

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №6 (156). С.13-20.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №6 (156). P. 13-20.

Научная статья
УДК 621.7.011
doi: 10.30987/2223-4608-2024-13-20

Научноёмкие технологии обработки давлением в машиностроении, авиации и транспорте

Виктор Алексеевич Демин, д.т.н.
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия
va_demin@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Представлены результаты исследований изменения толщины заготовки в результате выполнения технологических операций листовой штамповки, таких как: гибка труб, обжим, обтяжка, вытяжка, вытяжка с утонением. Необходимость таких работ связана с тем, что сегодня повышаются требования к прочности деталей, получаемых листовой штамповкой. Большое внимание уделено гибке труб, т. к. при изгибе меняется не только форма сечения трубной заготовки, но происходит уменьшение толщины в растянутом слое и увеличение толщины в сжатом. Предложены способы уменьшения разнотолщинности трубы. Приведены результаты исследований изменения толщины заготовки при вытяжке. Показано, что увеличение радиуса пуансона, может уменьшить разнотолщинность на 10 %. В большинстве исследований посвященных листовой штамповке не учитывается разнотолщинность исходной заготовки, проката, а толщина исходной заготовки при заказе металла нормальной точности может изменяться на 20 %. Выполнено моделирование толстолистовой вытяжки в программе AutoForm с целью определения возможности программы в прогнозировании изменения формы детали и толщины из-за действия изгибающих моментов. Показано, что AutoForm достаточно хорошо моделирует форму детали после штамповки. По утонению AutoForm и эксперимент показали близкие результаты по толщине и участки с минимальной толщиной. Для выбранных параметров штамповки минимальная толщина наблюдается в месте перехода цилиндрической поверхности в радиус пуансона и в месте перехода радиуса пуансона в доннышко. Так как большинство металлов, подвергаемых листовой штамповке, обладают свойствами анизотропии, экспериментально и теоретически доказано, что толщина может существенно меняться по периметру. Было доказано, что разнотолщинность по периметру детали может быть более 35 %.

Ключевые слова: листовая штамповка, изменение толщины, гибка трубы, вытяжка

Для цитирования: Демин В.А. Научноёмкие технологии обработки давлением в машиностроении, авиации и транспорте // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 13–20 doi: 10.30987/2223-4608-2024-13-20

Pressing Hi-Techs in mechanical engineering, aviation and transport

Viktor A. Demin, D. Eng.
Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russia
va_demin@bk.ru

Abstract. Results of workpiece thickness variations due to sheet metal stamping job, that is: tube bending, pressing, stretching, drawing-out, ironing are presented in the paper. The necessity in such work is fuelled by the contemporary increasing requirements for parts strength resulted from sheet metal stamping. Much attention is paid to tube bending, for it is bending that changes not only form of the section of the tube billet, but also leads to a thickness loss in a tensile layer together with an increase in thickness of a compression zone. The methods of reducing tube thickness variation are proposed. Results of changes in workpiece thickness under drawing-out are given. It is shown that increasing the punch radius can reduce the thickness variation by 10 %. In most studies on sheet stamping, the thickness of the primary blank and rolled iron is not taken into account, while the primary part thickness can vary by 20 % when ordering metal of single precision. A thick-sheeted drawing-out in the AutoForm program is simulated in order to determine the possibility of the program in predicting changes in the shape of the sheet and thickness due to the action of bending. It is shown that AutoForm models the shape of the part well enough after stamping. According to the specification, AutoForm and the experiment showed similar results in thickness and also revealed areas with minimal thickness. For the selected stamping parameters, the minimum thickness is observed at the point of transition of the cylindrical surface to the punch radius and at the point of transition of the punch radius to the bottom plate. Since most metals subjected to sheet stamping have anisotropy properties, it has been shown by experiments and has its theoretical proof that thickness can vary significantly along the perimeter. It has been proven that the thickness variation along the perimeter of the part may exceed 35 %.

Keywords: sheet stamping, thickness variation, tube bending, drawing-out

For citation: Demin V.A. Pressing Hi-Techs in mechanical engineering, aviation and transport / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 6 (156). P. 13–20. doi: 10.30987/2223-4608-2024-13-20

В настоящее время в машиностроении, авиации и транспорте широко применяются детали, получаемые из листового материала листовой штамповкой, к которым, последнее время, предъявляются повышенные требования по надежности заготовок. Надежность или прочность заготовки зависит, в основном, от толщины и прочности материала, которая, как правило, характеризуется временным сопротивлением σ_B .

В дальнейшем, для наглядности, будем рассматривать сталь 08, как наиболее часто применяемую в листовой штамповке.

В справочниках временное сопротивление задается в очень широких пределах. Например в справочнике [1] величина $\sigma_B = 280 \dots 400 \text{ Н/мм}^2$, а в справочнике [2]

$\sigma_B > 300 \text{ Н/мм}^2$. Измерения показывают, что в одной партии металла σ_B может изменяться в пределах 70 Н/мм^2 , по европейским требованиям эта величина не превышает 50 Н/мм^2 .

В тоже время по ГОСТ 16523-97 «Прокат тонколистовой из углеродистой стали качественной и обыкновенного качества общего назначения. Технические условия» колебания σ_B зависят от группы прочности, табл. 1.

В соответствии с ГОСТ 9045-93 «Прокат тонколистовой холоднокатаный из низкоуглеродистой качественной стали для холодной штамповки» для стали 08 в зависимости от группы штампуемости имеет следующие значения σ_B , представленные в табл. 2. Из нее видно, что σ_B может изменяться на 56 %.

1. Изменение временного сопротивления по ГОСТ 16523-97

1. Break point stress changing as per GOST standard 16523-97

Группа точности	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ²
K260B	260...380
K270B	270...410
OK300B	300...480
K310B	310...440
K330B	330...460
K350B	350...500

2. Изменение временного сопротивления по ГОСТ 9045-93

2. Change in time resistance as per GOST standard 9045-93

Способность к вытяжке	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ²
ОСВ	250...350
СВ	250...380
ВГ	250...390

Так как прочность материал задается конструктором, а для штамповки прочностные характеристики необходимы только для определения силы штамповки и соответственно для выбора кузнечно-штамповочного оборудования большинство работ посвящено изменению толщины в процессе штамповки. В этом плане характерна работа [3], в которой выполнено моделирование в программе QFORM горячей листовой штамповки детали получаемой вытяжкой. В результате расчета технологического процесса

удалось уменьшить разнотолщинность получаемой детали.

В действующем производстве к расчетной толщине добавляют 15 % металла, для компенсации утонения. Снижение увеличения толщины позволило снизить себестоимость продукции, за счет уменьшения нормы расхода металла и одновременно увеличить стоимость изделия, т. к. детали с меньшей разнотолщинностью стоят дороже.

В работе [4] авторами рассмотрен вопрос изменения толщины стенки трубы при гибке по копиру. В результате аналитического решения с использованием вариационных методов механики твердого деформированного тела, получены аналитические зависимости разнотолщинности от отношения R_0/d , где R_0 – радиус оси изгибаемой трубной заготовки; d – диаметр трубы. Однако отношение R_0/d задается конструктором, и технолог не в состоянии его поменять. Поэтому полученное решение актуально для прогнозирования возможной разнотолщинности и появляется возможность заранее увеличить толщину трубной заготовки для обеспечения заданной минимальной толщины трубы.

Статья [5] посвящена формообразованию крутоизогнутых отводов из трубной заготовки. По существующей технологии разница по толщине между зоной сжатия и зоной растяжения превышает 30 %. Авторы предлагают проводить дополнительную операцию калибровки и провели математическое моделирование последовательного деформирования трубной заготовки в ANSYS/LS-DYNA. Это позволило получить разнотолщинность менее 24 %.

Интересно представление результатов расчета. Вместо расчета при номинальных значениях технологических и конструктивных параметров, было построено уравнение регрессии и построены графики изменения толщины по сечению с учетом колебания технологических

и конструктивных параметров. Один из таких графиков представлен на рис. 1.

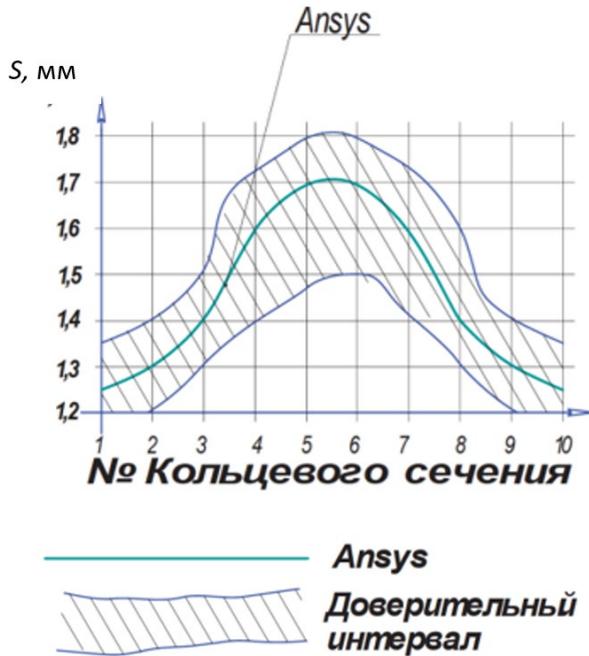


Рис. 1. Изменение толщины по кольцевому сечению
Fig. 1. Thickness variations along the annular section

В литературе имеются работы по совмещению различных операций листовой штамповки для получения изделий с минимальной разнотолщиной. Так в работе [6] предлагается за счет последовательного выполнения операций вытяжки, вытяжки с утонением и обжима, получать деталь с практически одинаковой толщиной. Суть метода заключается в том, что на участке, где будет проходить обжим, вытяжкой с утонением в конической матрице формируется участок с переменной толщиной (рис. 2). После обжима толщина на этом участке увеличивается, и разнотолщинность не превышает 2,2 %.

В работе [7] рассмотрен процесс совмещения операций вытяжки, обжима, раздачи. Особое внимание уделено влиянию трения. Показано, что с увеличением коэффициента трения в диапазоне от 0,15 до 0,36 может происходить увеличение разнотолщинности от 16 до 29 %. Также исследовано увеличение толщины

исходной заготовки в зависимости от коэффициента раздачи.

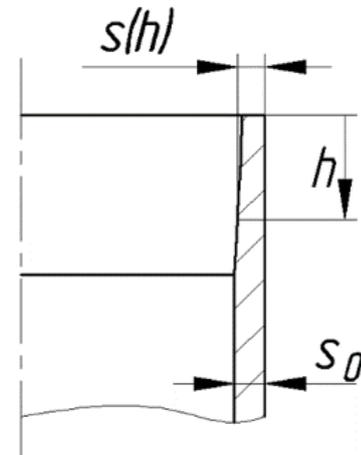


Рис. 2. Осесимметричная деталь после вытяжки с утонением
Fig. 2. Axisymmetric part after ironing

Интересный подход к исследованию поперечной разнотолщинности заготовки предложен в работе [8]. Разнотолщинность выражена в эквивалентной квадратичной форме, соответствующей гауссовым параметрам поверхности. Предложен критерий минимального изменения толщины в процессе обтяжки оболочки двойной кривизны.

В результате получены условия, при которых можно получить направленное изменение толщины заготовки, что особенно актуально в авиастроении.

На сегодняшний день достаточно много работ посвящено изменению толщины при вытяжке осесимметричных деталей. Так в работе [9] анализируется изменение толщины стенок цилиндрических стаканов при вытяжке без прижима. Анализ процесса вытяжки проведен с предположением, что образующая стенки стаканчика изгибается и сверткой получает готовое изделие.

Рассмотрены два случая: пуансон имеет плоское основание; штамповка пуансоном по форме близким к сфере. Расчетная схема показана на рис. 3.

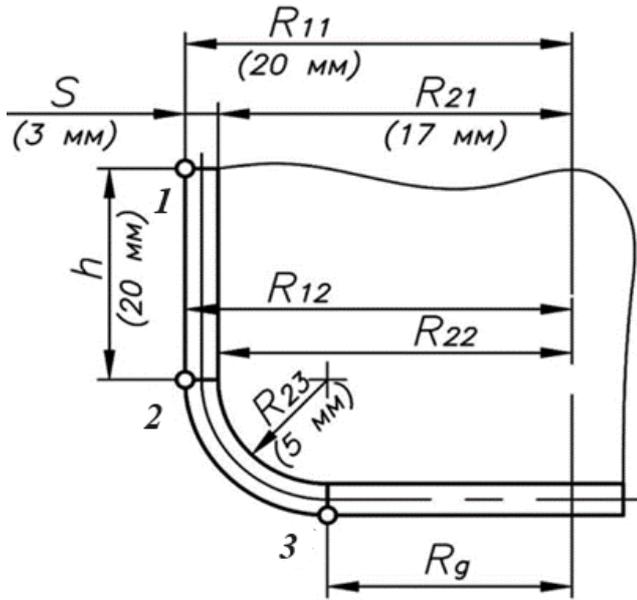


Рис. 3. Сечение осесимметричной цилиндрической детали

Fig. 3. Section of an axisymmetric cylindrical part

По первой схеме минимальная толщина находится в точке 2 и материал под пуансоном практически не деформируется. По второй схеме увеличивается очаг пластической деформации, минимальная толщина детали смещается к точке 3. Показано, что разнотолщинность в этом случае уменьшается на 10 %.

Штамповка полусферы из тонкостенной листовой заготовки рассмотрена в работе [10]. Для решения поставленной задачи использовалась мембранная теория жесткопластических оболочек при условии пластичности Мизеса. Учитывалось изменение толщины и упрочнение металла. Интегрирование уравнений равновесия выполнялось с использованием формул Рунге-Кутты второго порядка. Расчетная схема показана на рис. 4.

В результате автором на основе разработанной математической модели процесса удалось получить изменение толщины металла вдоль образующей с максимальной разнотолщинностью в 12 %.

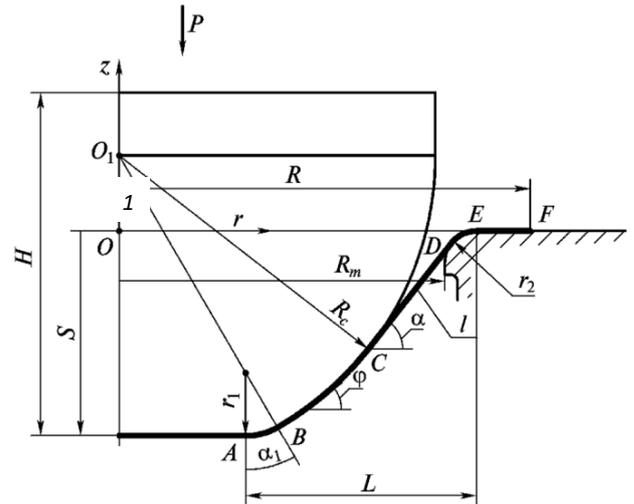


Рис. 4. Расчетная схема глубокой вытяжки сферической детали

Fig. 4. Calculation scheme of deep drawing of a spherical part

На окончательную толщину изготовленной детали существенное влияние оказывает исходная разнотолщинность заготовки.

В соответствии с ГОСТ 19904-79 «Прокат листовой холоднокатаный» предельные отклонения по толщине при ширине проката до 100 мм включительно для толщины проката от 0,9 до 1,2 мм не должны превышать:

- высокая точность $\pm 0,05$;
- повышенная точность $\pm 0,08$;
- нормальная точность $\pm 0,10$.

Таким образом, толщина исходной заготовки при получении металла нормальной точности может изменяться на 20 %.

В процессе штамповки листовой материал может значительно изменять свою толщину. Поэтому на деталях, получаемых из листовых заготовок, не рекомендуется указывать толщину металла, она указывается в угловом штампе в виде: Лист $\frac{II-1,0 \times 1000 \times 2000 \text{ ГОСТ } 19904-74}{I-m-08B-08Ю \text{ ГОСТ } 9045-80}$, где указано, что заказывается лист из стали 08Ю, толщиной 1,0 мм, шириной 1000 мм, длиной 2000 мм, повышенной точности, особо высокой отделки поверхности, матовая поверхность, особо сложная вытяжка.

Для анализа прочности колпачка воспользуемся рис. 1. В точке 1 толщина

увеличивается, и может достигать $S = 1,2S_0$, где S_0 – начальная толщина заготовки. В точке 2 толщина уменьшается и может достигнуть величины $S = 0,8S_0$.

Таким образом, конструктор рассчитывает, что данная деталь может выдержать силу P , а за счет уменьшения толщины и σ_b предельная нагрузка может быть уменьшена на 30 %.

Кроме этого, происходит увеличение веса изделия. На одном из авиационных заводов производят штамповку корпуса, по конструкторским расчетам требуется металл толщиной 2 мм, реально штампуют из листа толщиной 3 мм, для того чтобы обеспечить заданную толщину в опасном сечении. Такое существенное утонение вызвано, скорей всего, действием моментов. Поэтому было проведено исследование точности моделирования влияния моментов на форму детали и изменение толщины. Моделирование провели в программе AutoForm.

Заготовка и инструмент имели следующие размеры: толщина $S = 1,8$ мм; диаметр заготовки $D_z = 67,8$ мм; диаметр пуансона $d_{п} = 38$ мм; диаметр матрицы $D_m = 44$ мм; радиус скругления на пуансоне и матрицы $R_m = 2,5$ мм; шаг измерения утонения – 2 мм.

Форма отштампованного перехода близка к расчетной, что видно из рис. 5.

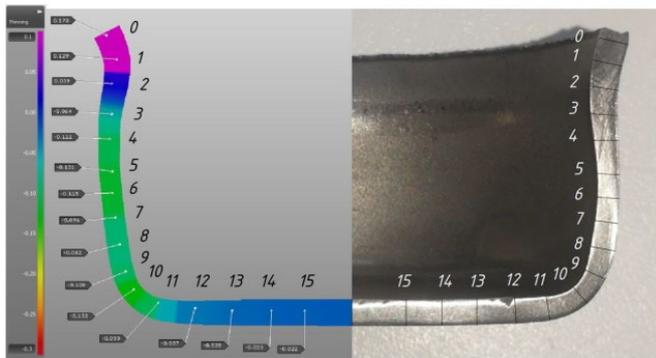


Рис. 5. Сравнение формы расчетной и экспериментальной детали

Fig. 5. Comparison of the shape of the calculated and experimental part

Распределение толщины металла, полученное экспериментально и в эксперименте показано на рис. 6. Максимальное утонение наблюдается в месте перехода цилиндрической поверхности в радиус пуансона и в месте перехода радиуса пуансона в доннышко. Таким образом, максимумы утонения наблюдаются в месте действия изгибающих моментов.

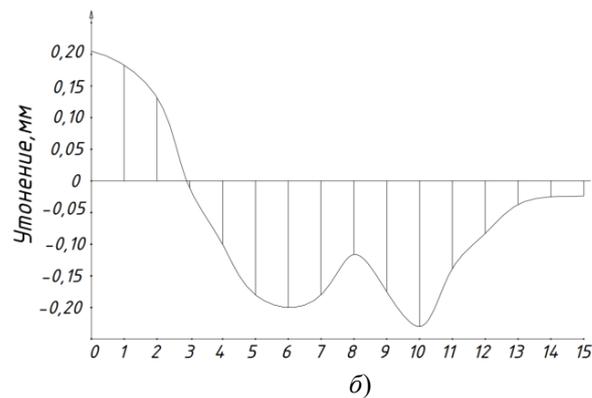
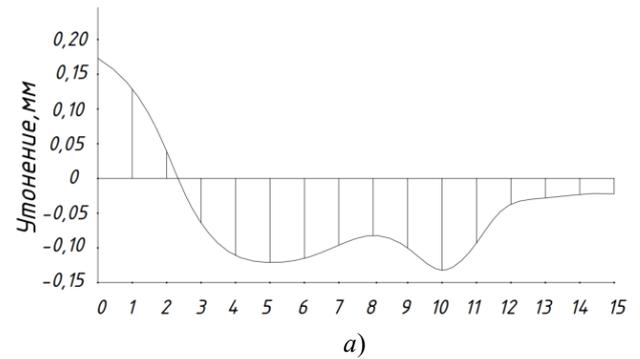


Рис. 6. Изменение толщины металла по образующей: а – AutoForm; б – эксперимент

Fig. 6. Thickness variations in the metal along generatrix: а – AutoForm; б – experiment

При проектировании процессов вытяжки цилиндрических деталей необходимо учитывать изменение толщины по периметру заготовки. На рис. 7 показано характерное сечение, в котором появляется максимальная разнотолщинность. Теоретически и экспериментально получено, что максимальная разнотолщинность может быть более 35 %.

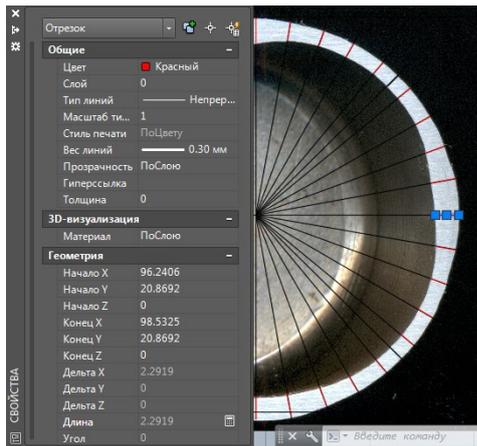


Рис. 7. Изменение толщины заготовки по периметру детали

Fig. 7. Changing the thickness of the workpiece around the perimeter of the part

Заключение

1. На разнотолщинность деталей, получаемых листовой штамповкой, существенное влияние может оказывать допуск на толщину листового проката.

2. Перспективным направлением в листовой штамповке может быть снижение разнотолщинности, в отдельных случаях, это приводит к уменьшению себестоимости и увеличению стоимости штампуемых деталей.

3. Необходимо учитывать изменение толщины по периметру детали, которая может превышать 35 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. Т. 1. М.: Машиностроение, 1979. 728 с.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
3. Демин В.А. Интенсификация горячей листовой штамповки днищ // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 9–14. 10.30987/2223-4608-2023-9-14
4. Вдовин С.И., Лунин К.С., Мальцев Д.Н. Утонение стенки трубы при гибке по копиру // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 3 (299). С. 57–60.

5. Попов И.П., Маслов В.Д., Попов А.Д., Николенко К.А. Направленное изменение толщины заготовки при формообразовании крутоизогнутых отводов. В сборнике: МЕТАЛЛОФИЗИКА, МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ, НАНОСТРУКТУР И ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ. МЕТАЛЛДЕФОРМ - 2009. Труды 3-й МНТК. В 2 т. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва. 2009. С. 221–226.

6. Кайбаров А.П., Евсюков С.А. Исследование процесса обжима трубной заготовки с получением постоянной толщины стенки // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. Т. 19. № 8. С. 362–364.

7. Евсюков С.А., Сулейман А.А. Исследование совмещенной операции вытяжки с обжимом и раздачей // Наука и образование: Научное изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 11. С. 17–24. DOI: 10.7463/1113.0636247

8. Михеев В.А. Направление изменения толщины заготовки при формообразовании обтяжкой оболочкообразующих оболочек двойной кривизны // В сб. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» / Труды МНТК. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва. 2003. С. 158–164.

9. Кохан Л.С., Шульгин А.В., Крутина Е.В., Морозов Ю.А. Изменение толщины стенок цилиндрических листовых изделий при вытяжке без прижима // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 5. С. 9–13.

10. Непершин Р.И., Прусаков М.А. Моделирование глубокой вытяжки тонкостенной полусферы // Вестник МГТУ Станкин. 2016. № 1 (36). С. 14–20.

REFERENCES

1. Anuriev V.I. Handbook of mechanical engineering designer: In 3 volumes. T. 1. M.: Mashinostroenie, 1979. 728 p.
2. Romanovsky V.P. Handbook of Cold Forming. L.: Mechanical Engineering, 1979. 520 p.
3. Demin V.A. Intensification of high temperature bottom plates forming / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 12 (150). P.9–14. 10.30987/2223-4608-2023-9-14

4. S.I. Vdovin, K.S. Lunin, D.N. Maltsev Tube Wall Tapering When Bending With Copying Template № 3 (299) 2013. P. 57–60.

5. Popov I.P., Maslov V.D., Popov A.D., Nikolenko K.A. Directional change in the thickness of the workpiece during the formation of steeply curved bends. V sbornike: METALLOPHYSICS, MECHANICS OF MATERIALS, NANOSTRUCTURES AND DEFORMATION PROCESSES. METALDEFORM 2009. Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference. In 2 volumes. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev, Volga branch of the A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences. 2009. P. 221–226

6. Kaybarov A.P., Surkov S.A. Study of billet Reduction to Obtain Wall Thickness. Science intensive technologies in mechanical engineering. 2021. T. 19 № 8. P. 362–364.

7. Evsyukov S.A., Solaiman A.A. Study of extracting combined with swaging and distribution Science and

Education Science and Education of the Bauman MSTU # 11, November 2013 DOI: 10.7463/1113.0636247

8. Mikheev V.A. Directed change in the thickness of the workpiece when shape forming double curvature dump shells with covering In the collection: Problems and prospects for engine building development. Proceedings of the international scientific and technical conference. Ser. «Bulletin of the Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev» Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev. 2003. pp. 158–164.

9. Kohun L.S., Shul'gin A.V., Krutina E.V., Morozov Yu.A. Hange of Thickness of Walls of Cylindrical Glasses at an Extract Without Clip Structural mechanics of engineering structures and structures, 2014, No. 5. P. 9–13 p.

10. Nepershin R.I., Prusakov M.A. Modeling of thin walled half sphere deep drawing. Vestnik MGTU «Stankin» 2016. № 1 (36). P. 14–20.

Статья поступила в редакцию 17.04.2024; одобрена после рецензирования 22.04.2024; принята к публикации 26.04.2024.

The article was submitted 17.04.2024; approved after reviewing 22.04.2024; assepted for publication 26.04.2024.

