

ВЛИЯНИЕ ТРЕНИЯ И УПРУГОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФОРМЫ НА РАЗВИТИЕ ГОФРОВ ПРИ КОСОМ СЖАТИИ ПЛАСТИНЫ В ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКЕ

В.А. Тарасов

В.Д. Баскаков

Д.С. Боярский

Н.В. Герасимов

М.А. Бабурин

К.А. Карнаухов

tarasovva@bmstu.ru

baskakov_vd@bmstu.ru

27107357711@mail.ru

gerasimovnv@bmstu.ru

baburin_ma@bmstu.ru

karnaukhov93@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Переформовка деталей уголкового формы является актуальной технической задачей, так как позволяет обеспечить утолщение стенки в вершине сжатием искусственно созданного избытка металла в полках полуфабриката. Однако сжатие полок сопровождается образованием гофров, которые частично осаживаются плоскостями штампа и после снятия нагрузки сохраняются в виде волнистости. Установлены закономерности развития гофров при сжатии полок и в первую очередь зависимости от действия сил трения на граничных поверхностях штампа, что необходимо для выполнения требований к волнистости полок детали. Сжатие полок детали имитировалось сжатием пластины, косо расположенной в полости штампа. Показано, что число гофров увеличивается вместе с ростом напряжения сжатия. Амплитуда гофров при сжатии также увеличивается. При соприкосновении гофров и стенок штампа на деформируемую пластину действуют контактные напряжения и силы трения. Это экранирует действие силы сжатия в пластине за точкой контакта. Локализация деформаций в области перед точкой контакта способствует увеличению толщины детали уголкового формы при переформовке. Установлено, что остаточная волнистость неравномерна по пластине и связана с локализацией области деформирования и пропорциональна исходному зазору

Ключевые слова

Гофр, утонение, утолщение, переформовка, контур детали

Поступила 14.10.2022

Принята 28.10.2022

© Автор(ы), 2023

Введение. В различных отраслях промышленности, например, при производстве ракетной и авиационной техники [1–7], широко применяются детали уголкового формы, полученные гибкой. Это элементы конструкции стрингеров, шпангоутов и решетчатых рулей. Из [1, 7–9] хорошо известен эффект утонения вершины уголкового детали при гибке в инструментальном штампе, который снижает эксплуатационные характеристики изделия. В целях компенсации этого эффекта в [10, 11] предложен метод переформовки, который заключается в создании избытка длины полки и последующей ее осадки.

Применение метода переформовки сопровождается пластическим образованием гофров [12] в результате потери устойчивости полок уголкового детали, что может привести к формированию волнистости на поверхности полки (рис. 1). Моделью этого процесса может быть сжатие косо расположенной пластины между жесткими поверхностями штампа по схеме (рис. 2). Однако в отличие от фундаментальных работ, посвя-

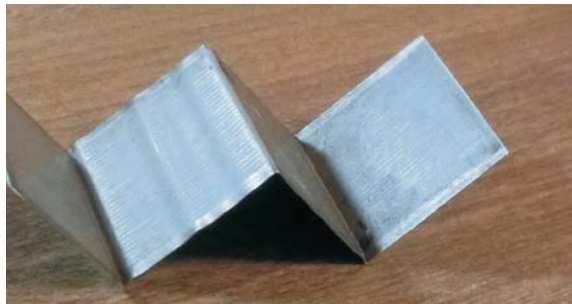


Рис. 1. Волнистость на полках W-образных деталей при переформовке заготовок в инструментальном штампе в условиях пластического деформирования

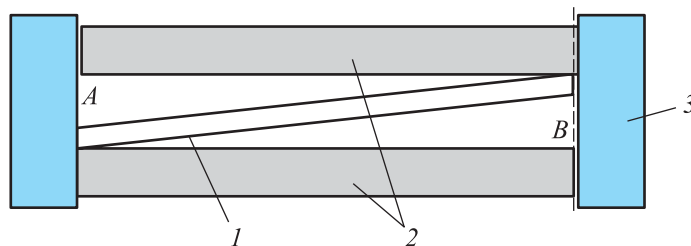


Рис. 2. Модельная схема обжатия пластины, соответствующая деформированию полки детали уголкового формы при переформовке:

1 — пластина с концами в точках A и B; 2 — плиты штампа с жесткими поверхностями;
3 — неподвижная плита; штриховой линией показана траектория точки B при смыкании плит

щенных осевому сжатию [13, 14], образование гофров в условиях проведения переформовки в штампах происходит при взаимодействии с жесткими поверхностями и влиянии сил трения. Технологический процесс помимо локального утолщения сопровождается упругим восстановлением формы (пружинением). Амплитуда волнистости не должна превышать допуск на отклонение от плоскостности или допуск на размер.

Цель настоящей работы — анализ взаимодействия косо расположенной пластины с поверхностями штампа при обжатии. Это актуально, поскольку без знания особенностей влияния граничных условий на процесс образования гофров трудно одновременно обеспечить допуск на волнистость поверхности полки и требуемый уровень локального утолщения в вершине уголковой детали.

Постановка численной задачи и результаты исследования. В качестве инструмента изучения процесса образования и развития гофров выбран численный расчет с использованием процедур конечно-элементного моделирования, которые позволяют осуществлять многие программные среды (например, Deform-3D и Marc [15]). При этом в программах учитывается влияние сил трения между вершинами гофров и жесткими стенками на процесс развития гофров.

Использованная в исследовании конечно-элементная модель имела 2000 ячеек. При проведении численных расчетов принято: длина пластины 34 мм, толщина 0,8 мм, зазор между пластиной и пресс-инструментом 4 и 0,6 мм. В качестве материала использована сталь 30ХГСА. Для описания диаграммы наряду деформированного состояния выбрана зависимость

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

где σ , ε — напряжение и деформация; σ_T — предел текучести; a , b — коэффициенты аппроксимации [16]; E — модуль упругости.

Для сокращения влияющих факторов для пластины 1 (см. рис. 2) выбраны скошенные торцы. При сжатии плит 2 штампа правый торец пластины скользит по жесткой вертикальной и неподвижной плите 3.

При проведении расчетов принимали, что взаимное относительное перемещение материалов заготовки и оснастки вызывает действие в контакте сил трения, которые пропорциональны контактным напряжениям (коэффициент трения $f = 0,15$). В рассматриваемой задаче взаимное относительное перемещение материалов происходит в точке B , а также при каса-

нии вершин гофров поверхностей плит 2. В результате анализа расчета выявлено, что между верхней горизонтальной плитой и вертикальной стенкой происходит потеря устойчивости и формирование двух полуволн, которые можно видеть на рис. 3.

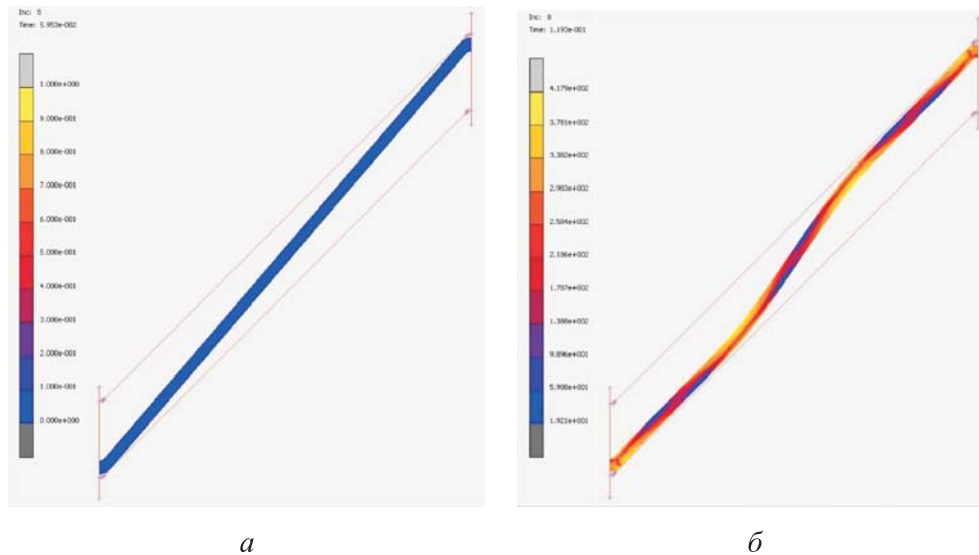


Рис. 3. Геометрия гофров и распределение интенсивности напряжений в пластине на начальной стадии косо сжатия при $\Delta_3 = 4$ мм:

a — исходная картина косо расположенной пластины в области штампа;
б — появление полуволн на контуре пластины

На исходной картине косо расположенной пластины жесткие поверхности штампа даны тонким контуром. В начальной стадии сжатия на контуре пластины появляются две полуволны. Картина распределения напряжений приблизительно одинакова в левой и правой частях пластины. Уровень напряжений соответствует области пластического деформирования материала.

При дальнейшем деформировании потерявшей устойчивость пластины у верхней подвижной плиты зарождается очередной гофр. Между верхней плитой и контуром пластины развиваются контактные напряжения, а возникающие при этом силы трения делают неидентичными картины распределения напряжений у верхнего и нижнего торцов (рис. 4). Средний уровень интенсивности напряжений на правой половине пластины составляет $\sim 280\dots 350$ МПа, а на левой половине — $180\dots 230$ МПа. Это связано с тем, что трение экранирует силы, обеспечивающие осевое сжатие пластины.

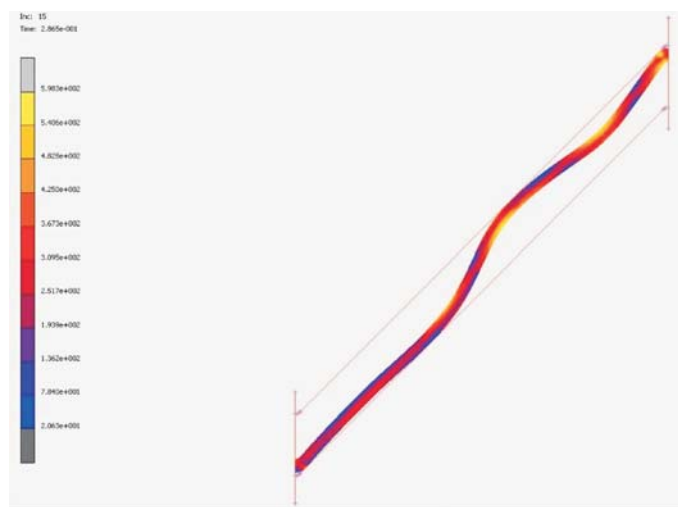


Рис. 4. Влияние сил трения между пластиной и плитой на развитие гофров и распределение интенсивности напряжений в пластине на промежуточной стадии косоуго сжатия при $\Delta_3 = 4$ мм

Последующее уменьшение зазора между плитами сопровождается увеличением числа полуволн и ростом интенсивности напряжений вплоть до 480...550 МПа на заключительной стадии (рис. 5). При управлении процессом сжатия по ширине зазора и силе обжатия за этим моментом начинается подъем верхней плиты штампа и упругое восстановление формы пластины (рис. 6).

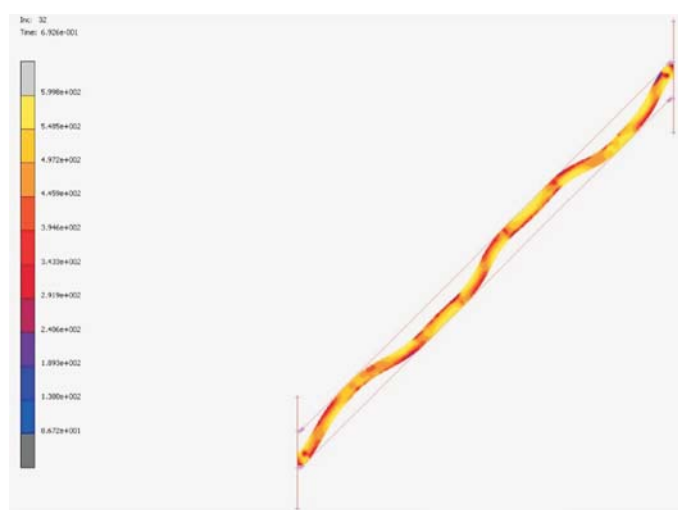


Рис. 5. Геометрия гофров и интенсивность напряжений на заключительной стадии косоуго сжатия при $\Delta_3 = 4$ мм

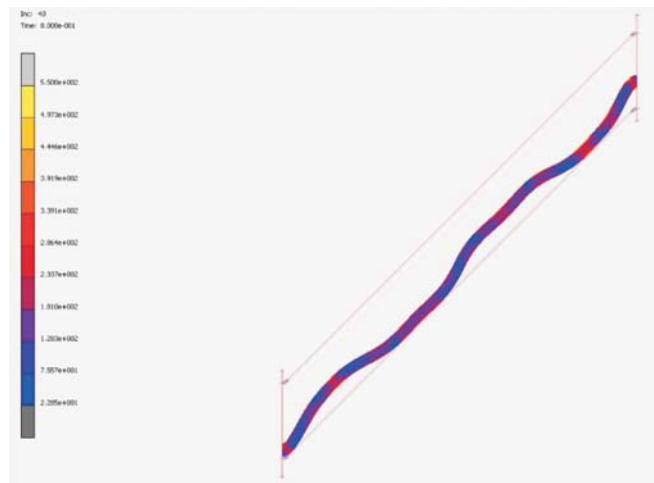


Рис. 6. Остаточные прогибы и распределение интенсивности напряжений в пластине на стадии упругого пружинения после косо́го сжатия при $\Delta_3 = 4$ мм

Отметим, что характер образования гофров на пластине при уменьшении исходного зазора до $\Delta_3 = 0,6$ мм не изменяется, только уменьшается интенсивность напряжений примерно в 1,4 раза и снижается амплитуда полуволн.

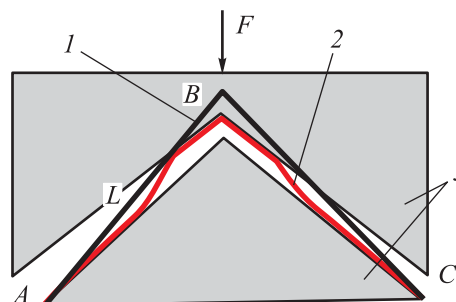
Описанный характер деформирования пластины не изменяется при переходе на сталь 12Х25Н16Г7 и использовании на плитах штампа упоров с плоскостями, перпендикулярными торцам пластины, как это описано в [12]. Анализируя упругое пружинение при снятии нагрузки выявили, что уровень остаточной волнистости определяется значением исходного зазора Δ_3 . Так, для зазора $\Delta_3 = 4$ мм среднее значение амплитуды колебания профиля пластины равно $\sim 1,28$ мм. У верхнего конца амплитуда оказывается на ~ 15 % больше среднего значения. При уменьшении исходного зазора до $\Delta_3 = 0,6$ мм уровень остаточной волнистости снижается до нуля.

В качестве основы компенсации утонения при гибке деталей уголко́вой формы (рис. 7) можно использовать взаимодействие со стенками штампа образующихся гофров, локализацию области деформирования за счет возникающих сил трения и в конечном итоге утолщения на стенке детали за счет косо́го сжатия пластины.

Для этого создается избыток металла в штампе для переформовки, который устанавливается путем проведения следующих проектных процедур:

- определение распределения толщины стенки V-образной детали после гибки [8, 9];
- расчет необходимой дополнительной длины пластины для последующего утолщения;
- установка требуемого исходного зазора между заготовкой (черная линия) и вершиной нижней плиты штампа.

Рис. 7. Схема компенсации утонения V-образной заготовки путем локализации деформаций при переформовке в штампе:
1 — исходная заготовка; 2 — контур деформирующейся заготовки; 3 — верхняя и нижняя плиты штампа; F — сила штамповки



При движении верхней плиты штампа зазор будет уменьшаться. Полки детали потеряют устойчивость и изогнутся, как это показано красной линией на рис. 7. В точках касания возникнут силы трения, действие которых будет способствовать локализации деформации в области вершины и образования утолщения. В этом и состоит физическая основа переформовки деталей V-образной и W-образной форм, предлагаемой в целях утолщения вершины.

Выводы. Характер потери устойчивости и развитие гофров в пластине, косо расположенной в штампе, слабо зависит от условий ее контакта с поверхностями штампа при сжатии. При обжатии пластины в стесненных условиях штампа на начальной стадии получения гофров образуются две полуволны.

Анализируя уровень интенсивности напряжений, выявили, что практически образование гофров происходит в области пластических деформаций.

Рост интенсивности напряжений у верхнего конца в изогнутой пластине в процессе косо го сжатия в штампе приводит к зарождению новой полуволны.

Силы трения, возникающие между вершиной гофра и верхней плитой штампа, нарушают идентичность картины деформирования пластины у верхнего и нижнего концов, что локализует область деформаций.

Исходный зазор определяет остаточную волнистость пластины после снятия нагрузки, а локализация области деформирования приводит

к сохранению разности значений остаточной волнистости на концах пластины.

С помощью предложенных проектных процедур определяют избыток металла в штампе для переформовки деталей V-образной и W-образной форм, что позволяет одновременно выполнять требования по плоскостности полок деталей и обеспечивать утолщение их вершины.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л., Машиностроение, 1979.
- [2] Ершов В.И., Чумадин А.С., ред. Листовая штамповка. М., Изд-во МАИ, 1999.
- [3] Чумадин А.С. Теория и расчеты процессов листовой штамповки. М., Экспо-сервис «ВИП», 2014.
- [4] 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>
- [5] 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>
- [6] 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. Metall.*, 2019, vol. 2019, no. 13, pp. 1460–1465. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029519130378>
- [7] Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М., Машиностроение, 1968.
- [8] Тарасов В.А., Баскаков В.Д., Бабури́н М.А. и др. Утонение стенки в вершине детали уголко́вой формы при гибке в инструментальном штампе. *Технология металлов*, 2021, № 4, с. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2021-0-4-22-27>
- [9] Боярский Д.С., Бабури́н М.А., Баскаков В.Д. и др. Методика приближенной оценки утонения детали уголко́вой формы при гибке в инструментальном штампе. *XLIV Академические чтения по космонавтике*. Т. 2. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020, с. 399–401.
- [10] Мантусов М.Н. Штамповка криволинейных бортов листовых деталей эластомером с наложением тангенциального сжатия. *КШП. ОМД*, 2021, № 4, с. 17–22.
- [11] Бабури́н М.А., Водянский М.Л., Грачев А.В. Способ изготовления профилей преимущественно W-образного сечения. Патент РФ 22673773. Заявл. 05.03.2004, опубл. 10.01.2006.
- [12] Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М., Наука, 1972.
- [13] Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов. Л., Наука, 1962.
- [14] Паршин В.С., Карамышев А.П., Некрасов И.И. и др. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D. Екатеринбург, УрФу, 2010.

[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] Боярский Д.С., Тарасов В.А., Бабурин М.А. и др. Численный анализ эволюции процесса гофрообразования при косом обжатии пластины в условиях гибки угловых деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 9 (750), с. 92–99. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2022-9-92-99>

Тарасов Владимир Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Баскаков Владимир Дмитриевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

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

Герасимов Николай Викторович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Бабурин Михаил Аронович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Карнаухов Кирилл Андреевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

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 (145), с. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-61-72>

INFLUENCE OF FRICTION AND ELASTIC SHAPE RECOVERY ON THE DEVELOPMENT OF CORRUGATIONS UNDER OBLIQUE PLATE COMPRESSION IN DIE TOOLING

V.A. Tarasov

tarasovva@bmstu.ru

V.D. Baskakov

baskakov_vd@bmstu.ru

D.S. Boyarskiy

27107357711@mail.ru

N.V. Gerasimov

gerasimovnv@bmstu.ru

M.A. Baburin

baburin_ma@bmstu.ru

K.A. Karnaukhov

karnaukhov93@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Reshaping the corner-shaped parts is an urgent technical problem making it possible to provide wall thickening at the top by compressing the artificially created excess metal in the shelves of the semi-finished product. However, shelf compression is accompanied by formation of the corrugations, which are partially deflected by the die planes and remain in the waviness form after the load is removed. Regularities in the corrugations development during the shelves' compression were established and primarily dependence on the friction forces acting on the die boundary surfaces, which is necessary to comply with the requirements to the workpiece shelves waviness. The workpiece shelves' compression was simulated by compression of a plate placed obliquely in the die cavity. It is shown that the number of corrugations increases with the compression stress growth. The corrugations amplitude also increases during compression. When corrugations and die walls are in contiguity, contact stresses and friction forces act on the deformable plate. This shields the compression force action in the plate behind the contact point. Localization of deformations in the area in front of the contact point contributes to an increase in the thickness of the angle-shaped workpiece during reshaping. It was established that the residual waviness was non-uniform over the plate, and was associated with the deformation area localization, and was proportional to the initial gap

Keywords

Corrugation, thinning, thickening, reshaping, workpiece contour

Received 14.10.2022

Accepted 28.10.2022

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] Romanovskiy V.P. Spravochnik po kholodnoy shtampovke [Handbook on cold forging]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979.
- [2] Ershov V.I., Chumadin A.S., eds. Listovaya shtampovka [Sheet stamping]. Moscow, MAI Publ., 1999.
- [3] Chumadin A.S. Teoriya i raschety protsessov listovoy shtampovki [Theory and calculations of sheet forging]. Moscow, Eksposervis "VIP" Publ., 2014.
- [4] 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>
- [5] 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>
- [6] 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. Metall.*, 2019, vol. 2019, no. 13, pp. 1460–1465. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029519130378>
- [7] Popov E.A. Osnovy teorii listovoy shtampovki [Fundamentals of sheet metal forming theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968.
- [8] Tarasov V.A., Baskakov V.D., Baburin M.A., et al. Thinning of wall in vertex of angled part during bending in tool die. *Tekhnologiya metallov*, 2021, no. 4, pp. 22–27 (in Russ.).
- [9] Boyarskiy D.S., Baburin M.A., Baskakov V.D., et al. [Method of approximate estimation of corner shape part thickening at bending in tool stamp.]. *XLIV Akademicheskie chteniya po kosmonavtike. T. 2* [XLIV Academic Readings on Cosmonautics. Vol. 2]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020, pp. 399–401 (in Russ.).
- [10] Mantusov M.N. Stamping of curved flanges of sheet parts with elastomer with the imposition of tangential compression. *KShP. OMD*. [Forging and Stamping Production. Processing of Materials by Pressure], 2021, no. 4, pp. 17–22 (in Russ.).
- [11] 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 RU 22673773. Appl. 05.03.2004, publ. 10.01.2006 (in Russ.).
- [12] Feodosyev V.I. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1972.
- [13] Rabotnov Yu.N. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. Leningrad, Nauka Publ., 1962.
- [14] Parshin V.S., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., et al. Prakticheskoe rukovodstvo k programmnomu kompleksu DEFORM-3D [Practical guide for DEFORM-3D software complex]. Ekaterinburg, UrFu Publ., 2010.
- [15] Tarasov V.A., Baskakov V.D., Baburin M.A., et al. Approximation of deformation diagrams of steels by their mechanical characteristics. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2020, no. 8, pp. 59–63 (in Russ.).

[16] 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 (750), pp. 92–99 (in Russ.).

DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2022-9-92-99>

Tarasov V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Technology of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Baskakov V.D. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Technology of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Boyarskiy D.S. — Post-Graduate Student, Department of Technology of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Gerasimov N.V. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Baburin M.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Technology of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Karnaikhov K.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Technology of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

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. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2023, no. 2 (145), pp. 61–72 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-61-72>