

УДК 621.982:669.295

В. В. БОРИСЕВИЧ, АБУХАБЕЛ МОХАМЕД АБУБАКЕР*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОФРА ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОПЕРАЦИИ РЕДУЦИРОВАНИЯ И ГОФРООБРАЗОВАНИЯ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

Приведены результаты численного моделирования процесса гофрообразования при комбинировании операций редуцирования и гофрообразования листовых трубных заготовок. Для моделирования процесса была последовательно симулирована начальная потеря устойчивости с образованием симметричного выпучивания с последующим моделированием пластического течения. Проведено сравнение результатов моделирования при разных параметрах технологического процесса и различных соотношений размеров исходной заготовки. Показано, что использованная модель адекватно описывает процесс гофрообразования. Использование предложенной модели рекомендовано для расчётов параметров технологического процесса формообразования гофров с использованием осевой подачи материала в зону деформирования.

Ключевые слова: гофр, гофрообразование, моделирование, потеря устойчивости, пластическое течение.

Введение

Процесс обжима законцовок труб и получение гофров с дальнейшим преобразованием их в полуфланцы являются одними из наиболее распространенных процессов в листовой обработке металлов давлением в самолётостроении.

На рисунках 1 и 2 представлены широко используемые схемы получения редуцированных законцовок труб и формообразования гофров.

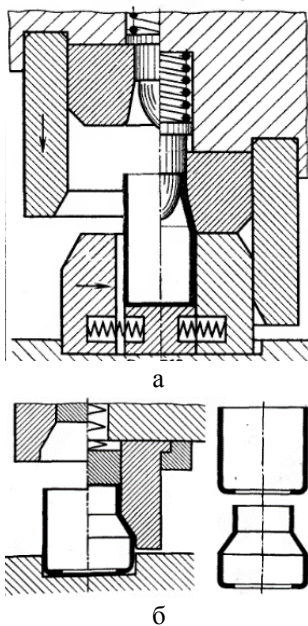


Рис. 1. Процессы редуцирования:
а – обжим конца трубы; б – обжим горловины [1]

Несмотря на отсутствие формообразующей поверхности инструмента, представленная на рис. 2 б схема позволяет получать гофры определенной геометрии с помощью только специального инструмента, хотя дальнейшие исследования не позволяют использовать данную схему для получения гофра произвольной геометрии.

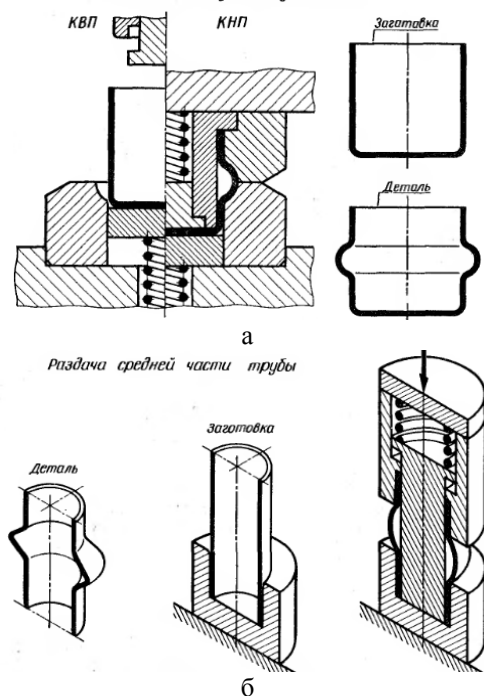


Рис. 2. Процессы формообразования гофров:
а – с использованием формообразующей поверхности инструмента;
б – свободное формообразование гофра [1]

В то же время нам представилось возможным определённый класс деталей трубчатой формы получать по полностью свободной схеме, когда геометрия гофра не будет зависеть от геометрии инструмента (рис. 3). При этом расстояние, на котором возникает гофр, можно задавать с помощью ограничительного кольца. Для этого необходимо определить границы применимости данной схемы, а также рациональное сочетание параметров технологического процесса, оказывающие определяющее влияние на геометрию гофра.

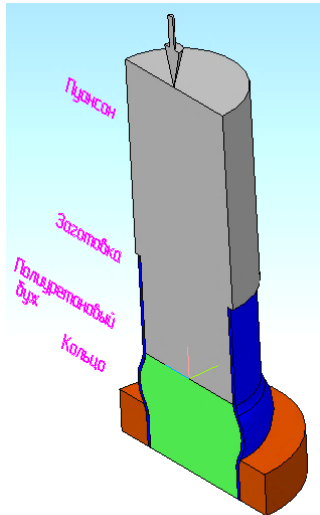


Рис. 3. Предлагаемая схема комбинирования редуцирования и формообразования гофра

Существующие на сегодняшний день аналитические модели формообразования гофров используют модели пластического течения. В работах [3 – 5] использованы различные аналитические модели процесса, например в работе [3] предложено для моделирования идеального пластического изгиба при формообразовании гофра использовать в качестве начальной геометрии форму волны, образующуюся при потере устойчивости из-за осевой деформации трубы. Представляется целесообразным использовать подобный подход последовательного комбинирования моделей потери устойчивости и пластического течения при создании математических моделей формообразования гофров на основе современных CAD/CAE-систем, что представляет собой актуальную задачу.

Описание решаемой задачи и применённой математической модели

Основное ограничение при свободном формообразовании гофра трубчатой заготовки с использо-

ванием явления потери устойчивости – это прямая зависимость начальной формы гофра, прежде всего его длины, от толщины и диаметра заготовки. Данная зависимость может быть определена с помощью следующей формулы [2]

$$l_x = \frac{\pi}{\sqrt[4]{12(1-\nu^2)}} \sqrt{R \cdot t}, \quad (1)$$

где R – радиус, t – толщина заготовки.

Было предложено получать начальную геометрию гофра, зависящую от условий потери устойчивости, при моделировании в системе конечно-элементного анализа. В итоге решение задачи потери устойчивости в пластической области будет представлена как последовательность задач, состоящих из:

- 1) статической задачи нахождения НДС при начальном приложении осевой нагрузки;
- 2) задачи по определению формы потери устойчивости и формообразованию начального гофра;
- 3) задача по определению изменения геометрии гофра вследствие пластического течения.

Все этапы расчёта проводились с использованием пакета КЭ анализа ANSYS. Была принята осесимметричная постановка задачи, которая позволила рассматривать плоскую задачу (рис. 4).

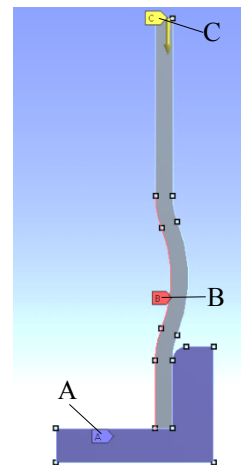


Рис. 4. Расчётная схема КЭ анализа: А – штамп, В – поверхность первичного гофра с приложенным внутренним давлением, С – приложенное к торцу цилиндрической заготовки осевое перемещение

Модель материала была принята изотропной упруго-пластической билинейно упрочняющейся, где упругие свойства задавались объёмным модулем упругости и модулем сдвига, а пластические – пределом текучести и касательным модулем.

Трением заготовки и полиуретанового бужа пришлось пренебречь. Пробные модели показали большую неустойчивость полиуретанового бужа при деформации. Данное явление проявлялось в общей потере устойчивости системы полиуретан-заготовка. Кроме того для учёта деформации полиуретана необходимо обеспечить потребление чрезмерно больших компьютерных ресурсов, что не позволяет в приемлемые сроки реализовать данную модель.

Особое внимание приходится уделять разбиению сетки конечных элементов в районе гофра, где происходит наиболее интенсивная пластическая деформация и формоизменение, а также в районе контакта заготовки со штампом. В зоне деформации гофра разбиение заготовки по толщине достигало 50 слоёв конечных элементов, всего общее количество КЭ составило 33 тыс. Данное улучшение качества сетки позволило с достаточной степенью точности определять не только НДС заготовки, но и изменение ее толщины. Точность измерения утонения достигала долей процента (рис. 5). Утонение измерялось с помощью учёта перемещений соответствующих узлов.

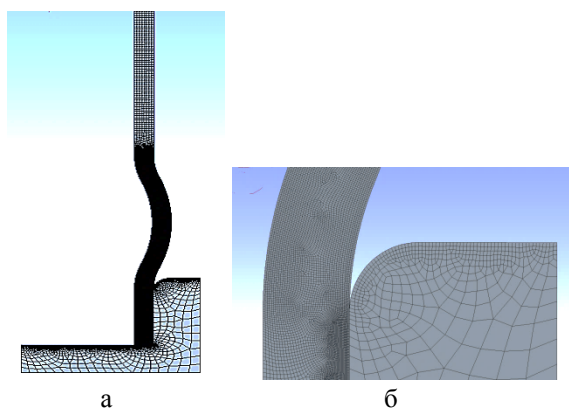


Рис. 5. Сетка КЭ: а – расчётная, б – уточнённая

Был составлен план дробного факторного эксперимента, где входными независимыми факторами были выбраны внутреннее давление и осевое перемещение торца заготовки, а также геометрия исходной заготовки – толщина и диаметр. В качестве зависимых выходных параметров были выбраны параметры гофра – длина и высота его волны, а также утонение. Для всех параметров были выбраны диапазоны варьирования. Для внутреннего давления и осевой осадки заготовки они определялись, прежде всего, из результатов предварительного моделирования, которые позволили выделить пределы данных параметров, которые сопровождались двумя явлениями, которые лимитируют технологически возможности данного процесса, а именно разруше-

нием и чрезмерным утонением (рис. 6). Кроме того, внутреннее давление лимитируется прочностью полиуретана и размерами полиуретановой пробки. Диапазоны варьирования геометрическими параметрами заготовки определяются исходя из предусмотренных стандартами размеров трубных заготовок и варьировались от толщин 1 мм до 4 мм и в диапазоне диаметров 20 мм до 200 мм.

Радиус закругления ограничивающего кольца-матрицы был принят не менее 2 толщин заготовки для избегания возникновения концентрации напряжений, что может привести к преждевременному разрушению

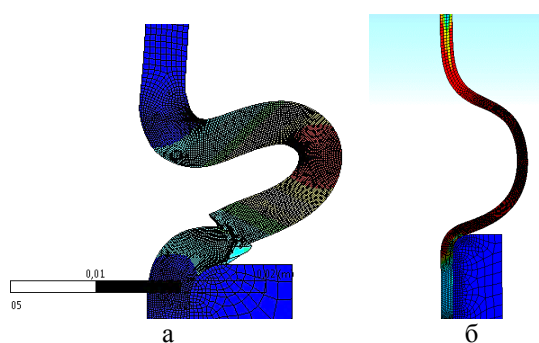


Рис. 6. Явления, ограничивающие технологические возможности процесса формообразования гофра: а – разрушение срезом, б – чрезмерное утонение

Анализ результатов моделирования

В результате выполнения моделирования пластического течения за пределами упругости были определены виды геометрии гофра (рис. 7). В общем геометрию гофра можно разбить на две тороидальных области, образованных дугами окружностей и плоской зоной, сопряжённой с предыдущими.

В результате проведения 216 серий компьютерных симуляций были получены графики зависимостей длины и высоты волны гофра и утонения в зависимости от величины осевой подачи материала заготовки при различных уровнях внутреннего давления (рис. 8).

Из приведённых графиков можно видеть, что длина волны при нулевой подаче материала в зону деформирования полностью зависит от начальной длины, определяемой явлением потери устойчивости и задаваемой формулой (1). При увеличении осевой осадки заготовки вначале интенсивное уменьшение длины волны замедляется и стремится к величине, близкой двум толщинам заготовки, что определяется явлением смятия гофра, при котором противоположные стенки гофра смыкаются. Величина давления мало влияет на длину волны гофра до того момента, когда внутренняя нагрузка приводит к общему изменению диаметра заготовки и уменьше-

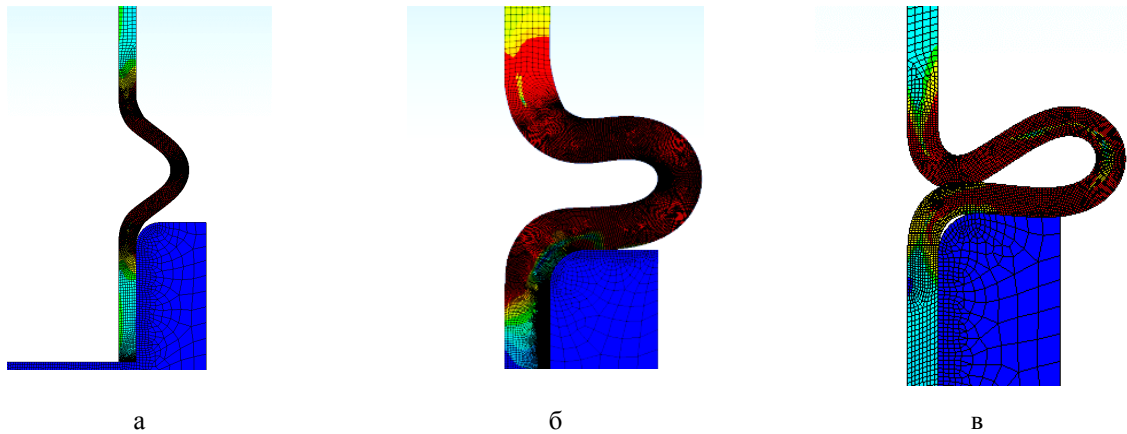
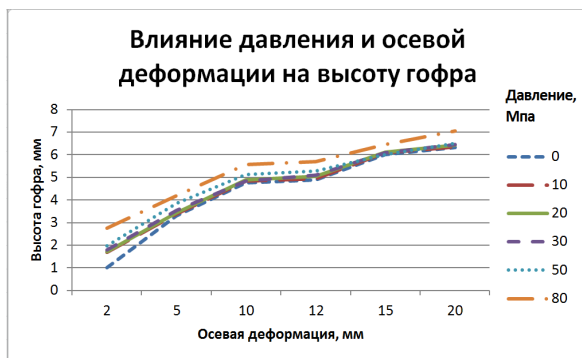
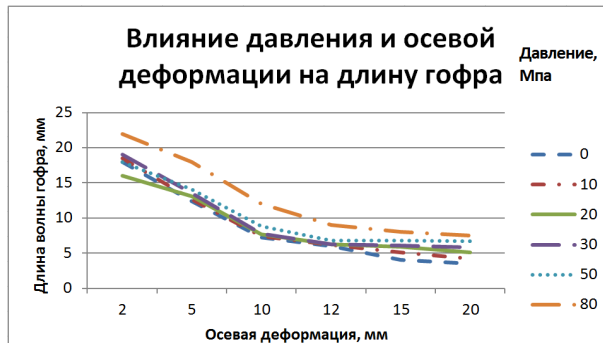


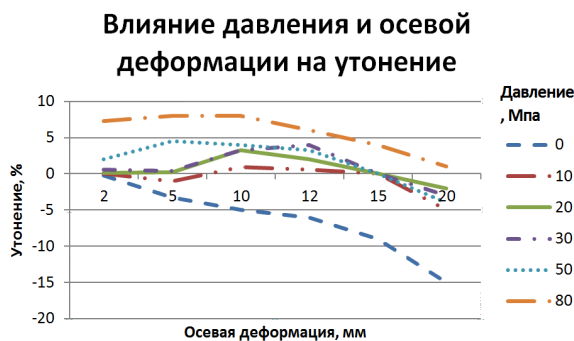
Рис. 7. Формы геометрии гофров: а – гофр, состоящий из сопряжённых дуг; б – форма гофра включает горизонтальную часть, в – начало смятия гофра



а



б



в

Рис. 8. Графики влияния осевой осадки при различном давлении а - на длину, б – на высоту, в – на утонение

нию локализации деформации. При этом значительное влияние на общую деформацию приобретает утонение стенки заготовки.

Высота гофра также стремится к максимально достижимой от начальной, которая близка к нулю. Минимальная высота гофра ограничивается явлением его схлопывания, когда внутреннее давление уже не может препятствовать изгибу стенок гофра.

Внутреннее давление в меньшей степени влияет на высоту волны гофра, в большей степени препятствуя его смятию.

Что касается утонения, то оно критически зависит от величины внутреннего давления. При небольшом внутреннем давлении заготовка претерпевает существенное местное утолщение.

Для получения модели связей параметров процесса комбинированного редуцирования и формообразования гофров, которые можно было бы применить для разработки реальных технологических процессов к результатам компьютерного моделирования был применён аппарат корреляционного и регрессионного анализа. В результате корреляционного анализа оказалось, что все коэффициенты корреляции не превышают 0,7, что показывает отсутствие мультиколлинеарных факторов и линейной зависимости независимых переменных.

После построения таблицы уровней значимости было показана сильная корреляция всех независимых переменных с зависимой. Особенно сильно коррелирует с зависимыми переменными величина осевой осадки заготовки.

После проверки модели значимости были просчитаны уровни значимости и коэффициент детерминации. Уровни значимости оказались меньше 0,05, а коэффициент детерминации варьировался от 0,54 до 0,85. Минимальный коэффициент детерминации оказался характерен в случае определения зависимости утонения, что показывает хорошее качество модели для геометрических параметров гоф-

ра и удовлетворительное для утонения.

Анализ графической зависимости зависимых параметров от независимых факторов позволил сделать вывод о нелинейной связи данных факторов. В результате были получены регрессионные уравнения второго порядка, которые приведены ниже для каждого сочетания диаметров и толщин заготовок. На рисунках 9, 10 и 11 представлены зависимости величин длины, высоты гофра и утонения от осевой деформации и внутреннего давления.

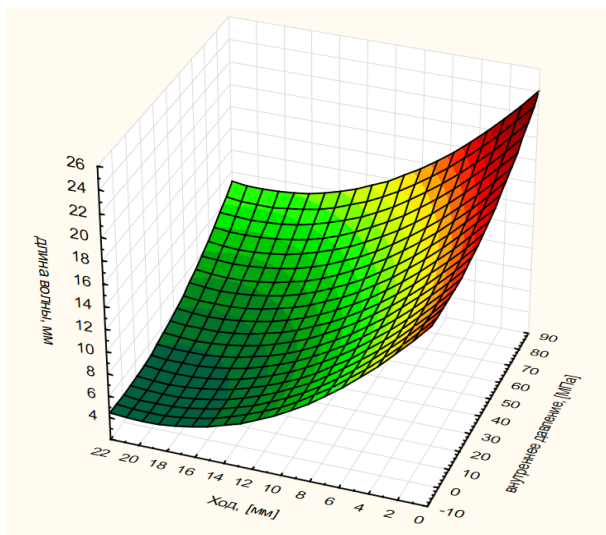


Рис. 9. Зависимость длины волны гофра от величины осадки и внутреннего давления

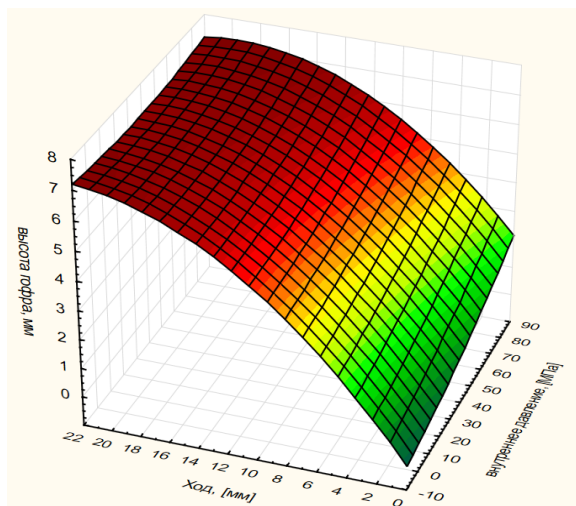


Рис. 10. Зависимость высоты волны гофра от величины осадки и внутреннего давления

Уравнение связи длины волны с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 1 мм и диаметром 38 мм:

$$I = 17,7772 - 0,0013 \cdot P - 1,3707 \cdot S + 0,0008 \cdot P^2 + 0,0002 \cdot P \cdot S + 0,0346 \cdot S^2. \quad (2)$$

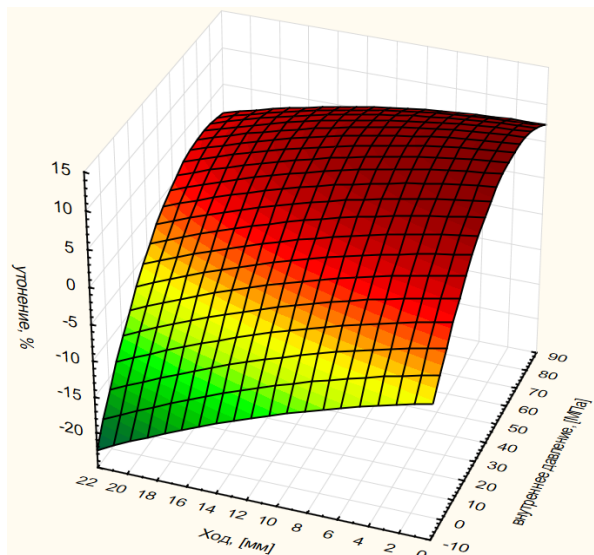


Рис. 11. Зависимость утонения от величины осадки и внутреннего давления

Уравнение связи длины волны с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 1,5 мм и диаметром 38 мм:

$$I = 20,7814 + 0,0045 \cdot P - 1,8368 \cdot S + 0,0006 \cdot P^2 - 0,0005 \cdot P \cdot S + 0,0496 \cdot S^2. \quad (3)$$

Уравнение связи длины волны с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 2,5 мм и диаметром 38 мм:

$$I = 22,6769 + 0,0328 \cdot P - 0,9463 \cdot S + 0,0004 \cdot P^2 - 0,0032 \cdot P \cdot S + 0,0066 \cdot S^2. \quad (4)$$

Уравнение связи длины волны с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 1 мм и диаметром 70 мм

$$I = 22,6395 + 0,0113 \cdot P - 1,5287 \cdot S + 0,0009 \cdot P^2 + 0,0014 \cdot P \cdot S + 0,0203 \cdot S^2. \quad (5)$$

Уравнение связи длины волны с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 1,5 мм и диаметром 70 мм

$$I = 27,9463 - 0,0556 \cdot P - 1,7668 \cdot S + 0,0013 \cdot P^2 + 0,0082 \cdot P \cdot S + 0,0276 \cdot S^2. \quad (6)$$

Уравнение связи длины волны с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 2,5 мм и диаметром 70 мм:

$$I = 32,5181 + 0,0217 \cdot P - 1,2825 \cdot S + 0,0006 \cdot P^2 + 0,0019 \cdot P \cdot S + 0,0098 \cdot S^2. \quad (7)$$

Уравнение связи высоты волны с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 1 мм и диаметром 38 мм:

$$\delta = -0,0334 + 0,0151 \cdot P + 0,617 \cdot S + 0,0001 \cdot P^2 - 0,001 \cdot P \cdot S - 0,0133 \cdot S^2. \quad (8)$$

Уравнение связи высоты волны с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 1,5 мм и диаметром 38 мм:

$$\delta = 0,3791 + 0,0114 \cdot P + 0,5538 \cdot S + 9,9952E-5 \cdot P^2 - 0,0007 \cdot P \cdot S - 0,013 \cdot S^2. \quad (9)$$

Уравнение связи высоты волны с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 2,5 мм и диаметром 38 мм:

$$\delta = -0,0094 + 0,026 \cdot P + 0,6053 \cdot S - 5,6545E-5 \cdot P^2 - 0,0007 \cdot P \cdot S - 0,0149 \cdot S^2. \quad (10)$$

Уравнение связи высоты волны с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 1 мм и диаметром 70 мм:

$$\delta = 1,482 + 0,0216 \cdot P + 0,4227 \cdot S - 0,0005 \cdot P^2 + 0,0032 \cdot P \cdot S - 0,0105 \cdot S^2. \quad (11)$$

Уравнение связи высоты волны с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 1,5 мм и диаметром 70 мм:

$$\delta = -0,8263 + 0,0328 \cdot P + 0,9076 \cdot S - 0,0002 \cdot P^2 + 0,0006 \cdot P \cdot S - 0,0264 \cdot S^2. \quad (12)$$

Уравнение связи высоты волны с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 2,5 мм и диаметром 70 мм:

$$\delta = -1,0073 + 0,0515 \cdot P + 0,8827 \cdot S + 0,0005 \cdot P^2 - 0,0052 \cdot P \cdot S - 0,0172 \cdot S^2. \quad (13)$$

Уравнение связи утонения с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 1 мм и диаметром 38 мм:

$$\Delta t = -1,802 + 0,4138 \cdot P - 0,4148 \cdot S - 0,0035 \cdot P^2 + 0,0045 \cdot P \cdot S - 0,0126 \cdot S^2. \quad (14)$$

Уравнение связи утонения с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 1,5 мм и диаметром 38 мм:

$$\Delta t = -3,9957 + 0,244 \cdot P + 0,314 \cdot S - 0,0016 \cdot P^2 + 0,0005 \cdot P \cdot S - 0,0254 \cdot S^2. \quad (15)$$

Уравнение связи утонения с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 2,5 мм и диаметром 38 мм:

$$\Delta t = -3,5825 + 0,2532 \cdot P + 0,2977 \cdot S - 0,0022 \cdot P^2 + 0,0016 \cdot P \cdot S - 0,0233 \cdot S^2. \quad (16)$$

Уравнение связи утонения с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 1 мм и диаметром 70 мм:

$$\Delta t = -1,3655 + 0,2629 \cdot P + 0,0854 \cdot S - 0,0002 \cdot P^2 + 0,0005 \cdot P \cdot S - 0,0412 \cdot S^2. \quad (17)$$

Уравнение связи утонения с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 1,5 мм и диаметром 70 мм:

$$\Delta t = -4,0766 + 0,2623 \cdot P + 0,3298 \cdot S - 0,0007 \cdot P^2 - 0,0003 \cdot P \cdot S - 0,0325 \cdot S^2. \quad (18)$$

Уравнение связи утонения с осадкой и внутренним давлением для заготовки толщиной 2,5 мм и диаметром 70 мм:

$$\Delta t = -3,4091 + 0,2923 \cdot P + 0,3103 \cdot S - 0,0015 \cdot P^2 - 0,0029 \cdot P \cdot S - 0,0209 \cdot S^2. \quad (19)$$

Регрессионное же уравнение, позволяющее учитывать все четыре предиктора, включает в себя недостоверные свободные члены и поэтому его применение невозможно.

Выводы

1. На основе анализа численных результатов исследования обоснован выбор модели зависимости независимых параметров процесса, а именно осевой осадки заготовки и внутреннего давления на геометрию гофра и утонение заготовки.

2. Проведена оценка адекватности численной модели на основе корреляционного и дисперсионного анализа.

3. Регрессионный анализ позволил получить уравнения второго порядка, которые могут быть использованы при разработке технологических процессов, содержащих комбинацию операций редуцирования и формообразования гофров.

4. Был сделан вывод, что для получения более адекватной модели, одновременно учитывающей влияние всех независимых факторов на все функции отклика необходимо применять более сложные алгоритмы регрессионного анализа, например, создание и обучение нейронных сетей.

Литература

1. Мецшерин, В. Т. Листовая штамповка [Текст] : атлас схем / В. Т. Мецшерин. – Москва : Машиностроение, 1975. – С. 75, 77.
2. Вольмир, А. С. Устойчивость упругих систем [Текст] / А. С. Вольмир. – Москва : Наука, 1967. – 984 с.
3. Непершин, Р. И. Пластическая потеря устойчивости при осевом сжатии трубы [Текст] / Р. И. Непершин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 3(27). – С. 329–336.
4. Buckling and recovery of NiTi tubes under axial compression. [Text] / Dongjie Jiang, Nathan J. Bechle, Chad M. Landis, Stelios Kyriakides // International Journal of Solids and Structures. – 2016. – Vol. 80. – P. 52-63.
5. Behavior of Thin-walled Circular Hollow Section Stub Columns Under Axial Compression [Text] / Lanhui Guo, Yong Liu, Hui Jiao, Shilong An // International Journal of Steel Structures. – 2016. – Vol. 16(3). – P. 777-787.

References

1. Mescherin, V. T. *Listovaya shtampovka* [Sheet-metal working]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, pp. 75, 77.
2. Vol'mir, A. S. *Ustoychivost' uprugih system* [Stability of the elastic systems]. Moscow, Science Publ., 1967. 984 p.
3. Nepershin, R. I. *Plasticheskaya poterya ustoychivosti pri osevom szhatii truby* [Plastic loosing of stability at axial compression of the tube]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta – Bulletin of the Samara State Aerospace University*, 2011, no. 3(27), pp. 329-336.
4. Dongjie, Jiang., Nathan, J. Bechle., Chad, M. Landis., Stelios, Kyriakides. Buckling and recovery of NiTi tubes under axial compression. *International Journal of Solids and Structures*, 2016, vol. 80, pp. 52-63.
5. Lanhui, Guo., Yong, Liu., Hui, Jiao., Shilong, An. Behavior of Thin-walled Circular Hollow Section Stub Columns Under Axial Compression. *International Journal of Steel Structures*, 2016, vol. 16(3), pp. 777-787.

Поступила в редакцию 2.06.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГОФРУ ПІД ЧАС КОМБІНОВАНОЇ ОПЕРАЦІЇ РЕДУКУВАННЯ ТА ГОФРОУТВОРЕННЯ ТРУБНИХ ЗАГОТІВОК

В. В. Борисевич, Абухабел Мохамед Абубакер

Наведено результати чисельного моделювання процесу гофроутворення під час комбінування операцій редукування та гофроутворення листових трубних заготовок. Для моделювання процесу було послідовно симульовано початкову втрату стійкості з утворенням симетричного випинання з наступним моделюванням пластичної течії. Проведено порівняння результатів моделювання для різних параметрів технологічного процесу та різних співвідношеннях розмірів первинної заготовки. Показано, що модель, що використано, адекватно описує процес гофроутворення. Використання моделі, що запропоновано, рекомендовано для розрахунків параметрів технологічного процесу формоутворення гофрів з використанням осевої подачі матеріалу в зону деформування.

Ключові слова: гофр, гофроутворення, моделювання, втрата стійкості, пластична течія.

DETERMINATION OF THE CORRUGATION PARAMETERS AT COMBINED OPERATION OF REDUCTION AND FORMING OF CORRUGATION OF TUBULAR BLANKS

V. V. Borysevych, Abuhabel Mohamed Abubaker

The results of numerical modelling of corrugation forming at combination of reduction and corrugation formation of the tubular blanks are given. There were sequentially modelled initial buckling with symmetrical bulging and further plastic flow. The results of modelling were compared for the different parameters of the technological process and for the different correlation of the initial blank dimensions. It is shown, that applied model describes corrugation formation adequately. Application of the model proposed is recommended for calculation of the parameters of the corrugation formation process with axial displacement of the material to the zone of deformation.

Keywords: corrugation, corrugation formation, buckling, plastic flow.

Борисевич Володимир Володимирович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедри технології виробництва летательних апаратів, Національний аэрокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: Vladimir_Borys@yahoo.ca.

Абухабел Мохамед Абубакер – аспірант кафедри технології виробництва летательних апаратів, Національний аэрокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: abohbial09@rambler.ru.

Borysevych Vladimir Vladimirovich – candidate of technical science, associate professor of technology of aircraft production department, National aerospace university N. E. Zukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: Vladimir_Borys@yahoo.ca.

Abuhabel Mohamed Abubaker – postgraduate student of technology of aircraft production department, National aerospace university N. E. Zukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: abohbial09@rambler.ru.