

УДК 629.7.018.002.72 (075)

doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-92-99

Численный анализ эволюции процесса гофрообразования при косом обжатии пластины в условиях гибки уголкового деталей

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

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Numerical Analysis of Corrugation Development during Oblique Compression of a Plate When Manufacturing Angle Metal Parts

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

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрена проблема образования гофров на стенке деталей при листовой штамповке. Проведен вычислительный эксперимент в программной среде Deform-3D для технологических операций формовки заготовки в стесненных условиях инструментального штампа. Установлены возможность и условия возникновения гофров на полках детали уголкового формы, образующих широкий класс элементов летательных аппаратов: стрингеров, ребер жесткости и элементов конструкции решетчатых рулей и крыльев.

Ключевые слова: косое обжатие, потеря устойчивости, амплитуда гофра, эволюция процесса гофрообразования

The paper considers the problem of corrugation developing on walls of parts during sheet metal forming. We performed a numerical experiment using Deform-3D software to simulate manufacturing operations pertaining to forming a workpiece in the cramped conditions of the die. We established probabilities and conditions for corrugations developing on the shelves of angle metal parts representing a wide range of aircraft components, such as stringers, stiffeners and structural elements of lattice rudders and wings.

Keywords: oblique compression, stability loss, corrugation magnitude, developing corrugation

Большое количество тонкостенных деталей летательных аппаратов изготавливают из листа в инструментальных штампах. Среди процессов листовой штамповки гибка занимает важное место [1–4] и может сопровождаться такими явлениями, как упругое пружинение и утонение.

В работах [5, 6] исследован процесс упругого восстановления формы детали (пружинение) и

оценена погрешность углового размера деталей после гибки.

В трудах [1, 2] обобщены экспериментальные данные об утонении деталей и предложена методика его оценки. В публикациях [7, 8] дан теоретический анализ утонения изделия в рамках традиционных допущений о положении нейтрального слоя и о сохранении плоскостности сечений при гибке.

Родственным процессом гибки уголкового детали является подгибка кромки листовой панели на угол 180° [9]. При этом современные компьютерные средства, например, Deform-3D [10], позволяют более глубоко проникнуть в физическую природу пластического формообразования.

В частности, программные комплексы для конечно-элементного моделирования дают возможность использования более сложных моделей деформируемого тела, разработке которых в настоящее время уделяется большое внимание [11–15]. Эти модели позволяют исследовать деформирование при одновременном изгибе и сжатии стенки детали.

Утонение стенки при гибке снижает работоспособность деталей ракетно-космической техники и может приводить к увеличению их массы. В работах [9, 16] предложен способ увеличения толщины детали в ее вершине путем создания искусственного избытка длины заготовки и последующей формовки в стесненных условиях инструментального штампа.

Схема создания избытка металла за счет контролируемого несовпадения контуров детали и V-образной заготовки приведена на рис. 1, где F и P — силы, действующие на заготовку при формовке в стесненных условиях.

При формовке V-образная заготовка неподвижными концами A и C опирается на матрицу. В точке B создается зазор между заготовкой и нижней плитой пресс-инструмента. Утолщение вершины детали происходит под действием силы F .

Согласно основам теории потери устойчивости, заложенным Л. Эйлером и в последую-

щем развитым в многочисленных трудах ученых, например, В.И. Феодосьева и Ю.Н. Работнова [17, 18], у пластин и стержней это явление возникает при превышении критического значения силы осевого сжатия.

Однако в технологических процессах формовки тонкостенных деталей летательных аппаратов (стрингеров, ребер жесткости и элементов конструкции решетчатых рулей и крыльев) сжатие происходит в более сложных условиях.

Цель работы — выявить и учесть причины и последовательность образования гофров на полках уголкового детали при формовке в инструментальном штампе.

Сложность изучения гофрообразования состоит в том, что при физическом эксперименте трудно организовать наблюдение за поведением пластины в процессе косоугольного обжатия, которое соответствует формовке уголкового детали в штампе. Более перспективным является проведение вычислительного эксперимента с помощью разнообразных программных продуктов.

Указанная цель достигалась путем конечно-элементного моделирования в программно-математической среде Deform-3D. В качестве модельной задачи изучалось деформирование пластины, косо зажатой между плитами пресса.

Согласно данным работы [8], форма потери устойчивости контура пластины при обжатии зависит от граничных условий. Наиболее вероятные схемы потери устойчивости пластины в зависимости от граничных условий применительно к косоугольному обжатию при формовке в штампе показаны на рис. 2. Здесь для парамет-

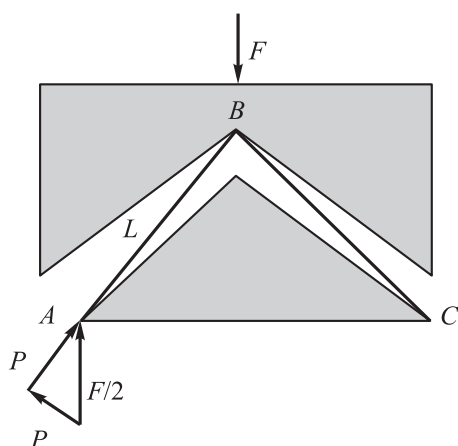


Рис. 1. Схема создания избытка металла за счет контролируемого несовпадения контуров детали и V-образной заготовки

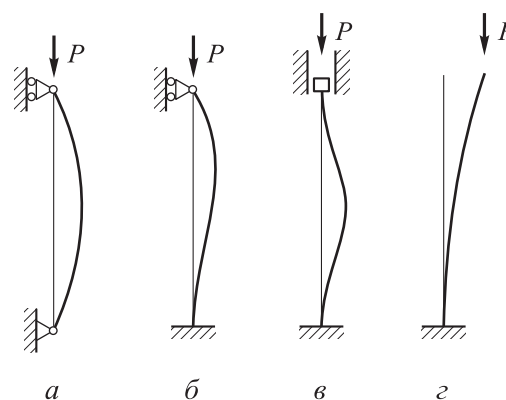


Рис. 2. Наиболее вероятные схемы потери устойчивости пластины в зависимости от граничных условий применительно к косоугольному обжатию при формовке в штампе:
 а — $\mu = 1,0$; б — $\mu = 0,7$; в — $\mu = 0,5$; г — $\mu = 2,0$

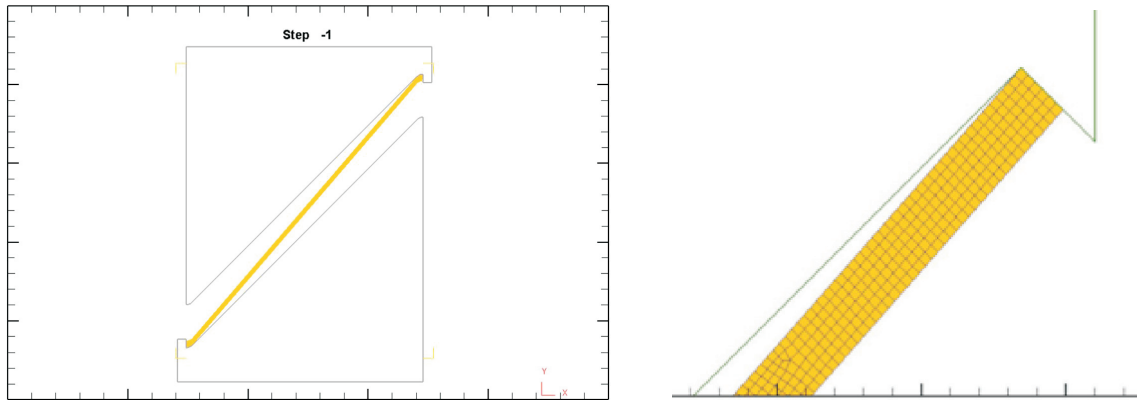


Рис. 3. Расчетные схемы пластины с прямыми концами, косо расположенной между жесткими плитами, (а) и фрагмент ее контакта с упорами (б)

ра, учитывающего тип и количество опор, введено обозначение μ .

Для оценки критической нагрузки, приводящей к потере устойчивости, выбрано соотношение

$$\sigma_{кр} = \frac{P_{кр}}{b\delta} = \frac{\pi^2 E}{12} \left(\frac{\delta}{\mu L} \right)^2,$$

где $P_{кр}$ — критическая сила; b , δ и L — ширина, толщина и длина пластины; E — модуль упругости материала.

Вычислительный эксперимент при изучении эволюции образования гофров проведен для пластины, выполненной из стали 12Х25Н16Г7. Длина пластины — 34 мм, толщина — 0,8 мм. Зазор между пластиной и пресс-инструментом выбран равным 4 мм.

Конечно-элементная модель пластины состояла из 2000 ячеек. Пластина с прямыми концами косо располагалась между упорами на плитах (рис. 3, а): верхней подвижной и нижней неподвижной. Торцы пластины опирались на упоры деформирующих плит (рис. 3, б).

Для описания диаграммы напряженно-деформированного состояния пластины выбрана следующая зависимость:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \text{— область упругих деформаций;} \\ \sigma_T (1 + a\varepsilon - b\varepsilon^2) & \text{— область пластических деформаций,} \end{cases}$$

где σ — напряжение в пластине; $E = 200$ ГПа; ε — деформация пластины; $\sigma_T = 330$ МПа — предел текучести материала; $a = 8,6513$; $b = 16,6885$.

Результаты расчетов выводились по номеру шага деформирования пластины, который был

связан с исходным H_0 и текущим H зазорами между заготовкой и матрицей соотношением

$$N = 160(1 - H/H_0).$$

Согласно данным работы [17], минимальное значение критической нагрузки получено для полуволны с контуром пластины (рис. 2, а), описываемым соотношением

$$y = a_0 \sin \frac{\pi z}{L},$$

где a_0 — амплитуда отклонения гофрированного контура от прямой; z — координата произвольной точки на контуре пластины.

Амплитуда отклонения гофрированного контура от прямой связана с изменением расстояния между концами пластины S условием постоянства длины полуволны

$$a_0 = \frac{L}{n\pi} \sqrt{\frac{S}{L}}; \quad (1)$$

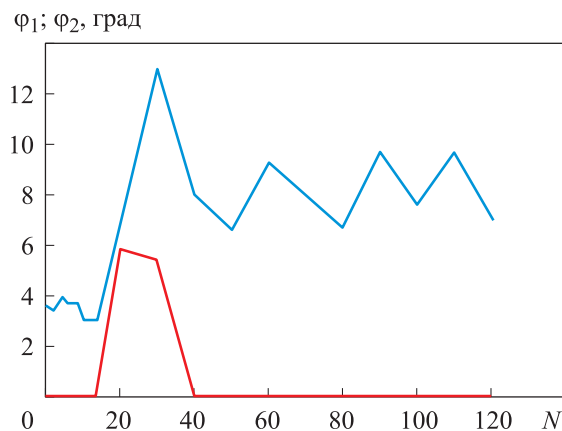


Рис. 4. Зависимость углов между боковой поверхностью пластины φ_1 (—) и верхней плитой и торцом φ_2 (—) пластины и упором на верхней плите штампа от шага деформирования пластины N

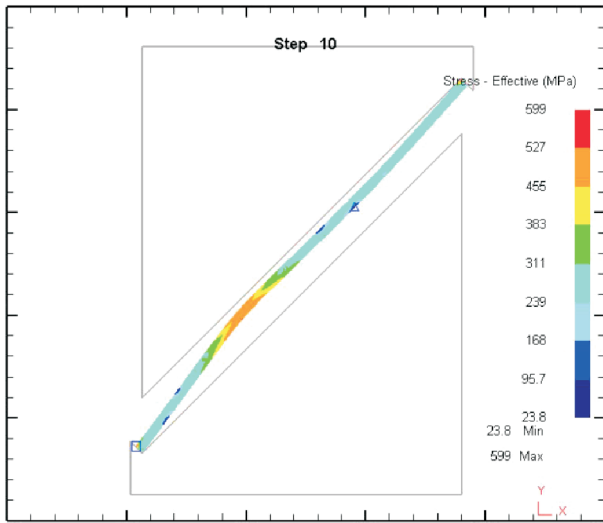


Рис. 5. Распределение напряжений, МПа, по контуру пластины на начальной стадии обжатия

$$S = \frac{H_0 - H}{\sqrt{2}},$$

где n — число полуволн по длине пластины.

По результатам расчета определены изменения углов между контуром пластины и плитами штампа. В качестве примера на рис. 4 показано изменение угла между поверхностями пластины и верхней плиты штампа.

Установлено, что в начальной стадии процесса верхний и нижний концы пластины деформируются неодинаково. До шага $N = 10$ угол между пластиной и верхней плитой не изменяется, что соответствует жесткому заземлению.

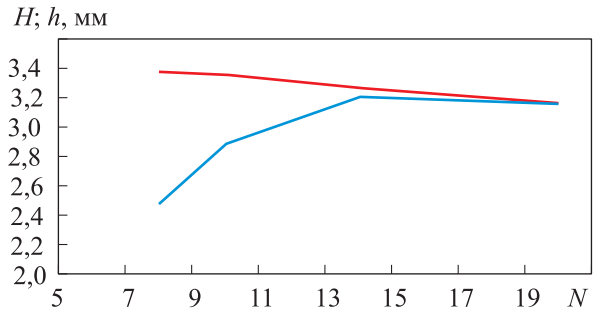
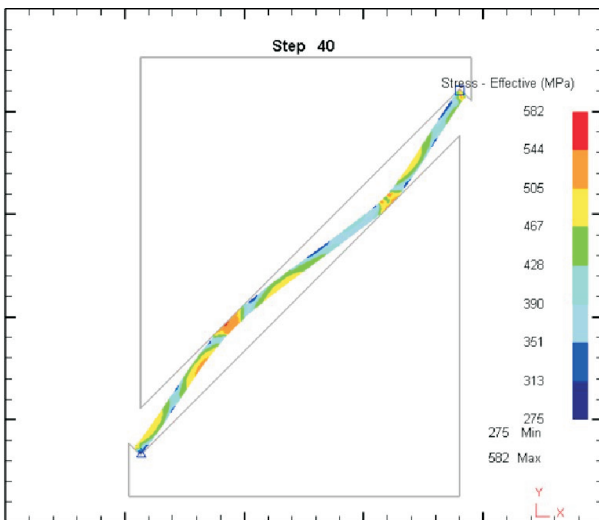


Рис. 6. Зависимость расстояния от неподвижной плиты штампа до вершины гофра h (—) и зазора H между плитами (—) от номера шага расчетов N

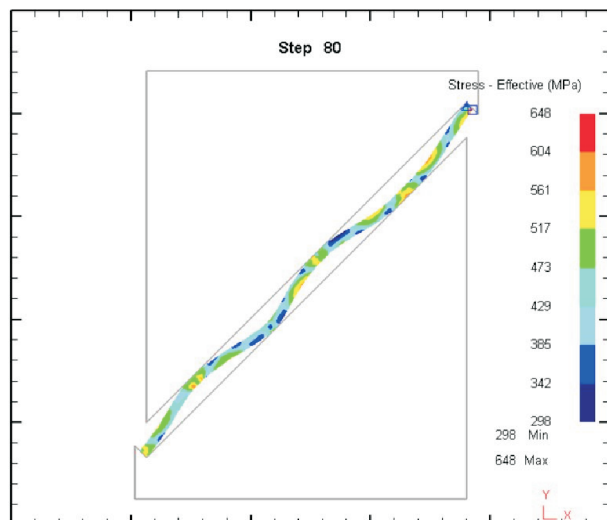
В то же время угол между пластиной и нижней плитой меняется. При этом прогибы и распределение напряжений по контуру пластины (рис. 5) соответствуют схеме потери устойчивости, изображенной на рис. 2, б.

Анализ результатов расчета показал, что в области нижнего конца пластины образуется один гофр на расстоянии 0,3 длины хорды, соединяющей ее концы. По мере уменьшения зазора H между плитами высота гофра увеличивается. Эта тенденция показана на рис. 6, где параметр h характеризует расстояние от вершины гофра до нижней плиты.

При $N = 14$ вершина гофра касается верхней плиты штампа, что является причиной одновременного поворота концов пластины на упорах с образованием углов между торцами и упорами (см. рис. 4). В результате происходит образование новых гофров: сначала у нижнего конца, затем у верхнего.



а



б

Рис. 7. Распределение напряжения, МПа, по контуру пластины на шаге деформирования $N = 40$ (а) и 80 (б)

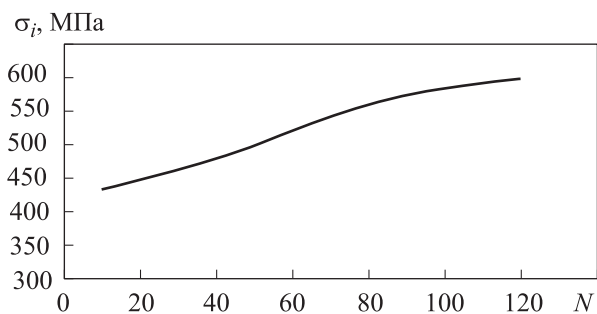


Рис. 8. Зависимость интенсивности напряжения в вершине гофра σ_i от шага деформирования пластины N

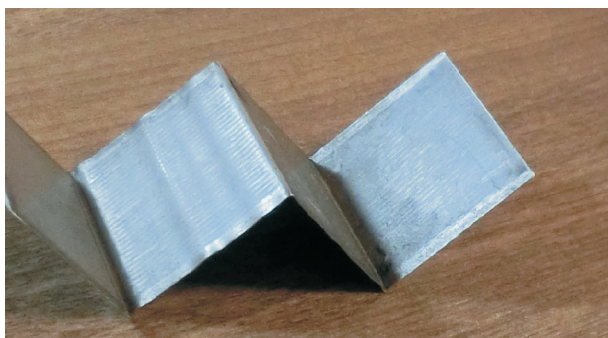


Рис. 9. Картина образования остаточных гофров при формовке W-образной заготовки

На рис. 7, а наблюдаются два гофра (две полуволны). Обжимающие плиты касаются образовавшихся гофров. При этом первое касание происходит на верхней плите.

Дальнейшее развитие процесса обжатия приведет к образованию очередного гофра на верхней плите, что отчетливо видно на рис. 7, б для шага деформирования $N = 80$. Одновременно можно наблюдать зарождение следующего гофра на нижней плите.

В последующем процесс образования новых гофров будет повторяться в точках их взаимодействия с обжимающими плитами. Для процесса взаимодействия также характерно, что появление каждой очередной волны сопровождается временным снижением напряжения в пластине.

Анализ результатов численного расчета показал рост (рис. 8) напряжений в вершине гоф-

ра σ_i по мере деформирования пластины. Очевидно, что деформация упругого пружинения гофров будет возрастать пропорционально этим напряжениям.

Это приведет к сохранению остаточного удлинения пластины S^* , и с учетом связи (1) между амплитудой волны и избытком длины пластины можно оценить амплитуду остаточной волнистости после пружинения

$$\frac{a_0^{\text{ост}}}{a_0} = \sqrt{\frac{\sigma_i S^*}{E L}},$$

где a_0 и $a_0^{\text{ост}}$ — амплитуда гофрированной пластины на стадии нагружения и последующей разгрузки.

Следует отметить, что частотные характеристики гофрированной поверхности после пружинения нуждаются в дальнейшем исследовании.

Результаты экспериментов показывают, что при формовке W-образной заготовки (рис. 9) с зазором более 2 мм наиболее вероятным является образование двух гофров и двух впадин, что соответствует шагу расчета $N = 80$.

Выводы

1. Причиной эволюции гофрированного контура полки уголкового детали является косоугольное обжатие плоских концов в стесненных условиях штампа. Образование гофров — постепенный процесс. Фактором возникновения гофров, помимо сжимающих напряжений, является воздействие на пластину плоскостей штампа.

2. Усилие косоугольного обжатия пластины и степень пластической деформации в гофрированной пластине зависят от длины заготовки и степени смыкания плоскостей штампа.

3. Снижение амплитуды остаточных гофров следует ожидать при уменьшении отношения исходного зазора между матрицей и пластиной к толщине последней.

Литература

- [1] Романовский В.П. *Справочник по холодной штамповке*. Ленинград, Машиностроение, 1979. 522 с.
- [2] Попов Е.А. *Основы теории листовой штамповки*. Москва, Машиностроение, 1968. 283 с.

- [3] Ершов В.И., Попов О.В., Чумадин А.С. и др. *Листовая штамповка*. Москва, Изд-во МАИ, 1999. 516 с.
- [4] Чумадин А.С. *Теория и расчеты процессов листовой штамповки*. Москва, Экспосервис ВИП, 2014. 216 с.
- [5] Тарасов В.А., Баскаков В.Д., Бабурин М.А. и др. Методика инженерной оценки погрешности гибки деталей уголкового формы в инструментальном штампе. *Технология металлов*, 2019, № 3, с. 7–13.
- [6] Wanintradul C., Golovashchenko S.F., Gillard A.J. et al. Hemming process with counteraction force to prevent creepage. *J. Manuf. Proces.*, 2014, vol. 16, no. 3, pp. 379–390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.04.003>
- [7] Тарасов В.А., Баскаков В.Д., Бабурин М.А. и др. Утонение стенки в вершине детали уголкового формы при гибке в инструментальном штампе. *Технология металлов*, 2021, № 4, с. 22–27.
- [8] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Боярский Д.С. Методика приближенной оценки утонения детали уголкового формы при гибке в инструментальном штампе. *XLIV Академические чтения по космонавтике*. Т. 2. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020, с. 399–401.
- [9] Мантусов М.Н. Штамповка криволинейных бортов листовых деталей эластомером с наложением тангенциального сжатия. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2021, № 4, с. 17–22.
- [10] Чечулин Ю.Б., ред. *Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D*. Екатеринбург, УрФу, 2010. 266 с.
- [11] 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>
- [12] 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>
- [13] Дмитриев А.М., Воронцов А.Л. Аппроксимация кривых упрочнения металлов. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2002, № 6, с. 16–22.
- [14] Воронцов А.Л. Об аппроксимации кривых упрочнения. *Вестник машиностроения*, 2002, № 1, с. 51–54.
- [15] Тарасов В.А., Баскаков В.Д., Бабурин М.А. и др. Аппроксимация диаграмм деформирования сталей по их механическим характеристикам. *Черные металлы*, 2020, № 8, с. 59–63.
- [16] Бабурин М.А., Водянский М.Л., Грачев А.В. *Способ изготовления профилей преимущественно W-образного сечения*. Патент 2267373. Заявл. 05.03.2004, опубл. 10.01.2006.
- [17] Феодосьев В.И. *Сопротивление материалов*. Москва, Наука, 1979. 559 с.
- [18] Работнов Ю.Н. *Сопротивление материалов*. Москва, Физматгиз, 1962. 455 с.

References

- [1] Romanovskiy V.P. *Spravochnik po kholodnoy shtampovke* [Handbook on cold forging]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979. 522 p. (In Russ.).
- [2] Popov E.A. *Osnovy teorii listovoy shtampovki* [Fundamentals of sheet forming theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 283 p. (In Russ.).
- [3] Ershov V.I., Popov O.V., Chumadin A.S. et al. *Listovaya shtampovka* [Sheet forming]. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 1999. 516 p. (In Russ.).
- [4] Chumadin A.S. *Teoriya i raschety protsessov listovoy shtampovki* [Theory and calculation of sheet forming processes]. Moscow, Eksposervis VIP Publ., 2014. 216 p. (In Russ.).
- [5] Tarasov V.A., Baskakov V.D., Baburin M.A. et al. Estimation of the error of bending of angle blanks in a tool die. *Tekhnologiya metallov*, 2019, no. 3, pp. 7–13. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Metall.*, 2019, vol. 13, pp. 1460–1465, doi: <https://doi.org/10.1134/S0036029519130378>)

- [6] Wanintradul C., Golovashchenko S.F., Gillard A.J. et al. Hemming process with counteraction force to prevent creepage. *J. Manuf. Proces.*, 2014, vol. 16, no. 3, pp. 379–390, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.04.003>
- [7] Tarasov V.A., Baskakov V.D., Baburin M.A. et al. Wall thinning at the vertex of an angle piece for bending in a tool die. *Tekhnologiya metallov*, 2021, no. 4, pp. 22–27. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Metall.*, 2021, vol. 2021, no. 13, 1738–1742. <https://doi.org/10.1134/S0036029521130310>)
- [8] Baburin M.A., Baskakov V.D., Boyarskiy D.S. [Method for an approximate evaluation of thinning details of a corner form during bending in the tool stamp]. *XLIV Akademicheskie chteniya po kosmonavtike*. T. 2 [XLIV Academic Space Conference. Vol. 2]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020, pp. 399–401. (In Russ.).
- [9] Mantusov M.N. Stamping of curved flanges of sheet parts with elastomer with the imposition of tangential compression. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Processing of Materials by Pressure], 2021, no. 4, pp. 17–22. (In Russ.).
- [10] Chechulin Yu.B., ed. *Prakticheskoe rukovodstvo k programmnomu kompleksu DEFORM-3D* [Practice guidelines for DEFORM-3D software]. Ekaterinburg, UrFu Publ., 2010. 266 p. (In Russ.).
- [11] 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>
- [12] 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>
- [13] Dmitriev A.M., Vorontsov A.L. Approximation of metal hardening curves. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Processing of Materials by Pressure], 2002, no. 6, pp. 16–22. (In Russ.).
- [14] Vorontsov A.L. On approximation of hardening curves. *Vestnik mashinostroeniya*, 2002, no. 1, pp. 51–54.
- [15] Tarasov V.A., Baskakov V.D., Baburin M.A. et al. Approximation of steel deformation curve by their mechanical characteristics. *Chernye metally*, 2020, no. 8, pp. 59–63. (In Russ.).
- [16] Baburin M.A., Vodyanskiy M.L., Grachev A.V. *Sposob izgotovleniya profiley preimushchestvenno W-obraznogo secheniya* [Method for forming, mainly shapes with w-like cross section]. Patent 2267373. Appl. 05.03.2004, publ. 10.01.2006. (In Russ.).
- [17] Feodos'yev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 559 p. (In Russ.).
- [18] Rabotnov Yu.N. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962. 455 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 17.06.2022

Информация об авторах

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

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, к. 1, e-mail: tarasov_va@mail.ru).

Information about the authors

BOYARSKIY Daniil Sergeevich — Post-graduate, 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).

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).

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, к. 1, e-mail: babma@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, к. 1, e-mail: baskakov_vd@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, к. 1, e-mail: brv152@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 Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: babma@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).

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

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Боярский Д.С., Тарасов В.А., Бабури М.А., Баскаков В.Д., Боярская Р.В. Численный анализ эволюции процесса гофрообразования при косом обжатии пластины в условиях гибки угловых деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 9, с. 92–99, doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-92-99

Please cite this article in English as:

Boyarskiy D.S., Tarasov V.A., Baburin M.A., Baskakov V.D., Boyarskaya R.V. Numerical Analysis of Corrugation Development during Oblique Compression of a Plate When Manufacturing Angle Metal Parts. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 9, pp. 92–99, doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-92-99



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию**

**«Технология производства малотоннажных
судов из композиционных материалов»**

Авторы: В.А. Нелюб, М.Э. Францев, А.С. Бородулин

Изложены основные сведения о конструкторско-технологических решениях, особенностях проектирования, производства и диагностики состояния композитных конструкций малотоннажных судов. Приведены физико-механические характеристики и показаны перспективы применения полимерно-волоконистых композитных материалов на основе стеклянных и углеродных наполнителей, полиэфирных и эпоксидных связующих при производстве корпуса и надстройки судовых конструкций. Рассмотрены технологические методы и рекомендованы рациональные технологические процессы изготовления композиционных элементов судовых конструкций. Изложены технологические методы и средства неразрушающего контроля композиционных конструкций малотоннажных судов.

Для специалистов в области производства и эксплуатации композиционных конструкций малотоннажных судов, а также аспирантов технических вузов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>