована в системах ABAQUS и ANSYS. Была задана модель идеально упругого и билинейно изотропно упрочняющегося пластичного материала. Задаются плотность материала, модуль упругости, предел текучести и касательный модуль пластичности (0 – для идеально пластичного тела без упрочнения). Диаметр тонкостенной оболочки в два раза меньше высоты, и толщина равна 0.01 диаметра. В ABAQUS были получены чисто теоретические собственные значения колебаний оболочки (рис.3). Видно, что результаты вполне соответствуют теоретически предсказанным на рис. 2.

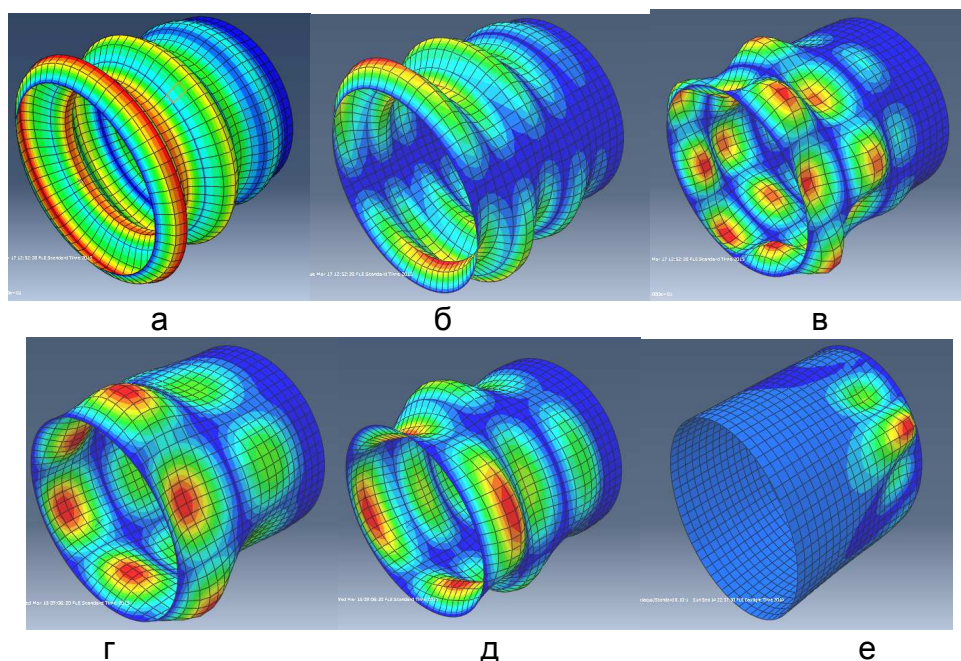


Рис. 3. Результат моделирования потери устойчивости в классической постановке путем нахождения собственных значений при полной заделке концов

При моделировании реальных процессов штамповки тонкостенных цилиндрических заготовок необходимо находить нагрузки, определяя всю историю нагружения. Кроме того, потеря устойчивости должна происходить за пределами упругости, т.е. необходимо учитывать нелинейность задачи, а в этом случае она

представляет собой, если так можно выразиться, дважды нелинейную проблему.

В ANSYS задается в первом случае полная заделка нижней грани заготовки. Верхняя грань лишена всех трансляционных степеней свободы, кроме осевой (условия ограничения перемещения грани – строго вдоль цилиндрической поверхности, т.е. задано ограничение цилиндрической поверхностью инструмента) (рис. 4).

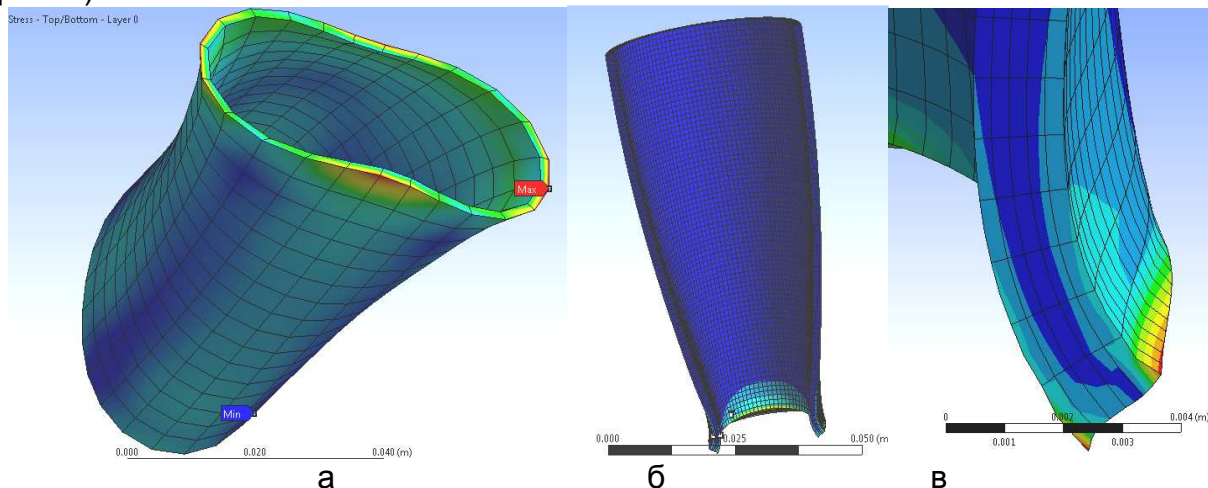


Рис. 4. Моделирование потери устойчивости за пределами упругости при заделке одного конца: а – общий вид измененной формы; б – распределение напряжений на сечении; в – распределение напряжений по толщине

На рис. 4,в показано распределение напряжений по толщине. Кроме того можно определить утонение-утолщение в пределах погрешности 10...20%, что вполне приемлемо для процессов листовой штамповки.

Во втором случае заделка концов цилиндрической оболочки отсутствует. По нижней грани задано условие ограничения перемещений в виде лишенной трения стационарной опоры. В обоих случаях временной шаг должен быть достаточно малым, чтобы удовлетворить стабильности решения, что зависит от степени дискретизации системы и глобальной жесткости.

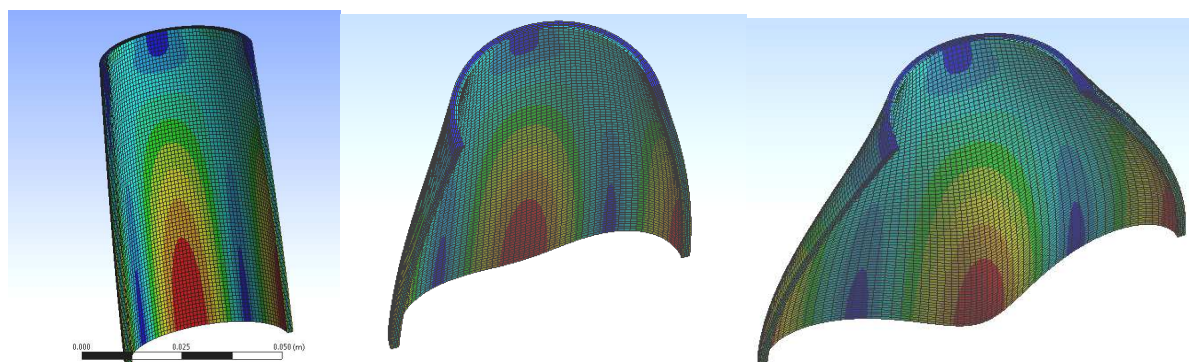


Рис. 5. Стадии потери устойчивости за пределами упругости при моделировании отсутствия заделки концов

Как видно из рис. 5, в начале пластической деформации образуются четыре симметричные области пластической деформации. В итоге заготовка теряет устойчивость с образованием продольных гофров.

Для проверки достоверности КЭ моделей была проведена серия экспери-

ментов, в которой пять цилиндрических образцов диаметром 38 мм, толщиной 1.5 мм и различной высоты (25, 35, 50, 70 и 90 мм) из стали X18H9T были подвергнуты действию осевой нагрузки. Результаты показаны на рис. 6 и 7. Потеря устойчивости проявилась в двух видах. На рис. 6 показан вариант осесимметричной потери устойчивости, близкий к результатам моделирования на рис. 3,а. Явное отличие заключается в отсутствии формообразования регулярных повторяющихся гофров, что объясняется влиянием граничных условий на торцах цилиндрических заготовок. При дальнейшем увеличении нагрузки был получен вариант, показанный на рис. 7, что соответствует модели на рис. 4, т.е. при этом формуются продольные гофры. Кроме того, было выяснено, что относительная высота образца практически не влияла на особенности потери устойчивости.

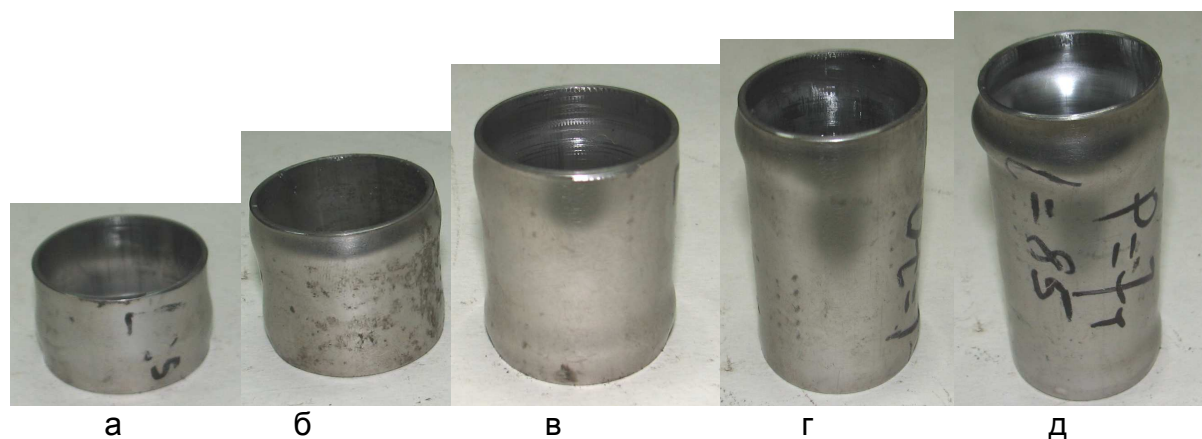


Рис. 6. Экспериментальная проверка потери устойчивости для образцов различной высоты



Рис. 7. Формообразование продольных гофров при дальнейшем увеличении нагрузки на образец

## Выводы

1. Как в ABAQUS, так и в ANSYS возможно моделирование потери устойчивости, что будет аналогично определению точек бифуркации согласно классической теории.

2. Для моделирования реальных процессов листовой обработки металлов необходимо учитывать нелинейность процессов, а именно физическую, геометрическую нелинейности, а также влияние начальных несовершенств, как физических, так и геометрических, что приводит к множественной нелинейности задачи.

3. Экспериментальная проверка подтвердила, что относительная высота образцов не влияет на особенности формообразования поперечных гофров. Поперечные гофры появляются только в непосредственной близости к торцам. На появление продольных складок оказывает влияние величина осевой нагрузки. Решающее значение для проявления особых режимов системы имеют различного рода несовершенства геометрии и свойств заготовки, а также граничные условия, что позволяет скорректировать дальнейшее моделирование реально протекающих процессов с учетом потери устойчивости.

Проведенные натурные и компьютерные эксперименты позволяют наметить и скорректировать дальнейшее исследование в области управления потерей устойчивости тонкостенных цилиндрических заготовок в процессах обжима-раздачи и использования данного эффекта для получения бездефектных деталей.

## Список литературы

1. Ильюшин, А. А. Пластичность [Текст]: моногр. / А. А. Ильюшин. – М.: Наука, 1948. – 344 с.
2. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем [Текст]: моногр. / А. С. Вольмир. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
3. Горбунов, М. Н. Штамповка деталей из трубчатых заготовок [Текст]: моногр. / М. Н. Горбунов. – М.: Машиностроение, 1960. – 188 с.
4. Исаченков, Е. И. Штамповка резиной и жидкостью [Текст]: моногр. / Е. И. Исаченков. – М.: Машиностроение, 1967. – 367 с.
5. Третьякова, Е.И. Совершенствование изготовления сферических оболочковых изделий за счет управления устойчивостью анизотропных трубных заготовок при их обжиге : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Третьякова Е. И. – М.: МГТУ, 2010. – 119 с.
6. Фоменко, И.В. Интенсификация пластического формоизменения гофрированных элементов разъемных соединений высокоресурсного титанового трубопровода: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Фоменко И. О. – В.: ВГУИТ, 2013. – 177 с.
7. Власов, А.В. Математическое моделирование формовки криволинейного гофра [Текст] / А. В. Власов, В. А. Демин, А. Е. Калашников // Изв. вузов. Машиностроение. 1995. – № 4–6. – С. 16 – 20.

Поступила в редакцию 15.06.2015

## **Дослідження втрати стійкості під час формозміни циліндричних тонкостінних заготовок**

Розроблено методику моделювання формозміни тонкостінних заготовок з урахуванням імовірності втрати стійкості. Методика основана на проведенні числового моделювання різних видів втрати стійкості з урахуванням пластичного деформування заготовки. Ураховано різні чинники, а саме поздовжня та радіальна складові навантаження. Показано, що повне урахування параметрів можливе тільки при 3D моделюванні. На прикладі тестової задачі проведено оцінювання похибки розрахунку з використанням методики, що запропонована. Сформульовано завдання подальших досліджень.

**Ключові слова:** втрата стійкості, гофр, формозміна, математичне моделювання, тонкостінна заготовка

## **Investigation of buckling during forming of the cylindrical thinwalled blanks**

The method of modeling of the thinwalled blanks forming is elaborated with consideration of probability of buckling. Method is based on providing of numerical modeling of different types of buckling during plastic deformation of the blank. Different factors are taken into consideration. They are longitudinal and radial components of the load. It is shown, that complete consideration of the parameters is possible at 3D modeling only. Estimation of the calculation error is carried out with example of the test problem with using of the method being proposed. The further investigation task is formulated.

**Keywords:** buckling, corrugation, forming, mathematical modeling, thinwalled blank.