

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОБЕЧАЙКИ С ВАФЕЛЬНЫМ ПОДКРЕПЛЕНИЕМ ПРИ ВАЛЬЦЕВАНИИ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ОТКЛОНЕНИЙ ФОРМЫ

Е. В. Кривонос

Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

При вальцевании вафельной панели из сплава АМгб в цилиндрическую обечайку возникает дефект формы. Ручное устранение этого дефекта порождает локальные неровности на стыковых свариваемых кромках вафельной обечайки. Это приводит к сложностям в процессе сваривания сваркой трением с перемешиванием обечаек в секции топливных баков.

Необходимо на основе компьютерного анализа и существующих теорий определить напряжения в вафельной обечайке, вызывающие внутренние деформации, выливающиеся в общую погрешность формы, и вывести закономерности, при которых возможно внешнее воздействие на геометрию формы в момент гибки.

Предложенный подход позволит определить вспомогательные технологические элементы для настройки стандартного вальцовочного оборудования для бездефектного вальцевания вафельных обечаек топливных баков ракет с различным геометрическим исполнением подкрепления. Что, в свою очередь, повысит эффективность формообразования обечаек и качество сварных швов при их сваривании.

**Ключевые слова:** вафельная панель, вафельная обечайка, вальцевание, топливный бак ракеты, сплав АМгб, сварка трением с перемешиванием.

## Введение

Вальцевание цилиндрических или конусных обечаек из простого плоского листа, как метод формообразования, не является новым. Определение основных параметров, описание и особенности процесса вальцевания, как и методики расчета параметров вальцовочного оборудования, представлены в трудах [1, с. 65–127; 2, с. 32–40]. Но при этом классические теории пластичности и теории напряженного и деформированного состояния изгибаемого тела [3–6] в обработке металлов давлением не до конца адаптированы под сложную конструкцию современных корпусных деталей, применяемых в передовых отраслях космического машиностроения для техники нового поколения [7, 8]. Примером служит вафельная обечайка (ВО) топливного бака ракеты-носителя, процесс формообразования которой носит сложный многоэтапный и частный характер [9]. В настоящий момент на одном из отечественных предприятий возникающие после вальцевания непрогнозируемые отклонения формы ВО не позволяют полноценно и бездефектно [10] реализовать процесс их сваривания в цельные секции топливного бака ракеты сваркой трением с перемешиванием (СТП). На фоне того, что применение СТП стало неотъемлемой частью современного отечественного и мирового [11–13] ракетостроения, стабильность процесса сварки [14, 15] — приоритетное направление в повышении качества и прочности топливных баков ракет.

## Постановка задачи

В реальных условиях вальцевания вафельной панели из сплава АМгб в цилиндрическую обечайку сектором  $180^\circ$  возникает отклонение от цилиндричности (рис. 1) — форма в виде однополосного гиперболоида [16], далее «корсетность». Она образуется в поперечном направлении относительно направления прокатки в вальцах. Величина отклонений в поперечных кольцевых сечениях обечайки изменяется в диапазоне от 0 до 15 мм в разных локациях обечайки. Директивная технология изготовления ВО под СТП допускает отклонение (рис. 2) формы свариваемых кромок (компенсаторов) до 0,5 мм, а отклонение всей формы — до 2,7 мм. В остальном конструктивные параметры: габарит, толщина, размер и форма ячеек принимаются как конструкторские постоянные, без возможности их изменять динамически.

Гипотетически, возникновение дефекта в процессе вальцевания обусловлено объемным напряженно-деформационным состоянием вследствие упругого пластического изгиба, при котором составляющие главных нормальных напряжений (рис. 3), тангенциальное  $\sigma_\theta$  и радиальное  $\sigma_r$ , уравновешены и способствуют нормальной деформации радиуса обечайки, а аксиальное  $\sigma_z$  не уравновешено из-за конструктивной разности деформируемых слоев — монолитного основания и связанного с ним вафельного фона.

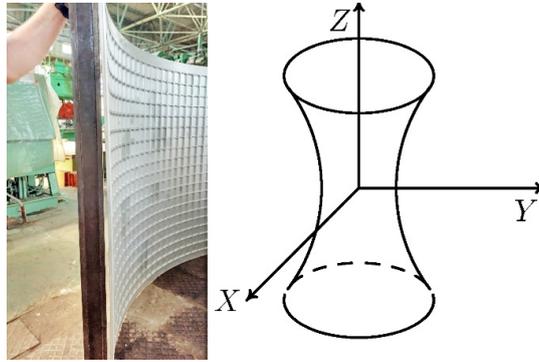


Рис. 1. Форма — «корсетность» вафельной обечайки после вальцевания  
 Fig. 1. Form — «korsetnost'» of waffle shell after rolling

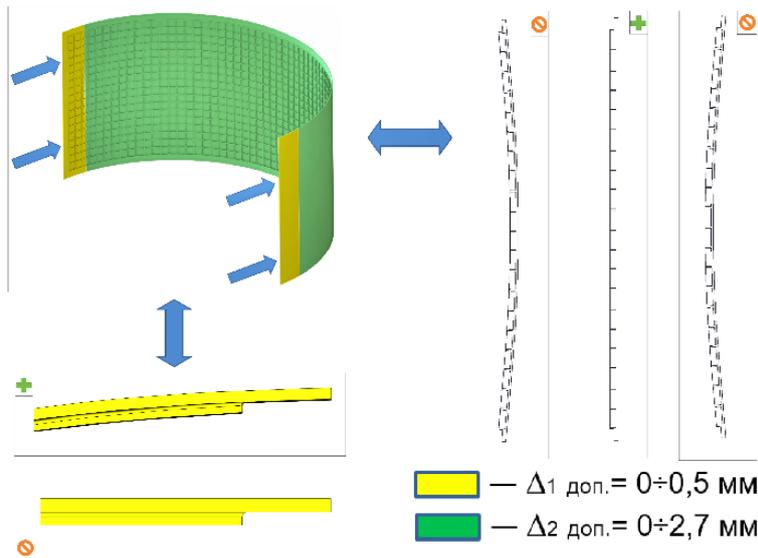


Рис. 2. Технические требования к форме вафельной обечайки под СТП  
 Fig. 2. Specification of the shape of friction stir welding waffle shell

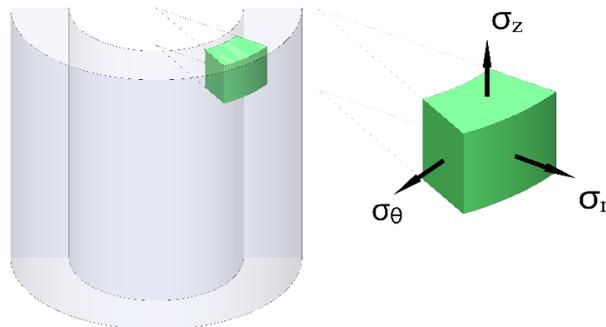


Рис. 3. Составляющие главных нормальных напряжений в загнутой цилиндрической стенке  
 Fig. 3. Main normal stress components in bent cylindrical wall

Исследование заключается в определении влияния вафельного подкрепления панели и параметров вальцовочного оборудования на возникновение дефекта формы ВО в процессе вальцевания и разработке технологических приемов компенсации возникающих отклонений.

Вальцевание осуществлялось на двух станках: четырехвалковые гидравлические вальцы с цилиндрическими приводными валками ГЛС-2К-НИАТ и четырехвалковые гидравлические вальцы с бочкообразными приводными валками Roundo PASS 310. Объектом исследования является вафельная па-

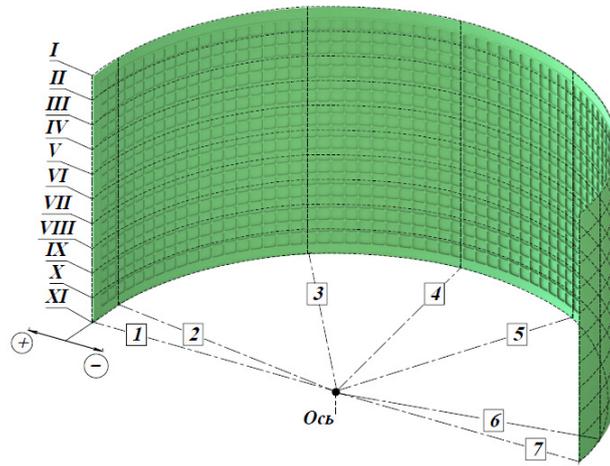


Рис. 4. Схема замера отклонений формы вафельной обечайки  
Fig. 4. Diagram of waffle shell shape deviation measurement

Таблица 1. Отклонения формы обечайки после вальцевания на Roundo PASS 310  
Table 1. Shell shape deviations after rolling on Roundo PASS 310

Roundo PASS 310	1	2	3	4	5	6	7
I	0	0	0	0	0	0	0
II	-5,1	-4,1	-2,1	-1,2	-2,1	-4	-5
III	-7,9	-6,1	-3	-2,1	-2,9	-6	-8
IV	-11,1	-8,9	-4,9	-4	-5	-9	-11,3
V	-14	-12	-7,1	-6	-6,9	-11,9	-13,8
VI	-15	-13,5	-12	-9,8	-12,3	-13,4	-15
VII	-14,2	-12,1	-7,2	-6	-7	-12	-14,3
VIII	-11,3	-9	-5	-4	-5,2	-9,1	-11
IX	-8,2	-6,2	-3,1	-2,1	-3,1	-6,1	-8,1
X	-5,2	-4,2	-2,2	-1,2	-2,3	-4,1	-5,1
XI	0	0	0	0	0	0	0

нель, конструктивные параметры которой не могут быть раскрыты. Для обмера формы обечайки использовалась лекальная линейка ГОСТ 8026-92 и клиновой щуп. На рис. 4 представлена схема обмера кольцевых сечений загнутой ВО из сплава АМг6 в сечениях I–XI по линиям замера 1–7. Отклонения фиксировались относительно внешней цилиндрической образующей в положительном и отрицательном направлениях и представлены в табл. 1.

### Теория

Технологические процессы гибки и правки осуществляются преимущественно посредством поперечного пластического изгиба, когда наряду с нормальными напряжениями действуют касательные напряжения. Многочисленные эксперименты показали, что при гибке с большим расстоянием между опорами влияние касательных напряжений на параметры процесса пренебрежимо мало, поэтому в этих случаях можно пользоваться зависимостями, установленными для чистого изгиба. Таким образом, при теоретическом исследовании пластический изгиб разделяется на объемный пластический изгиб, линейный пластический изгиб и поперечный пластический изгиб [1, с. 10; 4].

При вальцевании вафельной панели максимальная деформация происходит в тангенциальном направлении, в наружных волокнах изгиба формируются деформации растяжения, во внутренних волокнах возникает деформация сжатия (рис. 5). При пластическом формоизменении и при условии постоянства объема тангенциальная пластическая деформация сопровождается пластическими деформациями обратного вида в двух других взаимно перпендикулярных направлениях — радиальном и аксиальном. Кривизна изгиба вызывает нажатие продольных слоев друг на друга, благодаря чему возникают радиальные напряжения, достигающие своего наибольшего значения на нейтральном слое. Кроме того, у загнутой обечайки появляются аксиальные напряжения вследствие затрудненности протекания деформации в поперечном направлении.

Вафельная обечайка — это конструктивно-ортотропная монолитная оболочка с часто расположенным подкрепляющим набором, изготовленным заодно со стенкой. Обоснования их использования в конструкции ракет изложены в отечественных и мировых работах [17, с. 43–49; 18, с. 17–18; 19]. Математическое описание не нормального изменения формы таких обечаек в процессе их гибки

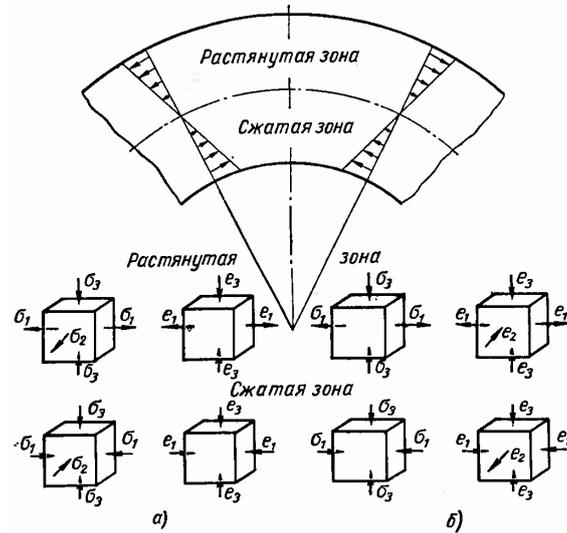


Рис. 5. Схема напряженного и деформированного состояний при пластическом изгибе бруса [1, с. 10]:

а) широкого; б) узкого  
 Fig. 5. Scheme of stressed and deformed states at plastic bending of bar [1, p. 10]:  
 а) wide; б) narrow

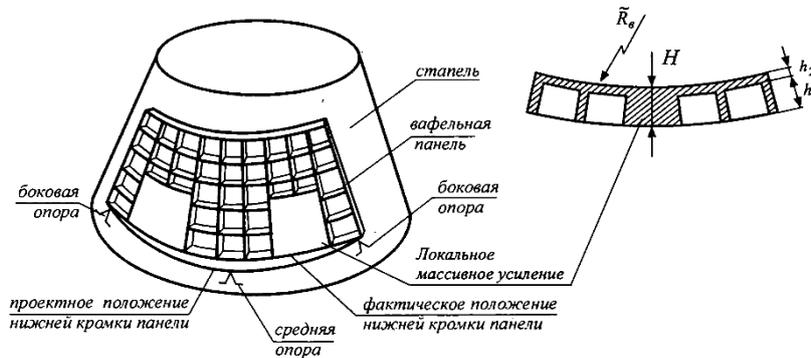


Рис. 6. «Корончатость» — дефект формы монолитной панели, вызванный депланацией плоских кольцевых сечений [9]

Fig. 6. «Koronchatost'» — a defect in the shape of the monolithic panel caused by the deplanation of flat annular sections [9]

представлено в работе [2, с. 160–162]. В качестве примера авторы работы рассматривают изгиб и пружинение монолитных панелей с локальными массивными усилениями, характерным дефектом которых является «корончатость» (рис. 6). Устранить описанный дефект, с их точки зрения, возможно только за счет упреждающей корректировки формы и размеров плоской заготовки с вафельным фоном, которая при гибке и пружинении получит искажения противоположного знака и, в итоге, будет иметь нужную форму и размеры. Т.е. представленная методика и математическая модель будут работать, только если допускается иное исполнение геометрических параметров ВО. Никаких технологических приемов компенсации отклонений формы обечайки, в процессе формообразования, авторами не предлагается.

Для вафельных панелей, изменение конструктивных параметров в которых не допускается, необходима модель формообразования с адаптивными технологическими элементами компенсации отклонения формы обечайки. Задача элементов заключатся во внешнем влиянии на аксиальные на-

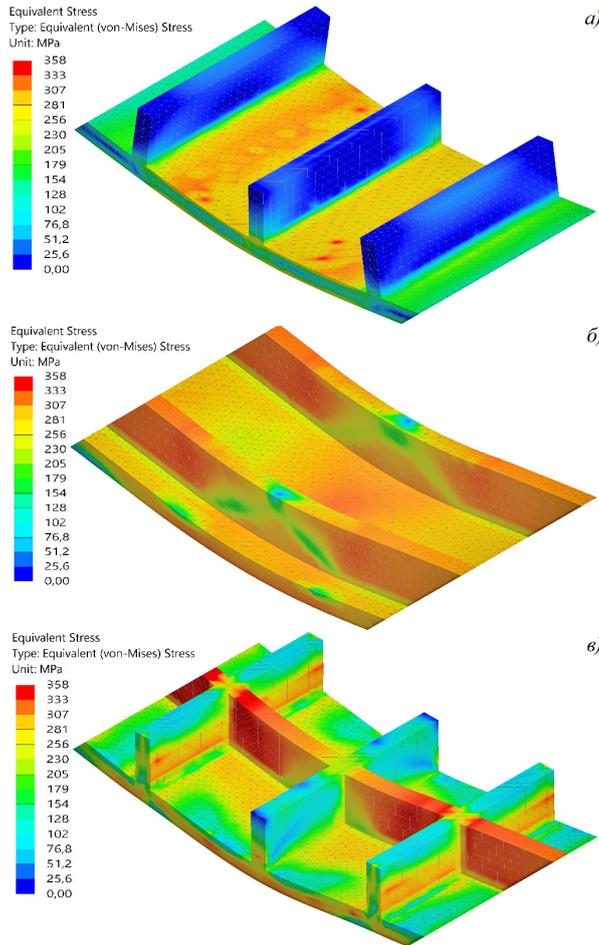
пряжения путем изгибающего воздействия в обратном от аксиальной деформации направлении. Основной модели служит теория чистого пластического изгиба широкой полосы [3, с. 54–58] и математическая модель смещения нейтрального слоя напряжений [2, с. 104–106].

#### Анализ результатов экспериментов

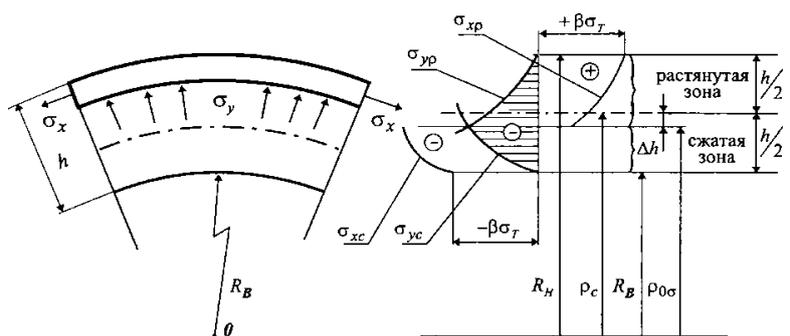
Влияние вафельного фона на возникновение «корсетности» определялось фактическими объемами и компьютерным анализом на основе метода конечных элементов в среде Ansys. Анализ проводился в три этапа на основе сгибаемых бесконечно малых моделированных элементах вафельной панели (рис. 7):

- с единичным поперечным подкреплением;
- с единичным продольным подкреплением;
- с усиливающим набором подкреплений.

Для случая **а)** очевидно, что своего максимума напряжения достигают на поверхности внутреннего  $R_B = a$  (основание подкрепления) и наружного  $R_H = b$  радиусов изгиба. Исходя из отсутствия на-



**Рис. 7. Эпюры напряжений изгиба:**  
 а) панели с единичным поперечным подкреплением;  
 б) панели с единичным продольным подкреплением;  
 в) панели с усиливающим набором подкреплений  
**Fig. 7. Buckling stress periods:**  
 а) panels with a single transverse reinforcement;  
 б) panels with single longitudinal reinforcement;  
 в) panel with reinforcing set of reinforcements



**Рис. 8. Смещение нейтрального слоя напряжений для Т-образного сечения**  
**Fig. 8. Neutral stress layer offset for T-section**

пряжений в ребре поперечного подкрепления, граница зон растяжения и сжатия проходит условно по середине монолитного основания элемента, как при пластическом изгибе широкой полосы, где компонент напряжений в наружных (1) и внутренних (2) волокнах, для координатной точки  $r$ , записывается как [3, с. 55]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= 2\kappa \ln \frac{r}{b} \\ \sigma_\theta &= 2\kappa \left( \ln \frac{r}{b} + 1 \right) \\ \sigma_z &= 2\kappa \left( \ln \frac{r}{b} + 0,5 \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

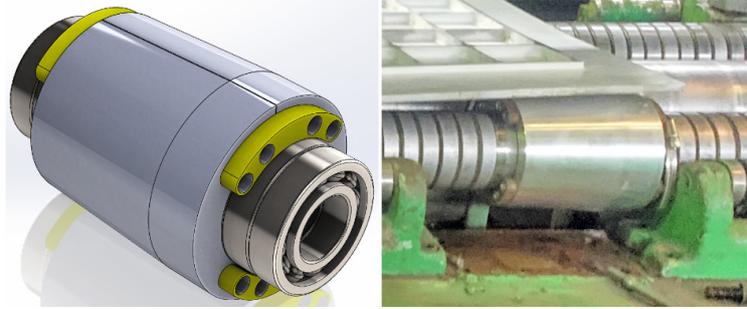


Рис. 9. Бандаж-компенсатор на опорных валках станка ГЛС-2К-НИАТ  
Fig. 9. Shroud-compensator on support rolls of machine GLS-2K-NIAT

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -2\kappa \ln \frac{r}{a} \\ \sigma_\theta &= -2\kappa \left( \ln \frac{r}{a} + 1 \right) \\ \sigma_z &= -2\kappa \left( \ln \frac{r}{a} + 0,5 \right) \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Для случая **б)** максимальные напряжения возникают на поверхностях изгиба  $R_B$ ,  $R_H$  и в ребре продольного подкрепления. Для Т-образного (рис. 8) сечения толщиной  $h$  расчет составляющих главных нормальных напряжений  $\sigma_\theta = \sigma_x$  и  $\sigma_r = \sigma_y$  осуществляется из условия эквивалентного приведения высоты ребер вафельного подкрепления к толщине монолитного основания, условия пластичности и уравнения равновесия [2, с. 104]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\sigma_y}{d\rho} + \frac{\sigma_y - \sigma_x}{\rho} &= 0; \\ \sigma_y - \sigma_x &= \pm \beta \sigma_T. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Последующая подстановка второго уравнения системы (3) в первое и интегрирование с учетом граничных условий позволяет найти выражения для определений взаимного надавливания волокон  $\sigma_y$  по высоте поперечного сечения, характеризуемой координатой  $\rho$  в растянутой  $\sigma_{yp}$  и сжатой  $\sigma_{yc}$  зонах. Влияние аксиального напряжения  $\sigma_z$  учитывается коэффициентом  $\beta$ :

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{yp} &= -\beta \sigma_T \ln \frac{R_H}{\rho}; \\ \sigma_{yc} &= -\beta \sigma_T \ln \frac{\rho}{R_B}. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Кривизна нейтрального слоя  $\rho_{nc}$  и смещение нейтрального слоя  $\Delta h$  изгиба устанавливается из условия равнодействующих напряжений  $\sigma_{yp} = \sigma_{yc}$  в разноразмерных связанных слоях и определяется выражениями [2, с. 105]:

$$\rho_{nc} = \sqrt{R_B R_H} = \sqrt{R_B (R_B + h)}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta h &= \rho_c - \rho_{nc} = \frac{R_H + R_B}{2} - \sqrt{R_H R_B} = \\ &= R_B + \frac{h}{2} - \sqrt{R_B (R_B + h)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для случая **в)** влияние максимальных напряжений подкрепления **б)** обуславливает не только рост напряжений в ребрах подкрепления **а)**, но и фактически приводит к росту внутренних аксиальных деформации  $\epsilon_z$ , выливающимся в общее отклонение формы обечайки. Образование «корсетности», при полученных значениях аксиального напряжения  $\sigma_z$ , принимаем как образование внешнего радиуса гибки обечайки  $R_{Hz}$  (в проекции плоскости параллельной оси), полученного на основе фактических отклонений (табл. 1) в линиях замера (рис. 4), а параметр  $\Delta \bar{e}$  вводим как компенсатор технологической наладки, знак которого определяется направлением противоизгиба к направлению фактического отклонения формы. Тогда напряжения  $\Delta \sigma_z$ , при которых  $R_{Hz}$  компенсируется, определяются из условия пропорции (7) и интегрируются в выражения (3), (4) для расчета значений в выражениях (5), (6).

$$\frac{\sigma_z}{R_{Hz}} = \frac{\Delta \sigma_z}{R_{Hz} \pm \Delta \bar{e}} \Rightarrow \Delta \sigma_z = \frac{\sigma_z (R_{Hz} \pm \Delta \bar{e})}{R_{Hz}}. \quad (7)$$

## Выводы и заключение

Влияние на параметр  $\Delta \bar{e}$  стандартными параметрами вальцовочного оборудования не представляется возможным, а многократное изменение конструкции валков носит дорогостоящий характер. Действенным приемом служит добавление бандажа-компенсатора на опорные ролики (рис. 9). Параметры бандажа-компенсатора определялись из условий выражения (7), а положение на валках относительно центра панели (оси вальцевания) определяется с учетом эмпирических поправок, что является недостатком вышеизложенного исследования.

Последовательный подход в анализе напряженно-деформированного состояния элементов вафельного подкрепления обечаек из алюминиево-магниевого сплава [20, 21] позволяет определять оптимальные пути ее вальцевания с требуемой точностью на конструктивно-модернизированных вальцовочных станках.

## Список источников

1. Мошнин Е. Н. Гибка и правка на ротационных машинах. Технология и оборудование. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1967. С. 7–127.
2. Лысов М. И., Сосов Н. В. Формообразование деталей гибкой. М., 2001. С. 32–169. ISBN 5-217-03105-0.

3. Томленов А. Д. Механика процессов обработки металлов давлением. М.: Машгиз, 1963. С. 9–58.

4. Kim H., Chatti S., Kardes N. Bending, Flanging, and Hemming // *Sheet Metal Forming-Processes and Applications* / Eds.: T. Altan, A. E. Tekkaya. Ohio: ASM International, 2012. P. 19–48. ISBN 978-1-61503-842-8.

5. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.

6. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 687 с.

7. Нестеров В. Е. Космический ракетный комплекс «Ангара». История создания. В 2 т. М.: Ремарко, 2018. Т. 1. 471 с. ISBN 978-5-903615-89-6.

8. Нестеров В. Е. Космический ракетный комплекс «Ангара». История создания. В 2 т. М.: Ремарко, 2018. Т. 2. 539 с. ISBN 978-5-903615-90-2.

9. Berger E. The first space-worthy Vulcan rocket is taking shape // *Ars Technica*. 2019. URL: <https://arstechnica.com/science/2019/03/ula-has-started-to-fabricate-flight-hardware-for-its-vulcan-rocket> (дата обращения: 23.10.2020).

10. Кривонос Е. В., Черных И. К., Матузко Е. Н., Васильев Е. В. Анализ дефектов, возникающих при сварке трением с перемешиванием // *Омский научный вестник*. 2017. № 2 (152). С. 24–27.

11. Wang G., Zhao Ya., Hao Yu. Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing // *Journal of Materials Science & Technology*. 2018. Vol. 34, Issue 1. P. 73–91. DOI: 10.1016/j.jmst.2017.11.041.

12. Robinson-Smith W. ULA demos Vulcan Centaur rocket assembly, shows new welders // *WAAY-TV* 31. 2018. URL: <https://www.waaytv.com/content/news/United-Launch-Alliance-showcases-new-rockets--500513372.html> (дата обращения: 23.10.2020).

13. Mohandas T. Welding Technologies in Aerospace Applications // *Aerospace Materials and Material Technologies*. Vol. 2: Aerospace Material Technologies / Eds.: N. Eswara Prasad, R. J. H. Wanhill. Singapore: Springer, 2017. P. 65–85. ISBN 978-981-10-2142-8.

14. Черных И. К., Матузко Е. Н., Васильев Е. В., Кривонос Е. В. Повышение качества сварных швов, полученных при помощи сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов АМг6 // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2017. Т. 5, № 1. С. 113–120. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-1-113-120.

15. Chernykh I. K., Vasil'ev E. V., Matuzko E. N., Krivonos E. V. Upgrading weld quality of a friction stir welded aluminum

alloys AMG6 // *IOP Conference Series: Journal of Physics*. 2018. Vol. 944. 012025. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012025.

16. Корн Г. А., Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы. М.: Наука, 1973. С. 70–92.

17. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1976. С. 7–127.

18. Кармишин А. В., Лясковец В. А., Мяченков В. И. [и др.]. Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций. М.: Машиностроение, 1975. 375 с.

19. Научно-технические разработки ОКБ-23 — КБ «Салют»: сб. ст. / Под общ. ред. Ю. О. Бахвалова. М.: Воздушный транспорт, 2006. 720 с. ISBN 5-88821-065-X.

20. Wang M., Xin Y., Liu Q. Preparation and Processing of Magnesium Alloys // *Aerospace Materials Handbook: Advances in Materials Science and Engineering* / Eds.: Zhang S., Zhao D. Cleveland: CRC Press, 2016. P. 622–639. ISBN 1439873291.

21. Бронз А. В., Ефремов В. И., Плотников А. Д., Чернявский А. Г. Сплав 1570С — материал для герметичных конструкций перспективных многоразовых изделий РКК «Энергия» // *Космическая техника и технологии*. 2014. № 4 (7). С. 62–67.

---

**КРИВОНОС Евгений Викторович**, старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».

SPIN-код: 7238-5136

AuthorID (РИНЦ): 762266

ORCID: 0000-0001-8485-1862

AuthorID (SCOPUS): 57193400934

ResearcherID: ABC-7096-2020

Адрес для переписки: [evgenii.krivonos@mail.ru](mailto:evgenii.krivonos@mail.ru)

#### Для цитирования

Кривонос Е. В. Исследование деформации обечайки с вальцеванием при вальцевании и разработка метода компенсации отклонений формы // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2020. Т. 4, № 4. С. 90–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-90-98.

Статья поступила в редакцию 27.10.2020 г.

© Е. В. Кривонос

# INVESTIGATION OF DEFORMATION OF SHELL WITH WAFFLE REINFORCEMENT DURING ROLLING AND DEVELOPMENT OF METHOD FOR COMPENSATION OF DEVIATIONS FORMS

E. V. Krivonos

Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

**When the waffle panel of AMg6 alloy rolls into the cylindrical shell, a shape defect occurs. Manual elimination of this defect causes local irregularities on butt welded edges of the waffle shell. This leads to difficulties in the process of welding by friction welding with mixing of shells in the section of fuel tanks.**

**It is necessary, on the basis of computer analysis and existing theories, to determine the stresses in the waffle shell that cause internal deformations that result in a general shape error, and to derive patterns under which external influence on the geometry of the mold at the time of bending is possible.**

**The proposed campaign will make it possible to determine auxiliary technological elements for setting standard rolling equipment for defective rolling of wafer shells of missile fuel tanks with various geometric versions of reinforcements. It, in turn, will increase the efficiency of forming shells and the quality of welds when they are welded.**

**Keywords: waffle panel, waffle shell, rolling, missile fuel tank, AMg6 alloy, friction stir welding.**

## References

1. Moshnin E. N. Gibka i pravka na rotatsionnykh mashinakh. Tekhnologiya i oborudovaniye [Bending and editing on rotary machines. Technology and equipment]. 2nd ed. Moscow, 1967. P. 7–127. (In Russ.).
2. Lysov M. I. Sosov N. V. Formoobrazovaniye detaley gibkoy [Forming of flexible parts]. Moscow, 2001. P. 32–169. ISBN 5-217-03105-0. (In Russ.).
3. Tomlenov A. D. Mekhanika protsessov obrabotki metallov davleniyem [Mechanics of metal pressure processing]. Moscow, 1963. P. 9–58. (In Russ.).
4. Kim H., Chatti S., Kardes N. Bending, Flanging, and Hemming // Sheet Metal Forming-Processes and Applications / Eds.: T. Altan, A. E. Tekkaya. Ohio: ASM International, 2012. P. 19–48. ISBN 978-1-61503-842-8. (In Engl.).
5. Storozhev M. V., Popov E. A. Teoriya obrabotki metallov davleniyem [Theory of metal pressure processing]. 4th ed. Moscow, 1977. 423 p. (In Russ.).
6. Kolmogorov V. L. Mekhanika obrabotki metallov davleniyem [Mechanics of metal pressure processing]. Moscow, 1986. 687 p. (In Russ.).
7. Nesterov V. E. Kosmicheskyy raketnyy kompleks «Angara». Istoriya sozdaniya [Space rocket complex «Angara». History of creation]. In 2 vols. Moscow, 2018. Vol. 1. 471 p. ISBN 978-5-903615-89-6. (In Russ.).
8. Nesterov V. E. Kosmicheskyy raketnyy kompleks «Angara». Istoriya sozdaniya [Space rocket complex «Angara». History of creation]. In 2 vols. Moscow, 2018. Vol. 2. 539 p. ISBN 978-5-903615-90-2. (In Russ.).
9. Berger E. The first space-worthy Vulcan rocket is taking shape // Ars Technica. 2019. URL: <https://arstechnica.com/science/2019/03/ula-has-started-to-fabricate-flight-hardware-for-its-vulcan-rocket> (accessed: 23.10.2020). (In Engl.).
10. Krivonos E. V., Chernykh I. K., Matuzko E. N., Vasilev E. V. Analiz defektov, vznikayushchikh pri svarke treniyem s peremeshvaniyem [Analysis of defects caused by friction welding with stirs] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2017. No. 2 (152). P. 24–27. (In Russ.).
11. Wang G., Zhao Ya., Hao Yu. Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing // Journal of Materials Science & Technology. 2018. Vol. 34, Issue 1. P. 73–91. DOI: 10.1016/j.jmst.2017.11.041. (In Engl.).
12. Robinson-Smith W. ULA demos Vulcan Centaur rocket assembly, shows new welders // WAAY-TV 31. 2018. URL: <https://www.waaytv.com/content/news/United-Launch-Alliance-showcases-new-rockets--500513372.html> (accessed: 23.10.2020). (In Engl.).
13. Mohandas T. Welding Technologies in Aerospace Applications // Aerospace Materials and Material Technologies. Vol. 2: Aerospace Material Technologies / Eds.: N. Eswara Prasad, R. J. H. Wanhill. Singapore: Springer, 2017. P. 65–85. ISBN 978-981-10-2142-8. (In Engl.).
14. Chernykh I. K., Matuzko E. N., Vasilev E. V., Krivonos E. V. Povysheniye kachestva svarnykh shvov, poluchennykh pri pomoshchi svarki treniyem s peremeshvaniyem alyuminiyevykh splavov AMg6 [Improving the quality of welds obtained by friction stir welding of AMg6 aluminum alloys] // Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2017. Vol. 5, no. 1. P. 113–120. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-1-113-120. (In Russ.).
15. Chernykh I. K., Vasil'ev E. V., Matuzko E. N., Krivonos E. V. Upgrading weld quality of a friction stir welded aluminum alloys AMG6 // IOP Conference Series: Journal of Physics. 2018. Vol. 944. 012025. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012025. (In Engl.).
16. Korn G. A., Korn T. M. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Opredeleniya, teoremy, for-

muly [Mathematics Handbook for Scientists and Engineers. Definitions, theorems, formulas]. Moscow, 1973. P. 70–92. (In Russ.).

17. Lizin V. T., Pyatkin V. A. *Proyektirovaniye tonkostennykh konstruksiy* [Design of thin-walled structures]. Moscow, 1976. P. 7–127. (In Russ.).

18. Karmishin A. V., Lyaskovets V. A., Myachenkov V. I. [et al.]. *Statika i dinamika tonkostennykh obolocheynykh konstruksiy* [Statics and dynamics of thin-walled shell structures]. Moscow, 1975. 375 p. (In Russ.).

19. *Nauchno-tehnicheskiye razrabotki OKB-23 — KB «Salyut»*. Nauchno-Tekhnicheskiye Razrabotki OKB-23 — KB «Salyut» / Ed. Yu. O. Bakhvalov. Moscow, 2006. 720 p. ISBN 5-88821-065-X. (In Russ.).

20. Wang M., Xin Y., Liu Q. Preparation and Processing of Magnesium Alloys // *Aerospace Materials Handbook: Advances in Materials Science and Engineering* / Eds.: Zhang S., Zhao D. Cleveland: CRC Press, 2016. P. 622–639. ISBN 1439873291. (In Engl.).

21. Bronz A. V., Efremov V. I., Plotnikov A. D., Chernyavsky A. G. *Splav 1570C — material dlya germetichnykh konstruksiy perspektivnykh mnogorazovykh izdeliy RKK «Energiya»* [Alloy 1570C — material for pressurized structures of advanced reusable vehicles of RSC Energiya] // *Kosmicheskaya tekhnika*

i tekhnologii. *Space Technique and Technologies*. 2014. No. 4 (7). P. 62–67. (In Russ.).

---

**KRIVONOS Evgeny Viktorovich**, Senior Lecturer of Metal-Cutting Machines and Tools Department.

SPIN-code: 7238-5136

AuthorID (RSCI): 762266

ORCID: 0000-0001-8485-1862

AuthorID (SCOPUS): 57193400934

ResearcherID: ABC-7096-2020

Address for correspondence: evgenii.krivonos@mail.ru

#### For citations

Krivonos E. V. Investigation of deformation of shell with waffle reinforcement during rolling and development of method for compensation of deviations forms // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 4. P. 90–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-90-98.

Received October 27, 2020.

© E. V. Krivonos