

УДК 621.981.1

Механика утолщения в углах W-образной детали из листового материала за счет избытка длины полок

В.А. Тарасов, В.Д. Баскаков, М.А. Бабурин,
Д.С. Боярский, Р.В. Боярская

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Mechanics of thickening corners of the W-shaped parts made of sheet material by the shelf length excess

V.A. Tarasov, V.D. Baskakov, M.A. Baburin,
D.S. Boyarskiy, R.V. Boyarskaya

Bauman Moscow State Technical University

Утолщения углов W-образных деталей (как решения актуальной технической задачи) можно добиться при распрямлении в штампе гофров, которые образуются при обжатии полок заготовки с избытком длины. Решение этой задачи позволяет увеличить несущую способность силовых конструкций в машино-, авиа- и ракетостроении, повысить электро- и теплопроводность конструкций. Избыток длины заготовки определяет число гофров перед посадкой на плоскости штампа и, как следствие, остаточную амплитуду волнистости и периодичность волн. Сравнение работ пластического деформирования при гофрировании и утолщении углов позволило установить моменты увеличения числа гофров и последующего утолщения углов (моменты бифуркации). В качестве примера на диаграмме приведенной работы деформирования заготовки из стали 30ХГСА показаны две точки бифуркации. Перед первой точкой в процессе утолщения участвуют две полуволны, перед второй — сначала три, а затем четыре. Соответственно волнистость полок детали в этих зонах имеют две, три и четыре полуволны. Предложена методика оценки амплитуды остаточной волнистости на полках детали.

EDN: IOIZDC, <https://elibrary.ioizdc>

Ключевые слова: листовые материалы, пилообразные детали, технология утолщения углов, точки бифуркации

Thickening the corners of the W-shaped parts (as a solution to an urgent technical problem) could be achieved by straightening in the corrugations stamp formed in compression of the workpiece shelf with a length excess. Solution to this problem allows increasing the load-bearing capacity of power structures in mechanical engineering, aircraft and rocket engineering, as well as ensuring electrical and thermal conductivity of the structures. The workpiece length excess determines the corrugations number before installing on the die plane and, as a consequence, the waviness residual amplitude and the waves periodicity. Comparing the plastic deformation work in the corners corrugation and thickening makes it possible to establish the moments of an increase in the number of corrugations and subsequent thickening of corners (bifurcation moments). The 30KhGSA steel deformation diagram shows two bifurcation points, as an example. Two half-waves participate in the thickening process towards the first point, then three and four half-waves — towards the second. Accordingly, the part shelves waviness in these zones has two, three and four half-waves. The paper proposes a method for assessing the residual waviness amplitude on the part shelves.

EDN: IOIZDC, <https://elibrary.ioizdc>

Keywords: sheet materials, saw-tooth parts, corner thickening technology, bifurcation points

Детали уголкового формы и пилообразные детали из листовых материалов широко распространены в машиностроении. В летательных аппаратах это стрингеры, шпангоуты, в тепло- и электротехнике — панели теплообменных аппаратов и токопроводящие шины.

Обычно такие детали получают гибкой, изучению которой посвящены многие работы российских и зарубежных ученых промышленных организаций и вузов [1–9]. Для этого процесса характерно утонение в углах деталей [1, 2], которое ухудшает эксплуатационные характеристики машин.

В связи с этим разработку технологии восстановления толщины детали в углах можно рассматривать как актуальную задачу машиностроения. Применительно к задачам производства решетчатых рулей сборной конструкции для летательных аппаратов [10–14] разработка технологии утолщения в углах W-образных деталей открывает новые технические возможности:

- облегчается создание плоской площадки в углах детали, проходящей через линию пересечения срединных поверхностей полки и равно наклоненных к ним, что позволяет полкам стыкуемых деталей образовывать единую плоскость;

- возрастает площадь стыка между связываемыми деталями, что повышает прочность соединения пайкой или сваркой.

Суть предложенной в работе [15] технологии утолщения углов W-образных деталей состоит в переформовке заготовки W-образной формы с полками, имеющими избыток длины. При этом углы заготовки оказываются меньше 90°, а высота заготовки — больше высоты детали.

Утолщение концов полки является результатом совместного протекания таких процессов, как потеря устойчивости при сжатии [16] и развитие гофрированной поверхности [17, 18], взаимодействие гофров с плоскостями штампа, их распрямление и упругое восстановление после снятия нагрузки. Последнее определяет волнистость полки.

Цель работы — изучение механики совместного протекания процессов образования гофров на полках и роста толщины в углах детали. Только на этой основе можно обосновать

назначение рационального избытка длины полки заготовки, при котором происходит утолщение в углах при их допустимой волнистости.

Процессы образования гофров на полках и роста толщины в углах детали требуют совершенствования работы пластического деформирования.

Работу деформирования, связанную с образованием гофров, будем определять с помощью метода верхней оценки [19, 20]. Принимаем, что расстояние между концами пластины (полки) в соответствии с чертежом должно быть равно L_0 . Сжатие вдоль полки приводит к образованию n полуволн. Длину полки полуфабриката принимаем с избытком ΔL_0 . Полуволна представляет собой дугу окружности на длине полки $L_n = L_0 / n$. Избыток длины полуволны $\Delta L_n = \Delta L_0 / n$. Радиус дуги (радиус кривизны контура полки) R и угол ψ можно связать с ΔL_n в соответствии с рис. 1.

Контур дуги на детали и полуфабрикате связаны соотношением

$$(L_n + \Delta L_n) / 2 = R\psi.$$

С учетом того, что $L_n / 2 = R \sin \psi$, запишем

$$\frac{\Delta L_n}{L_n} = \frac{\Delta L_0}{L_0} = \frac{\psi}{\sin \psi} - 1 \approx \frac{\psi}{\psi - \psi^3/3! + \dots} - 1 \approx \frac{\psi^2}{3!}.$$

Отсюда имеем

$$\psi = \sqrt{3! \frac{\Delta L_0}{L_0}}.$$

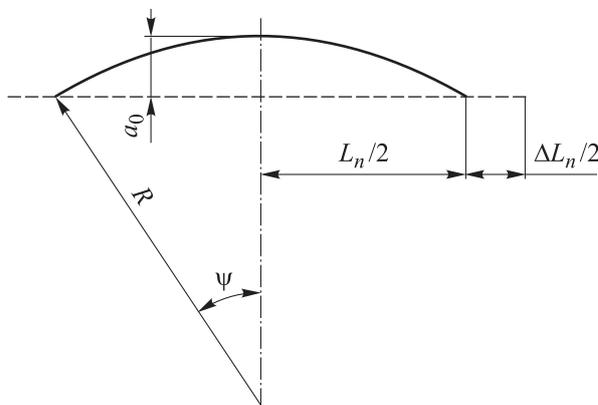


Рис. 1. Схема образования полуволн:
 --- контур полки до сжатия (полуфабрикат);
 — контур полки после сжатия

Тогда кривизну K и амплитуду дуги a_0 можно найти из выражений

$$K = \frac{2n}{L_0} \sqrt{3! \frac{\Delta L_0}{L_0}}; \quad K = 2 \left(\frac{2n}{L_0} \right)^2 a_0. \quad (1)$$

Диаграмму напряженно-деформированного состояния (НДС) полки при упругопластическом деформировании опишем соотношением

$$\sigma = \begin{cases} EK\epsilon & \text{при } \delta^* < \delta_T^*; \\ \sigma_T + DK\epsilon & \text{при } \delta^* > \delta_T^*. \end{cases}$$

Здесь σ и $K\epsilon = \epsilon$ — интенсивности напряжений и деформаций в слое полки с координатой y — расстоянием от срединной поверхности до произвольного слоя полки; E , σ_T и D — модуль упругости, предел текучести и модуль упрочнения материала; $\delta^* = \delta/2$ (δ — толщина полки); δ_T^* — координата слоя при изгибе, где начинается пластическая деформация,

$$\delta_T^* = \frac{1}{K} \frac{\sigma_T}{E}.$$

Погрешность такого представления диаграммы НДС не превышает отношения D/E , вследствие чего считаем ее пренебрежимо малой.

Для удельной работы деформирования единицы объема

$$a^0 = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon$$

получаем зависимость

$$a^0 = \begin{cases} E \frac{\epsilon^2}{2} & \text{при } \delta^* < \delta_T^*; \\ E \frac{\epsilon_T^2}{2} + \sigma_T (\epsilon - \epsilon_T) + \frac{D}{2} (\epsilon^2 - \epsilon_T^2) & \text{при } \delta^* > \delta_T^*, \end{cases}$$

где $\epsilon_T = \sigma_T/E$.

Работу деформирования единицы длины контура полки детали при образовании n полуволен определяем как

$$A_n^0 = 2 \int_0^{\delta^*} a^0 dy.$$

После интегрирования и введения обозначения

$$\tilde{A}_n = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot A_n^0}{2 E \delta^*}$$

получаем соотношение для расчета приведенной работы гофрирования единицы длины полки при изгибе

$$\tilde{A}_n = \frac{10^5 \delta^*}{2R} \begin{cases} \frac{\delta^*}{R} & \text{при } \delta^* < \delta_T^*; \\ \frac{\delta^*}{R} \left(\frac{\delta_T^*}{\delta^*} \right)^3 + 3\bar{\sigma} \left[1 - \left(\frac{\delta_T^*}{\delta^*} \right)^2 \right] + \\ + \bar{D} \frac{\delta^*}{R} \left[1 - \left(\frac{\delta_T^*}{\delta^*} \right)^3 \right] & \text{при } \delta^* > \delta_T^*, \end{cases}$$

где

$$R = 1/K; \quad \bar{\sigma} = \frac{\sigma_T}{E}; \quad \bar{D} = \frac{D}{E}.$$

Диаграмма приведенной работы деформирования заготовки из стали 30ХГСА в виде ее зависимости от избыточной длины $\Delta L/L_0$ при числе полуволен $n = 2, 4$ и 8 показана на рис. 2.

Зависимости относительного зазора H/H_0 от исходного зазора между плоскостями штампа H_0 при его касании гофров для числа полуволен $n = 2, 4$ и 8 приведены на рис. 3. Видно, что в процессе сближения стенок штампа периодически происходит их взаимодействие с гофрами, в результате чего число последних может возрастать, а амплитуда падать. Это создает возможность смыкания плоскостей штампа.

Но для увеличения числа полуволен необходима дополнительная работа деформирования

$$\Delta A_{n \rightarrow n+1} = A_{n+1} - A_n.$$

В качестве примера на рис. 4 приведены результаты расчета дополнительной работы для случаев $\Delta A_{n=2 \rightarrow 3}$ (зеленая кривая) и $\Delta A_{n=4 \rightarrow 5}$ (красная кривая). Увеличение числа полуволен будет происходить лишь в том случае, если дополнительная работа меньше работы утолщения концов полки при посадке гофров на плоскость.

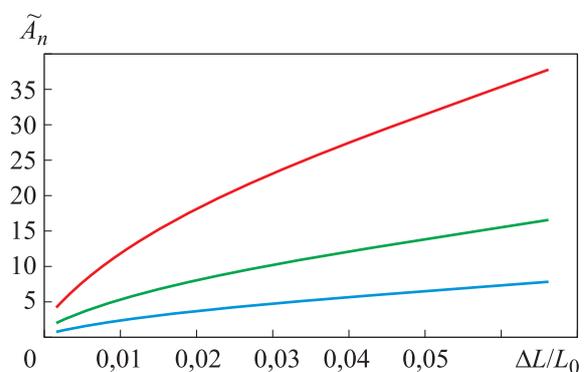


Рис. 2. Зависимости приведенной работы деформирования заготовки A_n из стали 30ХГСА от ее избыточной длины $\Delta L/L_0$ при числе полуволен $n = 2$ (—), 4 (—) и 8 (—)

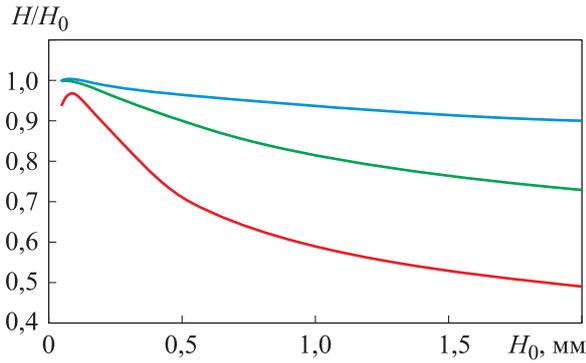


Рис. 3. Зависимости относительного зазора H/H_0 от исходного зазора между плоскостями штампа H_0 при его касании гофров для числа полуволн $n = 2$ (—), 4 (—) и 8 (—)

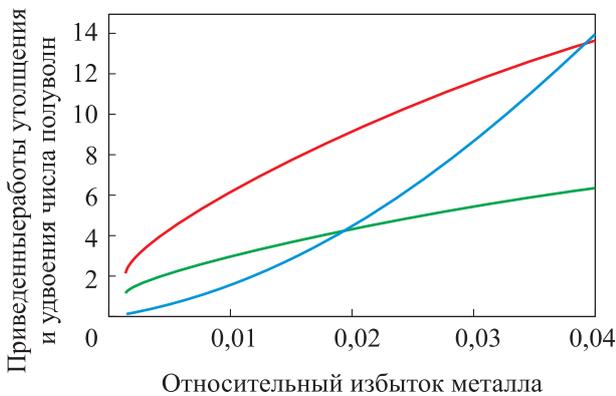


Рис. 4. Зависимости приведенных работ утолщения и удвоения числа полуволн от относительного избытка металла для стали 12Х25Н16Г7, полученные путем расчета для случаев $\Delta A_{n=2 \rightarrow 3}$ (—), $\Delta A_{n=4 \rightarrow 5}$ (—) и по формуле (2) (—)

На основании результатов численных исследований [17, 18] принимаем, что при взаимодействии гофров с плитами штампа контактные напряжения и силы трения образуют силовой замок, который локализует область утолщения при посадке гофров на плоскость. Расстояние между вершиной гофра и точкой контакта на матрице определяется длиной полуволн $\lambda_{1/2}$ и их числом. Окончательно размер зоны утолщения можно определить как $a = \lambda_{1/2} + \theta \Delta L$, где θ — параметр, зависящий от технологической схемы утолщения концов полки детали.

Для простоты будем считать, что утолщение углов происходит путем пластического деформирования металла и подчиняется закону

$$\frac{\Delta \delta}{\delta} = \Delta \bar{\delta} \frac{x}{a},$$

где $\Delta \delta$ — текущее утолщение; $\Delta \bar{\delta}$ — максимальное утолщение на конце полки,

$$\Delta \bar{\delta} = \left(\frac{\Delta \delta}{\delta} \right)_{\max};$$

x — расстояние от конца полки.

Тогда из условия постоянства объема деформируемого металла получаем связь максимального утолщения концов детали с избытком длины полки

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \Delta \bar{\delta} \frac{a}{L_0}.$$

Пренебрегая величиной упругих деформаций, свяжем компоненты тензора деформаций $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ и интенсивность деформаций с максимальным утолщением на концах полки следующим образом:

$$\epsilon_1 = -\epsilon_3; \quad \epsilon_2 = 0; \quad \epsilon_3 = \Delta \bar{\delta} \frac{x}{a}; \quad \epsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \Delta \bar{\delta} \frac{x}{a}.$$

Тогда с учетом выражения (1) для оценки работы утолщения концов полки можно предложить зависимость

$$A_{\Delta \delta} = 2\delta \int_0^a \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon^* dx,$$

где ϵ^* — интенсивность деформации в точке с координатой x .

Интегрируя и приводя работу утолщения концов полки к единице ее длины

$$\tilde{A} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot A_{\Delta \delta}}{2 E \delta^* L_0},$$

получаем

$$\tilde{A} = 10^5 \cdot (1 + \mu_{тр}) \frac{a}{L_0} \psi \Delta \bar{\delta} [3\bar{\sigma} + \bar{D} \psi \Delta \bar{\delta}], \quad (2)$$

где $\mu_{тр}$ — поправка на преодоление сил трения, $\mu_{тр} \approx 0,2$;

$$\psi = \frac{2}{\sqrt{3}}.$$

Результаты расчета по формуле (2) также приведены на рис. 4 (голубая кривая).

Сравнение работ деформирования при утолщении углов детали и увеличении числа гофров показывает, что существуют точки, где кривая утолщения углов пересекает кривые увеличения числа гофров. Они представляют собой моменты бифуркации в процессе обжатия полки с избытком длины, в которых его

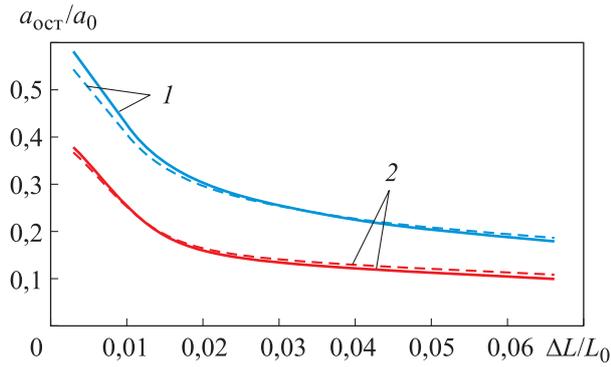


Рис. 5. Зависимости отношения амплитуды волнистости к ее максимальному значению $a_{ост}/a_0$ от отношения $\Delta L/L_0$ при числе полуволн $n = 2$ (1) и 4 (2) для полки деталей из сталей 12Х25Н16Г7 (сплошные линии) и 30ХГСА (штриховые линии)

монотонный ход нарушается. До точки пересечения будет происходить распрямление гофров с утолщением концов полки, а за этой точкой — образование нового гофра и уменьшение амплитуды гофров.

Применительно к рис. 4 до первой точки пересечения избыток длины полки определяет формирование двух полуволн и их последующую посадку на плоскость с утолщением в углах. За этой точкой пересечения энергетически более выгодным оказывается развитие трех полуволн с последующей посадкой на плоскость и с утолщением в углах. За второй точкой пересечения число полуволн увеличивается с четырех до пяти.

Предложенная модель также позволяет оценивать остаточную волнистость после обжатия заготовки с избытком длины. После снятия нагрузки кривизна уменьшается на величину $\Delta K_{раз}$, а напряжение будет зависеть от координаты слоя $\Delta\sigma = E\Delta K_{раз}y$ следующим образом:

$$\sigma = \begin{cases} EKy - E\Delta K_{раз}y & \text{при } \delta/2 < y_T^*; \\ \sigma_T + DKy - E\Delta K_{раз}y & \text{при } \delta/2 > y_T^*, \end{cases}$$

где

$$y_T^* = \frac{1}{K - \Delta K_{раз}} \frac{\sigma_T}{E}.$$

Литература

- [1] Романовский В.П. *Справочник по холодной штамповке*. Ленинград, Машиностроение, 1979. 520 с.
- [2] Попов Е.А. *Основы теории листовой штамповки*. Москва, Машиностроение, 1968. 283 с.

Распределение напряжений по координате y определяет изгибающий момент в сечении полки

$$M_{раз} = 2 \int_0^{\delta/2} \sigma y dy.$$

После снятия нагрузки и извлечения детали из штампа условие равновесия полки детали будет записано как $M_{раз} = 0$. Отсюда получаем следующее соотношение для оценки остаточной кривизны полки детали $K_{ост}$:

$$\frac{K_{ост}}{K} = \frac{3\bar{\sigma}}{K\delta} \left[1 - \left(\frac{2y_T}{\delta} \right)^2 \right] + \bar{D} \left[1 - \left(\frac{2y_T}{\delta} \right)^3 \right].$$

С учетом пропорциональности амплитуды остаточных полуволн $a_{ост}$ и остаточной кривизны $K_{ост}$ гофра запишем

$$\frac{a_{ост}}{a_0} = \frac{K_{ост}}{K} = \eta \left\{ \frac{3\bar{\sigma}}{2K\delta^*} \left[1 - \left(\frac{\delta_T^*}{\delta^*} \right)^2 \right] + \bar{D} \left[1 - \left(\frac{\delta_T^*}{\delta^*} \right)^3 \right] \right\},$$

где $\eta \approx 0,5$.

Результаты оценки амплитуды остаточных полуволн (волнистости) на полке деталей из сталей 12Х25Н16Г7 и 30ХГСА приведены на рис. 5.

Таким образом, избыток металла определяет не только утолщение на концах, но и число полуволн, соответствующих волнистости пластины после косоугольного сжатия.

Выводы

1. Утолщения углов W-образных деталей можно добиться путем посадки на плоскости штампа гофров, образуемых при обжатии W-образной заготовки с избытком длины.

2. Избыток длины заготовки определяет число гофров перед посадкой на плоскость штампа и, как следствие, остаточную амплитуду волнистости и периодичность волн.

3. Наличие на диаграмме точек пересечения кривых работ деформирования при гофрировании полок и утолщении углов детали определяет зоны фиксированного числа гофров (двух, трех, четырех и т. д.).

- [3] Тарасов В.А., Баскаков В.Д., Бабури́н М.А. и др. Методика инженерной оценки погрешности гибки деталей уголко́вой формы в инструментальном штампе. *Технология металлов*, 2019, № 3, с. 7–13.
- [4] Tarasov V.A., Baskakov V.D., Baburin M.A. et al. Engineering estimation of the error of bending of angle blanks in a tool die. *Russ. Met.*, 2019, vol. 2019, no. 13, pp. 1460–1465, doi: <https://doi.org/10.1134/S0036029519130378>
- [5] Ершов В.И., Попов О.В., Чумадин А.С. и др. *Листовая штамповка*. Москва, Изд-во МАИ, 1999. 516 с.
- [6] Чумадин А.С. *Теория и расчеты процессов листовой штамповки*. Москва, Экспосервис ВИП, 2014. 216 с.
- [7] Wanintradul C., Golovashchenko S.F., Gillard A.J. et al. Hemming process with counteraction force to prevent creepage. *J. Manuf. Process.*, 2014, vol. 16, no. 3, pp. 379–390, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.04.003>
- [8] Savelev L.M. Material deformation curve approximation in strength and stability analysis. *Russ. Aeronaut.*, 2011, vol. 54, no. 3, pp. 292–297, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068799811030093>
- [9] Kuwabara T. Advances in experiments on metal sheets and tubes in support of constitutive modeling and forming simulations. *Int. J. Plast.*, 2007, vol. 23, no. 3, pp. 385–419, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2006.06.003>
- [10] Феодосьев В.И., Синярев Г.Б. *Введение в ракетную технику*. Москва, Оборонгиз, 1961. 506 с.
- [11] Пытьев П.Я., Корнев Е.П., Барвинок В.А. *Основы технологии производства летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1995. 400 с.
- [12] Братухин А.Г., Иванов Ю.Л., ред. *Современные технологии авиастроения*. Москва, Машиностроение, 1999. 832 с.
- [13] Чумадин А.С., Ершов В.И., В.А. Барвинок и др. *Теоретические основы авиа- и ракетостроения*. Москва, Дрофа, 2005. 784 с.
- [14] Барвинок В.А., ред. *Современные технологии в авиа- и ракетостроении*. Москва, Машиностроение, 2014. 401 с.
- [15] Боярский Д.С., Баскаков В.Д., Тарасов В.А. и др. *Способ изготовления профилей W-образного сечения из листовых заготовок*. Патент РФ 2791199. Заявл. 11.02.2022, опубл. 03.03.2023.
- [16] Феодосьев В.И. *Сопrotивление материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 542 с.
- [17] Боярский Д.С., Тарасов В.А., Бабури́н М.А. и др. Численный анализ эволюции процесса гофрообразования при косом обжатии пластины в условиях гибки уголко́вых деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 9, с. 92–99, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-9-92-99>
- [18] Тарасов В.А., Баскаков В.Д., Боярский Д.С. и др. Влияние трения и упругого восстановления формы на развитие гофров при косом сжатии пластины в штамповой оснастке. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2023, № 2, с. 61–72, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-61-72>
- [19] Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. *Механика пластических деформаций при обработке металлов*. Москва, Машиностроение, 1969. 503 с.
- [20] Тарасов В.А. *Методы анализа в технологии машиностроения. Аналитическое моделирование динамических процессов обработки материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. 185 с.

References

- [1] Romanovskiy V.P. *Spravochnik po kholodnoy shtampovke* [Reference book on cold forging]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979. 520 p. (In Russ.).
- [2] Попов Е.А. *Osnovy teorii listovoy shtampovki* [Fundamentals of the theory of sheet forging]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 283 p. (In Russ.).
- [3] Tarasov V.A., Baskakov V.D., Baburin M.A. et al. Engineering evaluation method of bending error of angle-shape components in tool stamp. *Tekhnologiya metallov*, 2019, no. 3, pp. 7–13. (In Russ.).

- [4] Tarasov V.A., Baskakov V.D., Baburin M.A. et al. Engineering estimation of the error of bending of angle blanks in a tool die. *Russ. Met.*, 2019, vol. 2019, no. 13, pp. 1460–1465, doi: <https://doi.org/10.1134/S0036029519130378>
- [5] Ershov V.I., Popov O.V., Chumadin A.S. et al. *Listovaya shtampovka* [Sheet forging]. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 1999. 516 p. (In Russ.).
- [6] Chumadin A.S. *Teoriya i raschety protsessov listovoy shtampovki* [Theory and calculations of sheet forging processes]. Moscow, Eksposervis VIP Publ., 2014. 216 p. (In Russ.).
- [7] Wanintradul C., Golovashchenko S.F., Gillard A.J. et al. Hemming process with counteraction force to prevent creepage. *J. Manuf. Process.*, 2014, vol. 16, no. 3, pp. 379–390, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.04.003>
- [8] Savelev L.M. Material deformation curve approximation in strength and stability analysis. *Russ. Aeronaut.*, 2011, vol. 54, no. 3, pp. 292–297, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068799811030093> (in Russ.).
- [9] Kuwabara T. Advances in experiments on metal sheets and tubes in support of constitutive modeling and forming simulations. *Int. J. Plast.*, 2007, vol. 23, no. 3, pp. 385–419, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2006.06.003>
- [10] Feodosyev V.I., Sinyarev G.B. *Vvedenie v raketnuyu tekhniku* [Introduction to rocket technology]. Moscow, Oborongiz Publ., 1961. 506 p. (In Russ.).
- [11] Pytyev P.Ya., Kornev E.P., Barvinok V.A. *Osnovy tekhnologii proizvodstva letatelnykh apparatov* [Fundamentals of aircraft production technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 400 p. (In Russ.).
- [12] Bratukhin A.G., Ivanov Yu.L., eds. *Sovremennyye tekhnologii aviastroeniya* [Modern technologies of aircraft building]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1999. 832 p. (In Russ.).
- [13] Chumadin A.S., Ershov V.I., Barvinok V.A. et al. *Teoreticheskie osnovy avia- i raketostroeniya* [Theoretical bases of aviation and rocket construction]. Moscow, Drofa Publ., 2005. 784 p. (In Russ.).
- [14] Barvinok V.A., ed. *Sovremennyye tekhnologii v avia- i raketostroenii* [Modern technologies in aviation and rocket construction]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014. 401 p. (In Russ.).
- [15] Boyarskiy D.S., Baskakov V.D., Tarasov V.A. et al. *Sposob izgotovleniya profilye W-obraznogo secheniya iz listovykh zagotovok* [Method for manufacturing W-shaped profiles from sheet metal billets]. Patent RU 2791199. Appl. 11.02.2022, publ. 03.03.2023. (In Russ.).
- [16] Feodosyev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2018. 542 p. (In Russ.).
- [17] Boyarskiy D.S., Tarasov V.A., Baburin M.A. et al. Numerical analysis of corrugation development during oblique compression of a plate when manufacturing angle metal parts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2022, no. 9, pp. 92–99, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-9-92-99> (in Russ.).
- [18] Tarasov V.A., Baskakov V.D., Boyarskiy D.S. et al. Influence of friction and elastic shape recovery on the development of corrugations under oblique plate compression in die tooling. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinotr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2023, no. 2, pp. 61–72, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-61-72> (in Russ.).
- [19] Thomsen E.G., Yang C.T., Kobayashi S. *Mechanics of plastic deformation in metal processing*. Macmillan, 1965. 486 p. (Russ. ed.: *Mekhanika plasticheskikh deformatsiy pri obrabotke metallov*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 503 p.)
- [20] Tarasov V.A. *Metody analiza v tekhnologii mashinostroeniya. Analiticheskoe modelirovanie dinamicheskikh protsessov obrabotki materialov* [Methods of analysis in mechanical engineering technology. Analytical modelling of dynamic processes of materials processing]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1996. 185 p. (In Russ.).

Информация об авторах

ТАРАСОВ Владимир Алексеевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: tarasov_va@mail.ru).

БАСКАКОВ Владимир Дмитриевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: baskakov_vd@mail.ru).

БАБУРИН Михаил Аронович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: babma@mail.ru).

БОЯРСКИЙ Даниил Сергеевич — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: 27107357711@mail.ru).

БОЯРСКАЯ Раиса Владимировна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: brv152@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тарасов В.А., Баскаков В.Д., Бабурин М.А., Боярский Д.С., Боярская Р.В. Механика утолщения в углах W-образной детали из листового материала за счет избытка длины полок. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 12, с. 52–59.

Please cite this article in English as:

Tarasov V.A., Baskakov V.D., Baburin M.A., Boyarskiy D.S., Boyarskaya R.V. Mechanics of thickening corners of the W-shaped parts made of sheet material by the shelf length excess. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 12, pp. 52–59.

Information about the authors

TARASOV Vladimir Alekseevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: tarasov_va@mail.ru).

BASKAKOV Vladimir Dmitrievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: baskakov_vd@mail.ru).

BABURIN Mikhail Aronovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: babma@mail.ru).

BOYARSKIY Daniil Sergeevich — Postgraduate, Department of Aerospace Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: 27107357711@mail.ru).

BOYARSKAYA Raisa Vladimirovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: brv152@mail.ru).