

Л.Б. Аксенов¹, Н.М. Потапов², С.Н. Кункин³

ГОФРООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ТОРЦЕВОЙ РАСКАТКЕ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК



¹ Леонид Борисович Аксенов,
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-9530,
E-mail: l_axenov@mail.spbstu.ru.



² Никита Михайлович Потапов
АО «НИИЭФА»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (+7) 9006429600,
E-mail: nicitanic@yandex.ru



³ Сергей Николаевич Кункин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-9530,
E-mail:kunkin@spbstu.ru.

Аннотация

В работе представлены результаты исследования процесса торцевой раскатки внутренних фланцев отбортовкой из тонкостенных трубных заготовок коническим валком. Особенностью процесса является возможная потеря устойчивости формы заготовки в виде гофрообразования, не позволяющая получать детали требуемой геометрии. На основе компьютерного моделирования систематизированы причины

потери устойчивости трубных заготовок при раскатке, определены кинематические характеристики машины и геометрические параметры заготовки, влияющие на этот процесс.

Ключевые слова: торцевая раскатка, трубная заготовка, формоизменение, потеря устойчивости, компьютерное моделирование

Введение

Отличительной особенностью операций раскатки является локальный характер приложения деформирующего усилия к торцу обрабатываемой заготовки, что позволяет существенно снизить усилие деформирования. Процессы торцевой раскатки, позволяют формировать наружные, внутренние и торцовые поверхности полых и сплошных металлических заготовок. Низкая стоимость оснастки, незначительное время подготовки производства, использование оборудования относительно небольшой мощности дают возможность применять эти процессы в мелкосерийном производстве.

При торцевой раскатке трубных заготовок конический раскатной валок, с углом наклона α , совершает поступательное движение вдоль оси заготовки со скоростью V (рис. 1).

В зависимости от типа раскатываемого фланца (наружный или внутренний) для направления течения металла используется смещение вершины конического валка относительно оси вращения трубной заготовки на некоторую величину δ от оси заготовки

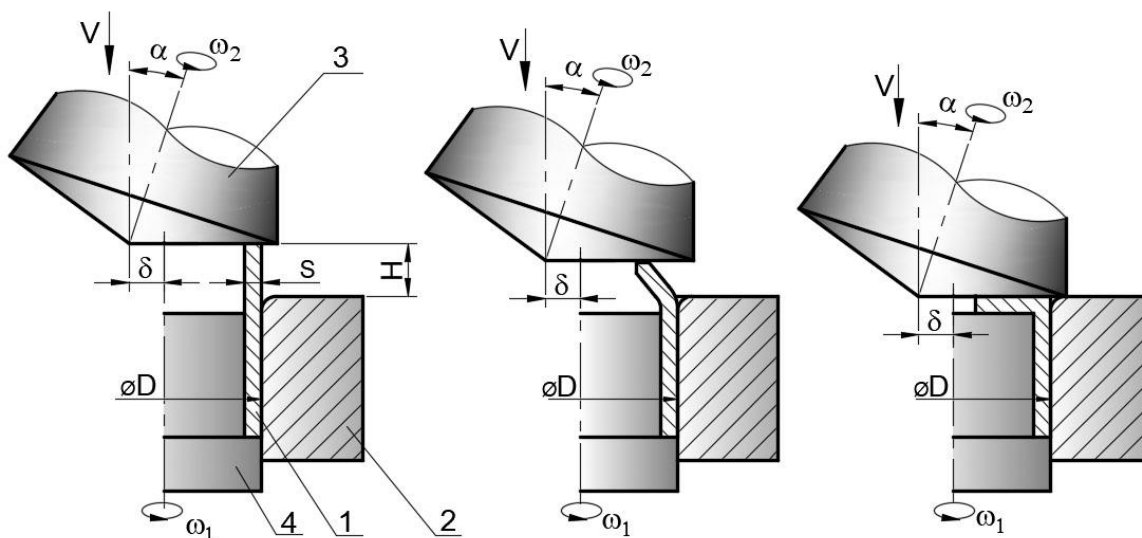


Рис. 1. Схема торцевой раскатки трубной заготовки при формировании внутреннего фланца

1 - заготовка, 2 - матрица, 3 - раскатной валок, 4 - оправка

Раскатной валок машины может получать вращательное движение от заготовки, имеющей угловую скорость вращения ω_1 , за счет сил трения на контакте (пассивный валок) или иметь собственный привод (приводной валок) и вращаться вокруг своей оси с угловой скоростью ω_2 . Заготовка представляет собой отрезок тонкостенной трубы с размерами: D - внешний диаметр заготовки, S - толщина стенки, H - высота выставленной части заготовки над торцевой поверхностью матрицы. При формировании внутреннего фланца используется смещение вершины раскатного валка относительно оси заготовки на величину δ , что обеспечивает направление деформации выставленной части заготовки к ее оси.

Проведенные многочисленные исследования процесса торцевой раскатки и его моделирование показали [1-3], что при этом процессе может происходить шесть возможных видов деформирования трубной заготовки.

Три из них можно отнести к устойчивым, монотонно развивающимся процессам. Из этих трех два процесса отбортовки внутрь и наружу (рис. 2 *а, б*) хорошо прогнозируемы. Третий процесс (рис. 2, *в*), при котором происходит осадка трубы в зоне деформации, характеризуется течением металла в двух направлениях внутрь и наружу трубной заготовки. Этот процесс устойчивый, монотонный, но трудно предсказать в каком направлении будет происходить наиболее интенсивное течение металла.

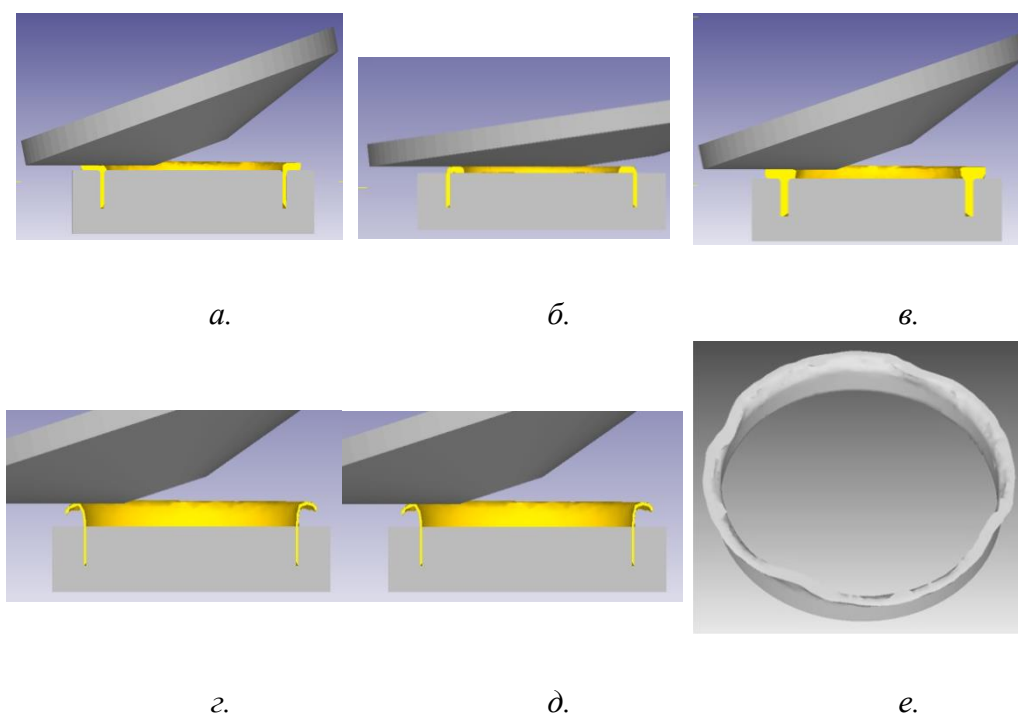


Рис. 2. Виды формоизменения трубной заготовки при торцевой раскатке

Еще три вида формоизменения заготовки (рис. 2 *г, д, е*) характеризуются тем, что место изгиба заготовки локализуется между матрицей и валком, и в зависимости от направления сил трения происходит загиб заготовки вместо отбортовки (рис. 2, *г и д*).

Вид формоизменения, представленный на рис. 2, *е*, показывает волновое формоизменение заготовки, как следствие динамической потери устойчивости. Условия возникновения этого волнового формоизменения (гофрообразования) трубных заготовок при раскатке требуют специального анализа.

Цель исследования – на основе компьютерного моделирования определить причины и условия возникновения динамической потери устойчивости трубных заготовок в процессе торцевой раскатки внутренних фланцев отбортовкой в виде волнового изменения поверхности ее деформируемой фланцевой части.

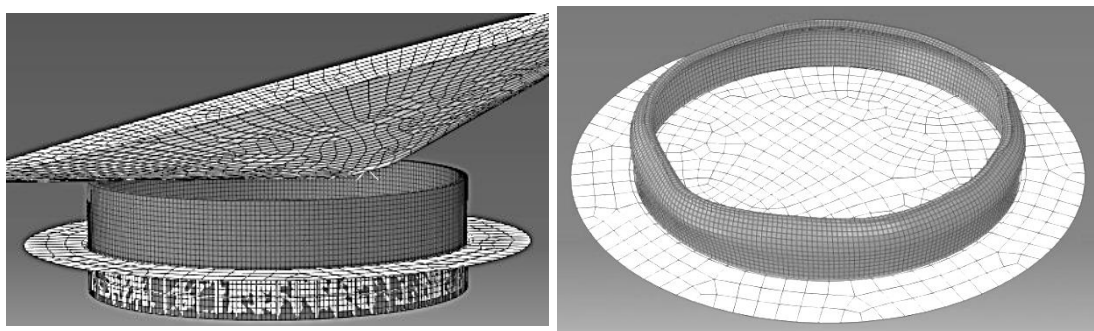
Метод исследования

Исходя из результатов исследования процессов торцевой раскатки на основе компьютерного моделирования [4-6], и с учетом кинематических особенностей процесса и локального деформирования заготовки, в работе выбрано моделирование с использованием вычислительного комплекса «Abaqus-22», в котором можно задать любое количество перемещений геометрий инструмента и заготовки. Основные параметры процесса, принятые при моделировании процесса, приведены в Табл. 1. Инструменты (раскатной валок, матрица и оправка) рассматривались как твердые недеформируемые тела. Материал заготовки (сталь ASI-1045) считался упруго пластическим с нелинейным упрочнением.

Вид сборки конечно-элементной модели процесса раскатки, состоящий из верхнего валка, заготовки и матрицы, представлен на Рис. 3а. В результате моделирования была получена картина динамической потери устойчивости заготовки, отражающая волнообразное изменение ее формы (Рис. 3б).

Таблица 1. Параметры моделирования процесса торцевой раскатки

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Диаметр заготовки	D	мм	120
Толщина стенки заготовки	S	мм	2
Длина выставленной части заготовки	H	мм	20
Скорость поступательного движения вала	V	мм/с	1
Смещение ролика	δ	мм	30 (0.25D)
Угол наклона раскатного вала	α	град	15
Частота вращения заготовки	ω_1	рад/с	4,19
Частота вращения раскатного вала	ω_2	рад/с	3,2
Коэффициент трения между валком и заготовкой	μ	-	0,15
Материал заготовки		сталь	ASI-1045
Сетка конечных элементов		геометрия	Кубическая
Число элементов по толщине стенки заготовки		шт.	3
Общее число конечных элементов		шт.	17 424
Коэффициент Пуассона материала заготовки		-	0,3
Модуль Юнга материала заготовки		ГПа	210
Температура инструмента и заготовки		°C	20
Угол наклона фланцевой части	β	град.	20
Число образовавшихся гофр	n	шт.	6



а.

б.

Рис. 3. Конечно-элементное моделирование процесса торцевой раскатки в расчетном комплексе «Abaqus-22»: а.- исходные позиции инструмента и заготовки; б.- волнообразное изменение формы заготовки

Гофрообразование при раскате наблюдается на выставленной части трубной заготовки высотой H при ее изгибе по радиусу оправки под действием усилия со стороны раскатного вала (Рис. 4а). Момент раскатки, в который происходит потеря устойчивости заготовки, можно охарактеризовать углом наклона отгибаемой части заготовки к плоскости торца оправки – β , где $0 \leq \beta \leq \pi/2$. Значение $\beta = \pi/2$ соответствует началу процесса раскатки фланца, а $\beta = 0$ окончанию процесса.

При раскатке фланцевая часть трубной заготовки не соприкасается с оправкой и только на части поверхности заготовка контактирует с раскатным валком (Рис. 4б). Динамика потери устойчивости заготовки при раскатке связана с взаимодействием раскатного вала на заготовку, которое осуществляется по поверхности их локального контакта. На этой малой поверхности действуют вертикальные нормальные напряжения и касательные напряжения. Нормальные напряжения определяются усилием раскатки, благодаря которому осуществляют последовательный изгиб заготовки по радиусу оправки к направлению оси заготовки. Касательные напряжения, обусловлены трением между раскатным валком и заготовкой.

При отбортовке выставленной части заготовки образуется очаг пластической деформации, локализованный в месте изгиба заготовки и не оказывающий влияния на напряженно-деформированное состояние отгибаемой части заготовки. Вне пластической зоны отгибаемая часть заготовки испытывает незначительный изгиб под действием усилия раскатки и в ней действуют радиальные растягивающие и сжимающие напряжения – σ_r , разделяемые нейтральной линией. Величина этих напряжений мала и только их действие не может вызвать потерю устойчивости заготовки.

Касательные напряжения на контактной поверхности возникают из-за трения между валком и заготовкой, и появляются при несовпадении их окружных скоростей. На направление сил трения на контактной поверхности оказывает влияние направление скорости проскальзывания раскатного валка относительно заготовки. Величина касательных напряжений пропорциональна величине нормальных напряжений. Увеличение подачи (скорости поступательного движения) раскатного валка увеличивает эти напряжения. Это наиболее заметно в начальный момент раскатки при разгоне пассивного валка, обладающего значительной инерцией или высоким сопротивлением вращению.

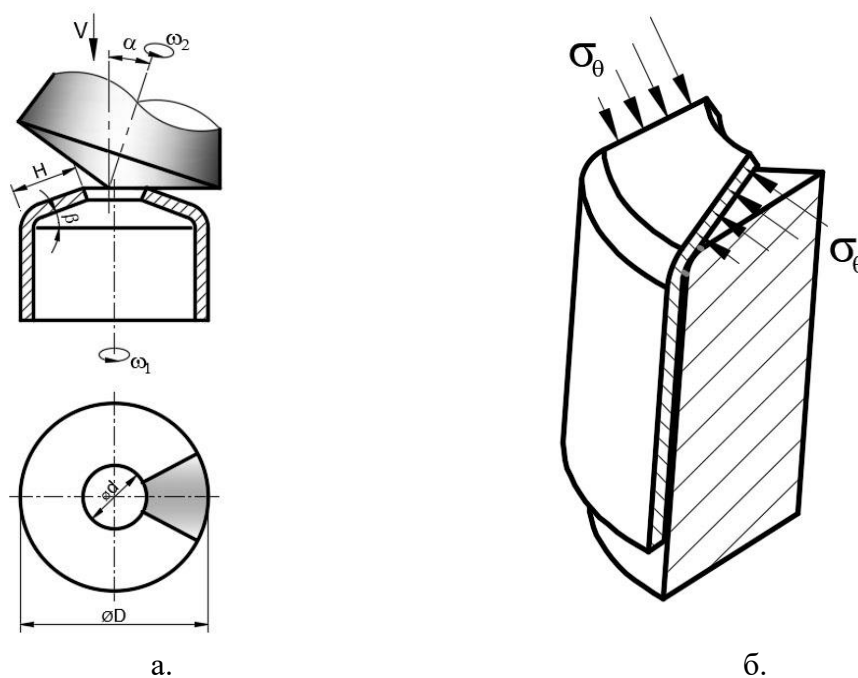


Рис. 4. Схема процесса торцевой раскатки фланца из трубной заготовки (а) и напряжения, действующие на элемент формируемого фланца (б)

Касательные напряжения от трения на контактной поверхности увеличивают тангенциальные напряжения сжатия металла и поэтому способствуют потере устойчивости заготовки. При прочих условиях, не вызывающих потери устойчивости заготовки, разница тангенциальных (окружных) скоростей точек на контактной поверхности валка и заготовки более 20% может приводить к потере устойчивости заготовки.

Появление тангенциальных сжимающих напряжений, достаточных для потери устойчивости, связано с тем, что диаметр фланцевой части заготовки с исходным диаметром D при раскатке постепенно уменьшается (текущая величина d), так как происходит закатка отверстия. Эти

напряжения неравномерно распределены по ширине фланца, возрастая от места пластического изгиба фланца к его внутреннему диаметру d . Таким образом, потеря устойчивости заготовки в виде волнистости происходит в результате сжатия отгибаемой фланцевой части трубной заготовки тангенциальными напряжениями. Усилие раскатки и силы трения на поверхности контакта раскатного вала с заготовкой способствуют этому явлению, уменьшая значения угла β . Аналогичное, но не тождественное явление происходит при глубокой вытяжке без прижима фланца [7-8]. Это явление также называют волнообразием или выпучиванием, и оно хорошо изучено в процессах вытяжки [9-11], в том числе, применительно к анизотропному металлу [12].

Способами предотвращения потери устойчивости трубной заготовки в процессе торцевой раскатки являются снижение вертикального усилия деформирования в начальный момент раскатки путем уменьшения величин подачи раскатного вала, сил трения на контактной поверхности, инерционности пассивного вала, и применение приводного раскатного вала с возможностью изменения скорости его вращения

Определенный интерес представляет предсказание числа образующихся гофров по окружности фланца. В работах по исследованию процесса вытяжки эта задача пока не решена [13]. Часть фланца, в котором исследуется потеря устойчивости, можно представить как тонкую пластинку с двумя криволинейными границами (представляющими части окружностей), и двумя прямолинейными границами с заделкой по наружному диаметру (Рис. 5а). На эту пластинку действуют сжимающие напряжения σ_θ , возрастающие от наружного края фланца к внутреннему. Близкой по форме и условиям нагружения к этой пластинке является прямоугольная пластинка (Рис. 5б), условия потери устойчивости которой, достаточно хорошо изучены [14]. При раскатке вся фланцевая часть заготовки в виде кольца находится под действием сжимающих тангенциальных напряжений. Пренебрегая кривизной этой части, можно рассматривать фланцевую часть как длинную пластинку с короткой стороной равной H и длиной равной длине окружности фланца по средней линии на данной стадии раскатки $L = \pi(D+d)/2$. Известно [15], что длинная пластинка при потере устойчивости разбивается полуволнами на части, близкие к квадратным (Рис. 5в). В рассматриваемом случае стороны квадратов равны H . Это дает возможности определить количество волн n ,

образующихся при потере устойчивости фланца $n = \frac{L}{2H}$. Учитывая, что $d = D - 2H\cos\beta$ (Рис. 4а), получим что

$$n = \frac{\pi(D - H\cos\beta)}{2H}. \quad (1)$$

Если в формулу (1) подставить значения из параметров из Табл. 1: $D=120$ мм, $H=20$ мм, и $\beta=20$ град, при которых при моделировании наблюдалось гофрообразование, то получится $n=6,47$. По Рис. 3б можно определить, что число гофров равно 6, что свидетельствует о достаточно точном расчетном определении числа образующихся гофров, несмотря на принятые допущения.

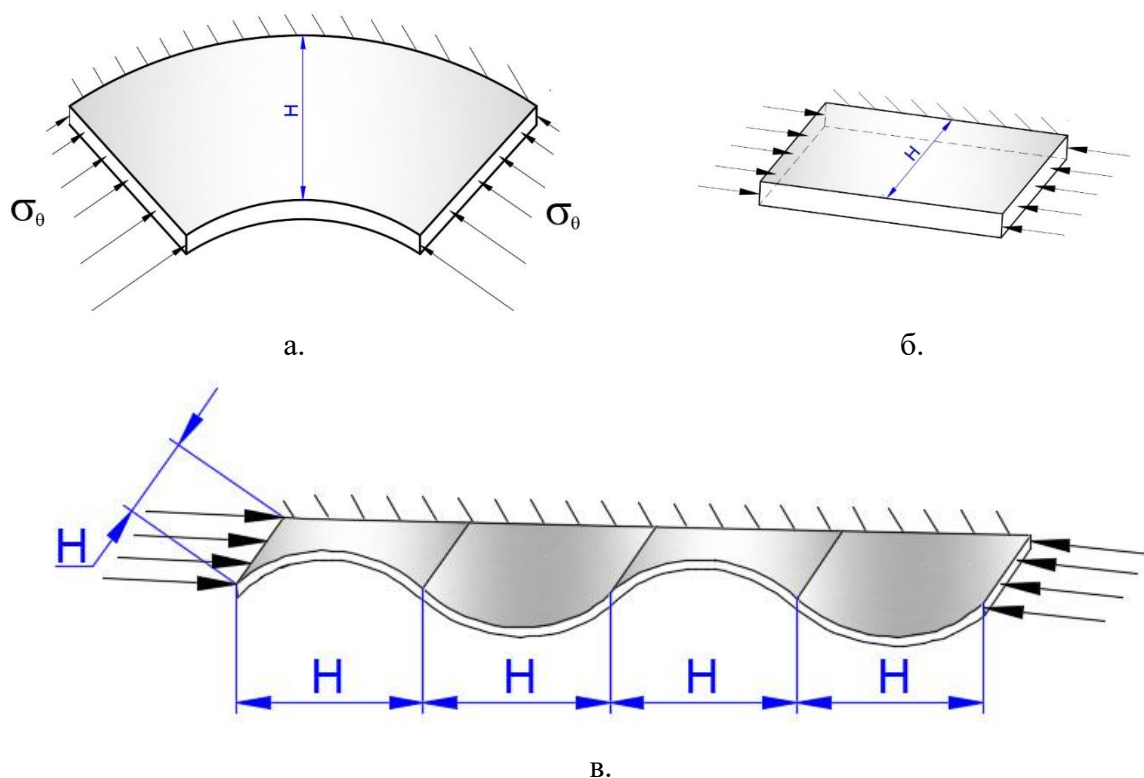


Рис. 5. Расчетная модель элемента фланца (а), пластинка с аналогичным напряженным состоянием и условиями нагружения (б), волновое изменение формы длинной пластинки при потере устойчивости (в)

Толщины стенки трубной заготовки (S) не оказывает существенного влияния на количество волн при потере устойчивости, пока предположение о том, что фланцевую часть можно рассматривать как тонкую пластинку. Это условие всегда выполняется для рассматриваемой технологии, т.к. раскатка с отбортовкой не применима к толстостенным

трубам. Но увеличение толщины стенки при прочих равных условиях снижает величину сжимающих тангенциальных напряжений и тем самым снижает возможность гофрообразования.

Геометрические параметры заготовки оказывают большое влияние на процесс гофрообразования. Такими параметрами являются S , H и D . Обычно оценивают влияние на процесс деформирования относительных параметров S/D , S/H . В данном исследовании возможно применение π -теоремы для построения произвольной функции от безразмерных комбинаций [16], определяющих характер формоизменения, «даже если конкретный вид зависимости между исходными величинами (S , H , D или S/D и S/H) неизвестен». В качестве такой функции можно использовать функцию от отношения $\frac{DH}{SS}$, например $K = \frac{DH}{100SS}$, которая при реально возможных соотношениях S , H и D , может принимать значения от 1 до 20. При этом меньшие значения K характеризуют процессы, с большой вероятностью гофрообразования, а большие значения с малой вероятностью.

Следует заметить, что обычно тонкостенные трубы с отношением $S/D = 0,01 - 0,05$ изготавливают изгибом (сверткой) листа, с последующей сваркой. Поэтому дополнительными источниками потери устойчивости могут быть анизотропия исходного листа и сварной шов, даже несмотря на его качественное исполнение. При вытяжке этот процесс исследован и его основные выводы справедливы для процесса раскатки. Влияние кристаллографии структуры на гофрообразование сказывается потому, что она определяет значение и соотношение радиальных и тангенциальных напряжений, а, следовательно, и силы, вызывающие выпучивание, а также внутренние силы и моменты, препятствующие ему. Поэтому волнистость образуется в первую очередь в тех местах фланца, где действуют максимальные тангенциальные напряжения сжатия, т.е. там, где коэффициенты поперечной деформации в плоскости листа имеют минимальное значение, а значит, формируется впадина. Это влияние может на 10-15% увеличить относительную толщину или снизить ширину раскатываемых фланцев без гофрообразования.

Выводы

- При торцевой раскатке внутренних фланцевиз тонкостенных трубных заготовок наблюдается потеря устойчивости заготовки в виде гофрообразования, происходящая под действием сжимающих тангенциальных напряжений при отбортовке фланцевой части трубной заготовки.
- Возникновению волновой потери устойчивости трубных заготовок способствуют локальный контакт раскатного вала с заготовкой, увеличивающего значения сжимающих тангенциальных напряжений.
- Количество волн гофра, зависит от высоты выставленной части и диаметра заготовки, и угла наклона отгибаемой части заготовки к плоскости торца оправки
- Снижению возможности потери устойчивости трубных заготовок в процессе торцевой раскатки способствуют уменьшение величины подачи раскатного вала, снижение трения на контактной поверхности раскатного вала с заготовкой, уменьшение инерционности пассивного вала или применение приводного раскатного вала.
- Наличие пластической зоны в месте изгиба фланцевой части заготовки по радиусу оправки не влияет на процесс гофрообразования при раскатке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Аксенов Л.Б., Кункин С.Н., Елкин Н.М. Торцевая раскатка фланцевых деталей трубных соединений. «Металлообработка», научно-производственный журнал, №3 (63), 2011 г., стр. 31-36.
- [2] Aksenov L.B., Kunkin S.N., Potapov N.M. System analysis of cold axial rotary forging of thin-walled tube blanks. Advances in Mechanical Engineering. Selected Contributions from the Conference “Modern Engineering: Science and Education”. Cham, Switzerland, 2021, pp. 20-29.
- [3] Aksenov L.B., Kunkin S.N., Potapov N.M. Axial rotary forging of inner flanges at thin wall tube blanks. Advances in Mechanical Engineering. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME). Cham, 2020. pp. 1-10. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39500-1>
- [4] Л.П.Семёнова, А.А.Семёнов, А.Н.Пасько. Формообразование наружных утолщений на стенках трубчатых заготовок. Кузнечно-

- штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2010, №9. С. 33-37.
- [5] Krishnamurthy, B., Bylya, O., Muir, L., Conway, A., & Blackwell. On the specifics of modeling of rotary forging processes. *Computer Methods in Materials Science*, (2017). Vol. 17(1), pp.22-29.
- [6] Xinghui Han, Lin Hua. Investigation on contact parameters in cold rotary forging using a 3D FE method. *Int J AdvManufTechnol* (2012) 62, pp.1087–1106.
- [7] Rashid Asfandiyarov, Georgy I. Raab, Denis Aksenov. Analysis of the Stress-Strained State of Billets Processed by Rotary Forging with Special Shape of the Tool. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, 2019, Vol. 31, pp.16-21.
- [8] Кухарь В.Д., Яковлев С.С., Ремнев К.С. Влияние технологических параметров на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2011, № 11, с. 3–10.
- [9] Логинов Ю. Н. Моделирование деформированного состояния круглой пластины при вытяжке / Ю. Н. Логинов, Б. И. Каменецкий, Г. И. Студенок // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2006. № 3. С. 26–28.
- [10] Яковлев С.С., Калашников А.Е. Устойчивости в виде гофров кольцевой пластины из анизотропного материала // *Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки*. 2007. Вып. 2. С. 138-146.
- [11] С.П. Яковлев, А.Е. Калашников, С.С. Яковлев. Складкообразование анизотропной листовой заготовки при вытяжке. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2010. Вып. 1, с.78-88.
- [12] С.С. Яковлев, К.С. Ремнев. Складкообразование при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, №9(654), 2014, с.39-46.
- [13] Vanabic D., Barlat F., Cazacu O., Kuwabara T. Advances in anisotropy and formability // *International Journal of Material Forming*. 2010. Vol. 3. P.165-189.
- [14] Я.И.Ерисов. Компьютерное моделирование влияния кристаллографии структуры на гофрообразование при вытяжке. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, т. 18, № 4(6), 2016, с.1035-1038.
- [15] С.П.Тимошенко, *Пластинки и оболочки*, Гостехиздат, 1948
- [16] Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. М.: Наука, 1971. 807 с.
- [17] Седов Л. И. *Методы подобия и размерности в механике*.—М.:Наука, 1981.— С.31.— 448с.

CORRUGATION OF THIN-WALL TUBE-BLANKS AT AXIAL ROTARY FORGING

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

²JSC «NIIEFA», St.Petersburg, Russia

Abstract

The paper presents the results of a study of the process of axial rotary forging of internal flanges by flanging from thin-walled tubular blanks with a conical roll. A feature of the process is the possible loss of stability of the blank shape in the form of corrugation, which does not allow obtaining parts of the required geometry. On the basis of computer simulation, the reasons for the loss of stability of blanks during rotary forging are systematized, the kinematic characteristics of the machine and the geometric parameters of the tube-blanks that affect this process are determined.

Keywords: rotary forging, pipe blank, forming, corrugation, computer simulation

REFERENCES

- [1] Aksenov L.B., Kunkin S.N., Elkin N.M. Tortsevaya raskatka flantsevykh detalej trubnykh soedinenij. «Metalloobrabotka», Nauchno-proizvodstvennyj zhurnal, №3 (63), 2011 g., str. 31-36.
- [2] Aksenov L.B., Kunkin S.N., Potapov N.M. System analysis of cold axial rotary forging of thin-walled tube blanks. Advances in Mechanical Engineering. Selected Contributions from the Conference “Modern Engineering: Science and Education”. Cham, Switzerland, 2021, pp. 20-29.
- [3] Aksenov L.B., Kunkin S.N., Potapov N.M. Axial rotary forging of inner flanges at thin wall tube blanks. Advances in Mechanical Engineering. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME). Cham, 2020. pp. 1-10. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39500-1>
- [4] L.P.Semyonova, A.A.Semyonov, A.N.Pasjko. Formoobrazovanie naruzhnikh utolthenij na stenkakh trubchatihkh zagotovok. Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem, 2010, №9. S. 33-37.
- [5] Krishnamurthy, B., Bylya, O., Muir, L., Conway, A., & Blackwell. On the specifics of modeling of rotary forging processes. Computer Methods in Materials Science, (2017). Vol. 17(1), pp.22-29.

- [6] Xinghui Han, Lin Hua. Investigation on contact parameters in cold rotary forging using a 3D FE method. *Int J AdvManufTechnol* (2012) 62, pp.1087–1106.
- [7] Rashid Asfandiyarov, Georgy I. Raab, Denis Aksenov. Analysis of the Stress-Strained State of Billets Processed by Rotary Forging with Special Shape of the Tool. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials* , 2019, Vol. 31, pp.16-21.
- [8] Kukharj V.D., Yakovlev S.S., Remnev K.S. Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov na obrazovanie skladok pri vihtyazhke osesimmetrichnikhkh detaley iz anizotropnogo materiala. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 2011, № 11, s. 3–10.
- [9] Loginov Yu. N. Modelirovanie deformirovannogo sostoyaniya krugloyj plastinij pri vihtyazhke / Yu. N. Loginov, B. I. Kameneckiyj, G. I. Studenok // *Izvestiya vihsshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*. 2006. № 3. S. 26–28.
- [10] Yakovlev S.S., Kalashnikov A.E. Ustoyjchivosti v vide gofrov koljcevoj plastinij iz anizotropnogo materiala // *Izv. TulGU. Ser. Tekhnicheskie nauki*. 2007. Vihp. 2. S. 138-146.
- [11] S.P. Yakovlev, A.E. Kalashnikov, S.S. Yakovlev. Skladkoobrazovanie anizotropnoj listovoj zagotovki pri vihtyazhke. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2010. Vihp. 1, s.78-88.
- [12] S.S. Yakovlev, K.S. Remnev. Skladkoobrazovanie pri vihtyazhke osesimmetrichnikhkhdetaley iz anizotropnogo materiala. *Izvestiya vihsshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* , №9(654), 2014, s.39-46.
- [13] Banabic D., Barlat F., Cazacu O., Kuwabara T. Advances in anisotropy and formability // *International Journal of Material Forming*. 2010. Vol. 3.P.165-189.
- [14] Ya.I.Erisov. Kompjyuternoe modelirovanie vliyaniya kristallografii strukturij na gofroobrazovanie pri vihtyazhke. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoyj akademii nauk*, t. 18, № 4(6), 2016, s.1035-1038.
- [15] S.P.Timoshenko, *Plastinki i obolochki*, Gostekhizdat,1948
- [16] Timoshenko S.P. *Ustoyjchivostj sterzhnej, plastin i obolochek*. M.: Nauka, 1971. 807 s.
- [17] Sedov L. I. *Metodij podobiya i razmernosti v mekhanike*. - M.: Nauka, 1981.— S.31.— 448s