

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №12 (150). С.9-14.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №12 (150). P.9-14.

Научная статья
УДК 621.7.011
doi: 10.30987/2223-4608-2023-9-14

Интенсификация горячей листовой штамповки днищ

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

Аннотация. Рассмотрены вопросы производства горячей листовой штамповкой эллиптических отбортованных стальных днищ, применяемых для сосудов и аппаратов с внутренним диаметром от 300 до 1800 мм из углеродистых, легированных и двух-слойных сталей. Приведены данные, что до настоящего времени авторы исследуют процесс штамповки без изменения температурных полей в заготовке. Приведены примеры работ, которые позволяют уменьшить разнотолщинность в днище от нормативных 15 % относительных деформаций по толщине до 12 %. Показано, что использование переменного температурного поля позволит увеличить коэффициент вытяжки в несколько раз и получить сосуды из двух корпусных деталей. Отмечено, что в технической литературе не рассмотрен вопрос влияния изменения кривой упрочнения при нагреве на устойчивость горячей листовой штамповки. Изучена возможность применения программы QForm для анализа напряженно-деформированного состояния при горячей листовой штамповке. Проведено моделирование нагрева заготовки в газовой печи. В результате расчета получили поле температур и искажение формы заготовки. Сравнение с экспериментом выявило хорошую сходимость результатов по температурам и качественное совпадение искажения формы заготовки. Моделирование в QForm распределения относительных деформаций по толщине по образующей днища, также показало хорошую сходимость с экспериментальной штамповкой. Отмечено, что QForm хорошо моделирует расположения мест максимальных относительных деформаций, что совпадает с результатами экспериментальной штамповки и теоретическими решениями для вытяжки деталей с сферическим дном. По результатам работы даны рекомендации по получению днищ по первой группе точности, когда максимальные относительные деформации по толщине не должны превышать 4,0 %.

Ключевые слова: заготовка, горячая листовая штамповка, днища

Для цитирования: 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

Intensification of high-temperature bottom plates forming

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

Abstract. The issues of high-temperature forming for the production of elliptical steel beaded bottoms, used in vessels and apparatuses with an internal diameter from 300 to 1800 mm, made of carbon, alloy and ply steels, are viewed. There is information that the authors have been studying this forming process of a workblank with no temperature pattern change. There is also data on

examples of tests that allow reducing the thickness difference in the bottom plate from the standard 15 % of relative deformations to 12%. It is shown that the use of a variable temperature pattern will make it possible to increase the extraction coefficient by several times and obtain vessels consisting of two body parts. It is noted that the issue of the influence of changes in the hardening curve when heated on the stability of hot-temperature forming has not been viewed in technical publications yet. The possibility of using the QForm program for the analysis of the stress-strain state for high-temperature forming has been studied. The simulation of the heating of the billet in a gas furnace is carried out. As a result of the calculation, a temperature pattern and a distortion of the shape of the workblank were obtained. Comparison with the experiment revealed good convergence of the results in terms of temperatures and qualitative coincidence of the workblank shape. It is noted that QForm simulates the locations of the places of maximum relative deformations quite well, that is coincident with the results of experimental die forming and theoretical solutions for draw-forming of parts with a spherical bottom. Based on the results of the work, recommendations are given for obtaining bottom plates according to the first class of accuracy, when the maximum relative deformations in thickness should not exceed 4,0 %.

Keywords: workblank, high-temperature forming, bottom plates

For citation: Demin V.A. Intensification of high-temperature bottom plates forming / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 12 (150). P. 9–14. doi: 10.30987/2223-4608-2023-9-14

В химическом машиностроении предъявляются повышенные требования к надежности используемых деталей и узлов, что связано, в первую очередь, с хранением и использованием высокотоксичных веществ. Требования к деталям, естественно, переносятся на заготовки, получаемые обработкой металла давлением.

Днища изготавливают по техническому регламенту ТР 84.402-34-2015, который распространяется на днища эллиптические отбортованные стальные по ГОСТ 6533 с толщиной стенки от 4,0 до 32 мм для сосудов и аппаратов с внутренним диаметром от 300 до 1800 мм из углеродистых, легированных и двух-слойных сталей. В условиях серийного производства эллиптические днища изготавливаются, как правило, горячей листовой штамповкой на гидравлических прессах. В силу особенностей этого вида обработки давлением, днище получается с переменной толщиной стенки, а т. к. расчет на прочность ведётся по минимальной толщине изделия, то толщину заготовки увеличивают, как правило, на 15 %, где 15 % – относительная деформация по толщине. Это, естественно, приводит к существенному перерасходу металла и увеличению веса изделия.

В то же время сосуды, работающие под давлением, разделяются на группы с первой по пятую, где первая группа – это сосуды, работающие под большим давлением и соответственно эллиптическое днище должно иметь отклонения размеров по сечению толщины согласно ГОСТ 6533-78 до 4,0 %.

Исследованию горячей листовой штамповки днищ посвящено относительно небольшое количество работ. В первоначальных работах [1], в основном приводились результаты

практической штамповки днищ и определение максимальной силы штамповки.

С появлением пакетов прикладных программ для расчета процессов горячей штамповки проведены исследования [2] изменения температурных полей в процессе переноса листовой заготовки от печи до прессы, а также в работах [3, 4] проведен анализ напряженно-деформированного состояния при горячей листовой штамповке днищ.

В работе [5] была поставлена задача, исследовать горячую толстолистовую штамповку материала, имеющего очень небольшой температурный интервал штамповки, всего 50 °С. Поэтому на первом этапе расчета проанализирован нагрев заготовки в печи. Рассчитано время нагрева, при котором температура равномерно распределяется по толщине. Затем рассмотрели изменение температуры при переносе заготовки от печи до прессы и изменение температуры при штамповке.

В работе [6] проведено исследование методов нагрева заготовок для горячей листовой штамповки, а в работе [7] проведена оценка предельной степени вытяжки листовых изделий со сферическим дном в условиях горячей деформации.

Относительно недавно в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина был выполнен цикл работ [8 – 11] по горячей листовой штамповке днищ. Авторы поставили перед собой цель снизить металлоемкость эллиптических горячештампованных днищ за счет уменьшения технологического напуска. Достаточно подробно рассмотрены причины, по которым при штамповке происходит утонение исходной

заготовки и даны пути уменьшения относительных деформаций по толщине. Получено типовое распределение деформаций по образующей, представленное на рис. 1 (значения изменения толщины указаны в относительных деформациях по толщине).

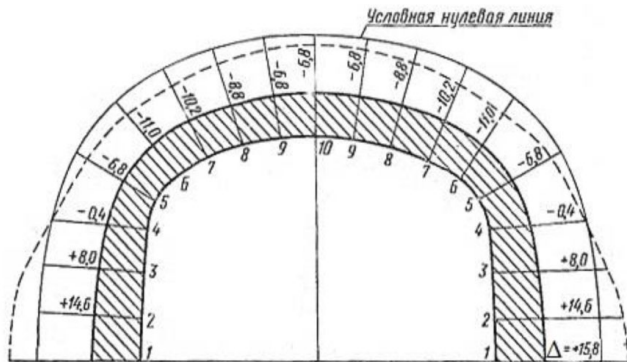


Рис. 1. Характерное относительное изменение толщины стенки днищ при горячей штамповке

Fig. 1. Characteristic relative change in the wall thickness of the bottom plate during high-temperature forming

Как видно на рис. 1 максимальное утонение происходит в вершине эллипса и зоне действия изгибающих моментов. Как и положено при вытяжке, во фланце происходит увеличение толщины заготовки под действие тангенциальных сжимающих напряжений.

Поэтому нам необходимо в эллиптической части днища или уменьшить растягивающие напряжения или увеличить в этом месте напряжение текучести σ_s .

В результате моделирования в DEFORM-3D типового технологического процесса получено, что для аустенитных сталей технологическую прибавку для компенсации утонения стенки при штамповке допускается снизить с 15 % до 7,0 %, для днищ из углеродистых и низколегированных сталей – до 10 %. В тоже время не ясно, учитывалось в работе изменение начальной толщины заготовки. Например, для листа из стали 10, толщиной 10 мм допускается уменьшение толщины на 0,8 мм (8,0 %).

Таким образом, проблема существующей технологии состоит в том, что нельзя добиться постоянного соответствия требованиям по ГОСТ 6533-78 первой группы, чтобы относительное уменьшение толщины было меньше 4,0 %.

Рассмотрим интенсификацию процесса штамповки днищ за счет нагрева фланца заготовки.

В случае, если учитываем влияния на процесс вытяжки только формоизменения, получаем предельный коэффициент вытяжки $K = 2,7$, где $K = R/r$; R – радиус заготовки; r – радиус детали.

Предположим, что мы нагрели фланец заготовки по экспоненте и уменьшили предел текучести σ_{s0} в 2,0 раза, тогда:

$$\sigma_{pmax} = \frac{1}{2} \sigma_{s0} \ln \frac{R}{r},$$

где σ_{pmax} – максимальное напряжение в опасном сечении; σ_{s0} – значение предела текучести при комнатной температуре.

Элементарные расчеты показывают, что

$$\sigma_{pmax} = \sigma_{s0};$$

$$2 = \ln \frac{R}{r};$$

$$\frac{R}{r} = K = e^2 = 7,4.$$

Если уменьшим σ_{s0} в 4,0 раза, тогда получим:

$$\sigma_{pmax} = \frac{1}{4} \sigma_{s0} \ln \frac{R}{r}; 4 = \ln \frac{R}{r}; \frac{R}{r} = K = e^4 = 54.$$

Таким образом, теоретически, появляется возможность увеличить коэффициент вытяжки в 20 раз. На практике, конечно, такие величины K недостижимы, однако мы можем получить изделия с очень высокими бортами или, при меньших значениях K , существенно уменьшить растягивающие напряжения в эллиптической части днища.

Однако при нагревании заготовки должна возникнуть проблема, связанная с тем, что при повышении температуры кривая упрочнения начинает приближаться к идеально пластической. Например, кривая упрочнения для стали 10, построенная для температур 800 °С, 900 °С, 1000 °С и 1100 °С показана на рис. 2. Как известно, очень пластичные материалы, как свинец, пищевой алюминий и другие материалы, не имеющие упрочнения, не поддаются листовой штамповке из-за потери устойчивости при деформировании.

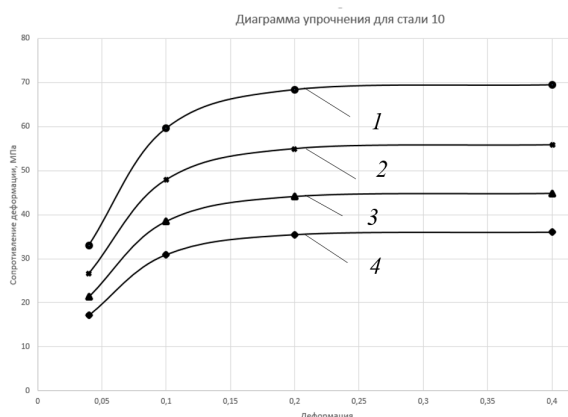


Рис. 2. Кривая упрочнения для Стали 10:
1 – 800 °C; 2 – 900 °C; 3 – 1000 °C; 4 – 1100 °C

Fig. 2. Hardening curve for Steel 10:
1 – 800 °C; 2 – 900 °C; 3 – 1000 °C; 4 – 1100 °C

Для уточнения параметров горячей листовой штамповки днищ было проведено исследование изготовления эллиптического днища на одном из заводов Московской области. Изменения толщины в процессе вытяжки изучали при помощи моделирования в программном обеспечении QForm.

Для определенности была взята деталь, представленная на рис. 3.

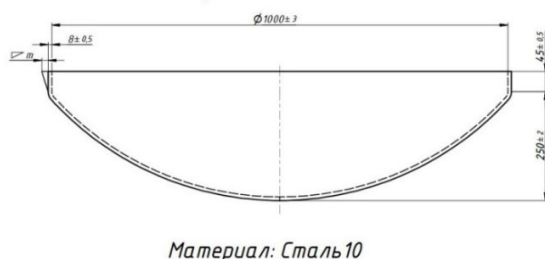


Рис. 3. Эскиз готовой детали после механической обработки

Fig. 3. Sketch of the finished part after machining

Данная деталь используется в добывающей промышленности (как часть сосуда), так же в химической промышленности (сосуды высокого давления).

Расчет заготовки показал, что диаметр заготовки должен быть $D = 1270$ мм. При этом коэффициент вытяжки всего 1,27.

Исходные данные для расчета:

- вид печи: камерная нагревательная печь;
- нагреваемый металл: Сталь 10;
- конечная температура поверхности металла, 1100 °C;
- топливо: природный газ.

Анализ распределения деформаций, показывает, что наиболее опасные зоны с точки зрения разрушения располагаются на борту днища, в местах гофр, которые при прохождении через зазор между пуансоном и матрицей расправились. В зоне перехода от эллиптической к цилиндрической части днища по всему объему преобладают растягивающие напряжения. Так как мы нагреваем всю заготовку в газовой печи, то необходимо учесть, что после нагрева она изгибается вверх и это сильно влияет на процесс штамповки.

Промоделированная заготовка после нагрева в газовой печи представлена на рис. 4:



Рис. 4. Модель заготовки после нагрева в газовой печи до 1100 °C

Fig. 4. Model of the workblank after heating in a gas oven up to 1100 °C

Как видно на рис. 4 моделирование показывает равномерный нагрев заготовки в заданное время и изгиб фланца.

Заготовка после нагрева в газовой печи на производстве представлена на рис. 5.

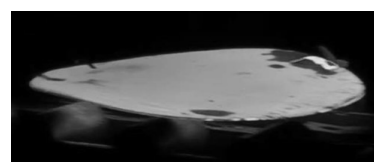


Рис. 5. Заготовки после нагрева в газовой печи до 1100 °C.

Fig. 5. Workblanks after heating in a gas furnace up to 1100 °C.

При нагреве заготовки в печи, края заготовки так же поднимаются, т. е. происходит изгиб заготовки, как при моделировании.

Вследствие изгиба, появляется необходимость прижимом сделать правку заготовки под последующую штамповку.

Распределение деформаций детали в конце моделирования представлено на рис. 6:



Рис. 6. Распределение деформаций детали после моделирования в Qform.

Fig. 6. The distribution of deformations of the part after modeling in Qform.

Моделирование в QForm показывает, что максимальные деформации находятся во фланце и в зоне изгиба по матрице, что подтверждается экспериментом. Поэтому необходимо уменьшить деформацию на участках перехода цилиндрической части к эллиптической.

Для проведения экспериментальной штамповки на производстве на заготовку была нанесена разметка по схеме, показанной на рис. 7.

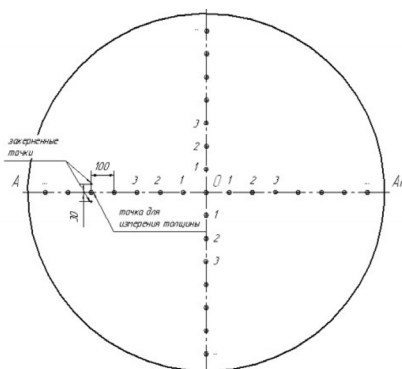


Рис. 7. Схема измерения толщины дна после штамповки

Fig. 7. Thickness measurement pattern bottoms after stamping

Заготовка с нанесенной разметкой показана на рис. 8.



Рис. 8. Заготовка с разметкой точек для измерения толщины дна после штамповки

Fig. 8. Workblank with marking points for measuring thickness of the wall after stamping

После горячей листовой штамповки дна были проведены измерения относительной деформации по толщине. Результаты показаны на рис. 9.

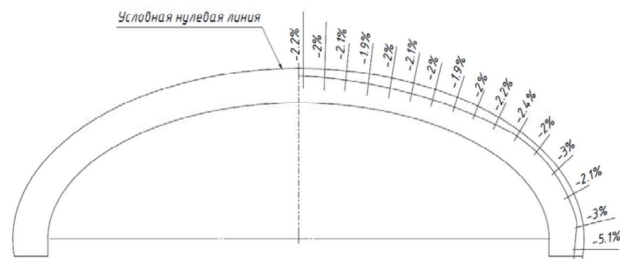


Рис. 9. Распределение относительных деформаций по толщине в готовой детали

Fig. 9. Distribution of thickness relative deformations in the finished part

Сравнение результатов штамповки, представленных на рис. 1 и рис. 9, показывает, что достигнуты лучшие результаты за счет уменьшения коэффициента вытяжки, т. к. его уменьшение позволяет уменьшить растягивающие напряжения. Однако в зоне изгиба, при сходе металла с кромки матрицы, происходит резкое увеличение относительных деформаций по толщине (до 50 %). Такие же результаты получены при моделировании процесса (см. рис. 6).

Полученные результаты позволяют предположить, что охлаждение участков с максимальной деформацией и нагрев в местах, где деформации минимальные, позволит получить более равномерное распределение относительной деформации по толщине.

Выводы

1. Традиционная технология, с равномерным нагревом всей заготовки, как правило, не позволяет получать дна по первой группе.
2. Уменьшение коэффициента вытяжки улучшает равномерное распределение относительной деформации по толщине по образующей детали.
3. Создание градиента температур по поверхности заготовки может:
 - теоретически увеличить устойчивость вытяжки;
 - получить более равномерное распределение относительной деформации по толщине.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Мошнин Е.Н.** Технология штамповки крупногабаритных деталей. М.: Машиностроение, 1973. 240 с.
2. **Каргин Б.С., Липчанский А.А.** Исследование температурных полей в заготовке для детали «днище» при ее переносе от печи к прессу // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2013. № 27. С. 52–56.
3. **Липчанский А.А., Каргин Б.С.** Анализ напряжено-деформированного состояния при горячей листовой штамповке днищ // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. 2014. № 1 (15). С. 71–76.
4. **Степанов-Бомбоев М.С., Куликова Т.К., Елаева Н.К.** Моделирование процесса горячей листовой штамповки титановых деталей в среде QFORM // В сборнике: Наука, общество, образование в условиях цифровизации и глобальных изменений. Сборник статей IV Международной научно-практической конференции. Пенза, 2022. С. 21–26.
5. **Демин В.А.** Горячая листовая штамповка днищ // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2002. № 8. С. 16–19.
6. **Галсанова Э.Ц., Грешилов А.Д., Калинин Я.В., Яковлев А.А.** Исследование методов нагрева заготовок при горячей листовой штамповке // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 8 (255). С. 57–60.
7. **Галкин В.В., Калинин А.Б., Пачурин Г.В., Ермаков Д.Ю.** Предельная степень вытяжки листовых изделий со сферическим дном в условиях горячей деформации // Фундаментальные исследования. 2014. № 5-5. С. 939–944.
8. **Кузнецов А.Ф., Горбунова Ю.Д., Орлов Г.А.** Исследование изменения толщины стенки эллиптических тонкостенных днищ при штамповке // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2017. № 3. С. 19–23.
9. **Орлов Г.А., Горбунова Ю.Д., Котов В.В.** Анализ качества горячештампованных днищ. В сборнике: Авиационное машиностроение и транспорт Сибири // Сборник статей X международной научно-технической конференции. 2018. С. 73–77.
10. **Горбунова Ю.Д., Горяев А.И., Кузнецов А.Ф., Орлов Г.А.** Оценка качества горячештампованных эллиптических днищ с использованием комплексных показателей // Заготовительные производства в машиностроении (Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). 2019. Т. 17. № 1. С. 41–47.

11. **Горбунова Ю.Д., Орлов Г.А.** Моделирование горячей штамповки эллиптических стальных днищ. Черные металлы. 2019. № 10. С. 58–62.

REFERENCES

1. Moshnin E.N. Technology of stamping of large-sized parts. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 240 p.
2. Kargin B.S., Lipchansky A.A. Investigation of temperature limits in a workblank for the «bottom» part during its transfer from the furnace to the press. Bulletin of the Azov State Technical University. Issue: Technical Sciences, 2013, No. 27, pp. 52–56.
3. Lipchansky A.A., Kargin B.S. Analysis of the stress-strain state during hot-temperature forming of bottom plates. Resource-saving technologies of production and pressure treatment of materials in mechanical engineering, 2014, No. 1 (15), pp. 71–76.
4. Stepanov-Boboev M.S., Kulikova T.K., Yelaeva N.K. Modeling of the process of hot-temperature of titanium parts in the QFORM environment. In the shot: Science, society, education in the context of digitalization and global changes. Proceedings of the IV-th International Scientific and Practical Conference. Penza, 2022, pp. 21–26.
5. Demin V.A. Hot sheet stamping of bottoms. Processing of materials by pressure, 2002, No. 8, pp. 16–19.
6. Galsanova E.Ts., Greshilov A.D., Kalinin Ya.V., Yakovlev A.A. Investigation of methods of heating blanks under high-temperature forming. Proceedings of the Volgograd State Technical University. 2021. No. 8 (255). pp. 57–60.
7. Galkin V.V., Kalinin A.B., Pachurin G.V., Ermakov D.Yu. Limiting degree of dome sheet products with spherical bottom in hot strain. Fundamental research, 2014, 5-5, pp. 939–944.
8. Kuznetsov A.F., Gorbunova Yu.D., Orlov G.A. The study of the wall thickness changing of thin-walled elliptical bottoms during stamping // Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure, 2017, No. 3, pp. 19–23.
9. Orlov G.A., Gorbunova Yu.D., Kotov V.V. Quality analysis of hot-temperature formed bottoms. In the shot: Aircraft engineering and transport of Siberia. Proceedings of the X-th International Scientific and Technical Conference, 2018, pp. 73–77.
10. Gorbunova Yu.D., Goryaev A.I., Kuznetsov A.F., Orlov G.A. Assessment of the quality of hot-stamped elliptical bottoms using complex indicators // Blank production in mechanical engineering (Forging, foundry and other productions). 2019, vol. 17, No. 1, pp. 41–47.
11. Gorbunova Yu.D., Orlov G.A. Simulation of hot stamping of elliptical steel bottoms. Ferrous metals, 2019, No. 10, pp. 58–62.

Статья поступила в редакцию 23.10.2023; одобрена после рецензирования 07.11.2023; принята к публикации 08.11.2023.

The article was submitted 23.10.2023; approved after reviewing 07.11.2023; assepted for publication 08.11.2023.