



Разработка сварной конструкции и технологии изготовления корпуса дымового клапана Ду 2000 доменной печи

© А.С. Пятовский*, В.Л. Бройдо**

*ООО «ИЗТМ-Инжиниринг», г. Иркутск, Россия

**Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – разработка сварной конструкции и технологии изготовления корпуса дымового клапана Ду 2000 доменной печи взамен ранее использовавшейся литой конструкции из стали 35Л. Новая крупногабаритная конструкция (3742 x 3020 x 3275 мм) должна обеспечить прочное и герметичное сопряжение трех толстостенных (до 40 мм) вальцованных обечаек. Разработка конструкции и ее элементов велась с использованием трехмерного моделирования в программе «Компас-3D». Зоны сопряжения обечаек оформлены с использованием переходных элементов в виде гнутых сегментов двоякой кривизны. Установлено, что применение технологических припусков при гибке цилиндрических обечаек секторов обеспечивает получение деталей требуемой точности (отклонения по диаметру – не более 5 мм). Вальцовка обечаек, имеющих сложную криволинейную линию сопряжения, может выполняться на прямоугольной заготовке. Криволинейная линия сопряжения на заготовке вырезается на газорезательной машине с числовым программным управлением участками длиной 150–170 мм с перемычками 50–70 мм. Показано, что удаление перемычек ручной газовой резкой и подготовка кромок под сварку могут выполняться только после вальцовки и сварки прямолинейного стыка обечайки. Отработаны приемы доводки сегментов двоякой кривизны при сборке конструкции с помощью специальных гидравлических распорок. С использованием данных предложенных приемов доводки разработана технология изготовления сварной конструкции корпуса. За счет оптимизации конструкции корпуса удалось добиться снижения его массы на 5,5% от массы литого корпуса. По разработанной технологии изготовлены два клапана для замены изношенных на крупнейшую в Европе домну 5500 м³ «Северянка» ПАО «Северсталь». Использованные технические решения предоставили значительное снижение трудоемкости изготовления при обеспечении необходимого качества конструкции и снижение массы конструкции по сравнению с литой.

Ключевые слова: дымовой клапан, доменная печь, сварная конструкция, отливка, обечайка, вальцовка

Для цитирования: Пятовский А.С., Бройдо В.Л. Разработка сварной конструкции и технологии изготовления корпуса дымового клапана Ду 2000 доменной печи. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 148–160. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-148-160>

Development of a welded structure and a technology for manufacturing a smoke valve casing ID 2000 for use in a blast furnace

Artur S. Pyatovsky*, Vladimir L. Broido**

* Irkutsk Heavy Machinery Plant – Engineering LLC, Irkutsk, Russia

** Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim of this work is to develop a welded structure and a technology for manufacturing a smoke valve casing ID 2000 for use in a blast furnace to substitute the previously used cast design from 35L steel. The proposed large-size structure (3742 x 3020 x 3275 mm) should provide a strong and tight connection of three thick-walled (to 40 mm) rolled shells. The development of the structure and its elements was carried out using three-dimensional modelling in the Compass-3d software. The joining zones of the shells are designed as bent transition elements with a double curvature. It was found that the use of technological allowances when bending the cylindrical shells of sectors makes it possible to obtain parts with the required accuracy (a deviation in diameter not higher than 5 mm). The rolling of the shells having a complex curved line of joining can be performed on a rectangular workpiece. A curved joining line with the sections having a length of 150–170 mm and cross-connections of 50–70 mm is cut out on the workpiece using a computerized flame-cutting machine. It was shown that the removal of the cross-connections by manual gas cutting and preparation of edges for welding can be performed only after rolling and welding of the straight joint of the shell. Techniques for fitting

the double-curved segments during assembling using special hydraulic struts were elaborated. These techniques were used to develop a technology for manufacturing a welded casing structure. Due to the optimization of the casing design, its weight was reduced by 5.5% compared to that produced by casting. Using the developed technology, two valves were manufactured to replace obsolete valves at the largest blast furnace (5500 m³) in Europe "Severyanka", PJSC Severstal. The described technical solutions provided a significant reduction in the labour intensity of manufacturing the presented structure, at the same time as ensuring its high quality and optimized weight compared to that produced by casting.

Keywords: smoke valve, blast furnace, welded structure, casting, shell, rolling

For citation: Pyatovsky AS, Broido VL. Development of a welded structure and a technology for manufacturing a smoke valve casing ID 2000 for use in a blast furnace. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):148–160. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-148-160>

ВВЕДЕНИЕ

Иркутский завод тяжелого машиностроения (ИЗТМ) более 70 лет специализируется на изготовлении клапанов, применяемых в доменном производстве. Оборудование для доменных печей создавалось в сотрудничестве со специализированными проектными и научно-исследовательскими институтами и успешно работает на всех заводах черной металлургии России и СНГ, а также в других странах мира.

Дымовой клапан служит для отделения воздухонагревателей от дымового боров

при его работе на «дутье». Для уменьшения потерь тяги в дымовом тракте и более равномерного распределения продуктов сгорания газа по ячейкам насадки устанавливают для каждого воздухонагревателя два дымовых клапана.

Дымовые клапаны бывают шибберного, кривошипно-тарельчатого и тарельчатого типов. Наиболее широкое применение получили угловые тарельчатые дымовые клапаны благодаря их компактности, надежности в работе и обеспечении плотности перекрытия.



Рис. 1. Дымовой клапан Ду2000 производства Иркутского завода тяжелого машиностроения (корпус литой)

Fig. 1. Du 2000 smoke valve produced by the Irkutsk Heavy Engineering Plant (cast body)



В зависимости от объема доменной печи дымовые клапаны изготавливаются диаметрами 1100, 1300 и 2000 мм [1]. Традиционно корпус дымового клапана Ду2000 изготавливался из стали 35Л методом литья (рис. 1).

До настоящего времени дымовые клапаны на ИЗТМ выпускались серийно, и изготовление крупногабаритного сложного корпуса технологией стального литья в разовую песчаную форму было целесообразно в силу высокой производительности процесса. Но, несмотря на отработанную технологию, изготовление методом литья имеет ряд недостатков, наиболее существенными из них являются необходимость изготовления сложной дорогостоящей оснастки и образование большого количества технологических дефектов отливок в виде трещин и усадочных раковин, газовых раковин, неплотностей и т.д. Наличие данных дефектов вызывало необходимость проведения весьма трудоемких работ по их устранению и повторным испытаниям, существенно повышающим себестоимость изготовления и удлинением цикл изготовления. Особенно большой объем работ по исправлению неплотностей отливки пришлось выполнять при изготовлении первого литого корпуса клапана 2000 мм³, что, безусловно, вызвало срыв срока поставки машины заказчику. Основными местами пористого металла явились зоны сопряжений и в первую очередь – сопряжений с фланцами. Работы по исправлению дефектов литья проводились в процессе гидроиспытаний в местах обнаружения течей путем разделки кромок и заварки ручной дуговой сваркой, причем в одной и той же зоне эти работы выполнялись неоднократно, поскольку течи обнаруживались рядом с уже заваренными дефектами.

Известно, что изготовление крупных корпусных узлов из проката, литых, кованных и штампованных заготовок имеет ряд преимуществ по сравнению с изготовлением крупных литых деталей сложной конструкции [2–6].

Практика изготовления сварных корпусов клапанов Ду1000 и Ду1300 показала, что (несмотря на сложность обеспечения сопряжения вальцованных обечаек) качество их выгодно отличается от литых из-за более высо-

кого качества листового металла и отсутствия неплотностей в местах сопряжений обечаек и их сопряжений с фланцами. На основании вышеизложенного была определена цель работы: разработка конструкции и технологии изготовления сварной конструкции клапана.

РАЗРАБОТКА СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА КЛАПАНА

При разработке сварной конструкции корпуса основной задачей являлось обеспечение прочности, герметичности и технологичности не только не уступающих его литому аналогу, но и превосходящих его. Таким образом, улучшение эксплуатационных свойств и удешевление технологии изготовления корпуса являлись модернизацией клапана в целом [7–10].

К конструкции корпуса предъявлялись следующие требования:

- применяемый материал должен иметь хорошую свариваемость;
- толщина листовых элементов должна удовлетворять требованиям прочности при гидравлических испытаниях давлением 5,4 МПа;
- минимальное количество сварных швов;
- технологичность операций изготовления деталей и сборки корпуса.

Важным условием при разработке конструктивной схемы было обеспечение свободного хода тарелки, обеспечивающей перекрытие клапана и сохранение всех присоединительных размеров.

За основу конструкции была принята конструкция литого корпуса, разбитого на элементы из листового проката, преимущественно обечаек и фланцы.

Также важным критерием при проектировании была необходимость исключить возможность вредного влияния остаточных деформаций и напряжений, в том числе сварочных, а также концентрации напряжений [11–15]. Принятые конструктивные решения обеспечили наиболее равномерное распределение напряжений в элементах и деталях без входящих углов, резких перепадов сечения и других концентраторов напряжений.

Для изготовления данной конструкции

применяется сталь СтЗсп по ГОСТ 380-2005¹ «Сталь углеродистая обыкновенного качества». Данная сталь обладает хорошей свариваемостью и достаточными механическими свойствами^{1,2}.

Согласно техническим условиям завода, давление для испытаний клапанов металлургического оборудования на прочность и плотность принимается выше рабочего на 20%, что составляет 5,4 МПа. Соответственно, конструкция корпуса должна обладать достаточной прочностью, удовлетворяющей данному требованию. Путем прочностного расчета было определено, что толщины 40 мм для листовых элементов конструкции будет достаточно.

При разработке сварных соединений руководствовались требованиями ГОСТ 14771-76³ «Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» и ГОСТ 23518-79⁴ «Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами». Применение механизированной сварки проволокой в среде защитного газа стало наиболее рациональным и технологичным способом получения равнопрочного соединения элементов корпуса. В силу сложной формы, крупных габаритов конструкции применение автоматизированной или ручной дуговой сварки покрытыми электродами невозможно или нецелесообразно. В качестве сварочного материала применялась проволока Св-08Г2С ГОСТ 2246-70⁵, взаимодействующая со смесью защитного газа: 78% Ar + 22% CO₂.

Конструкторские разработки велись в хорошо зарекомендовавшем себя на предприятии программном комплексе Компас 3D с применением твердотельного моделирова-

ния. На рис. 2 изображена 3D-модель корпуса клапана. Использование технологии трехмерного моделирования при разработке корпуса позволило максимально точно определить контуры и радиусы деталей, их сопряжения и взаимное расположение.

Но, несмотря на качественную проработку конструкции и тщательную подгонку элементов 3D-сборки, полностью уйти от проблем сопряжения деталей не удалось. Таким образом, в месте соединения трех обечаек в силу разности их радиусов образовался значительный зазор, который пришлось перекрывать узкими «лоскутами», образующими сосредоточение сварных швов (рис. 3), что является негативным фактором для сварных конструкций и требующим проведения термообработки (общей или местной) для снятия остаточных напряжений. На рис. 4 и 5 показаны чертежи листовых элементов корпуса.

Основной сложностью при разработке деталей было точное определение размеров контуров разверток деталей, т.к. это наиболее важный параметр, от которого в последующем зависит и точность сборки самого корпуса.

Даже небольшие просчеты как минимум могут привести к образованию увеличенных зазоров либо отклонению геометрических параметров конструкции от чертежных, но применение системы автоматизированного проектирования позволило эффективно справиться с данной задачей.

Из-за большого диаметра обечаек длина их разверток выходила за пределы размеров стандартного листа 1500x6000 мм, в связи с чем в чертежах была предусмотрена стыковка заготовок из нескольких частей с разделкой кромок для обеспечения полного провара.

¹ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки (с изм.). Введ. 01.07.2008. М.: Стандартинформ, 2009, 11 с.

²Драгунов Ю.Г., Зубченко А.С., Каширский Ю.В. [и др.]. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., перераб. и доп. М., 2014. 1216 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.mashin.ru/files/stranicy_iz_marochn15.pdf (13.09.2020).

³ГОСТ 14771-76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры (с изм.). Введ. М.: Стандартинформ, 2007.

⁴ГОСТ 23518-79. Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. Введ. 01.01.1980. М.: Стандартинформ, 2011.

⁵ГОСТ 2246-70. Проволока стальная сварочная. Технические условия (с изм.). Введ. 01.01.1973. М.: Стандартинформ, 2008.



Типы и конструктивные элементы сварных соединений подбирались с учетом необходимости обеспечения равнопрочного соединения с основным металлом, все сварные соединения конструкции имеют Х-образную

разделку кромок, обеспечивающую провар по всей толщине деталей [16–18]. На рис. 6 изображен разрез корпуса с указанием сварных швов (без фланцев).

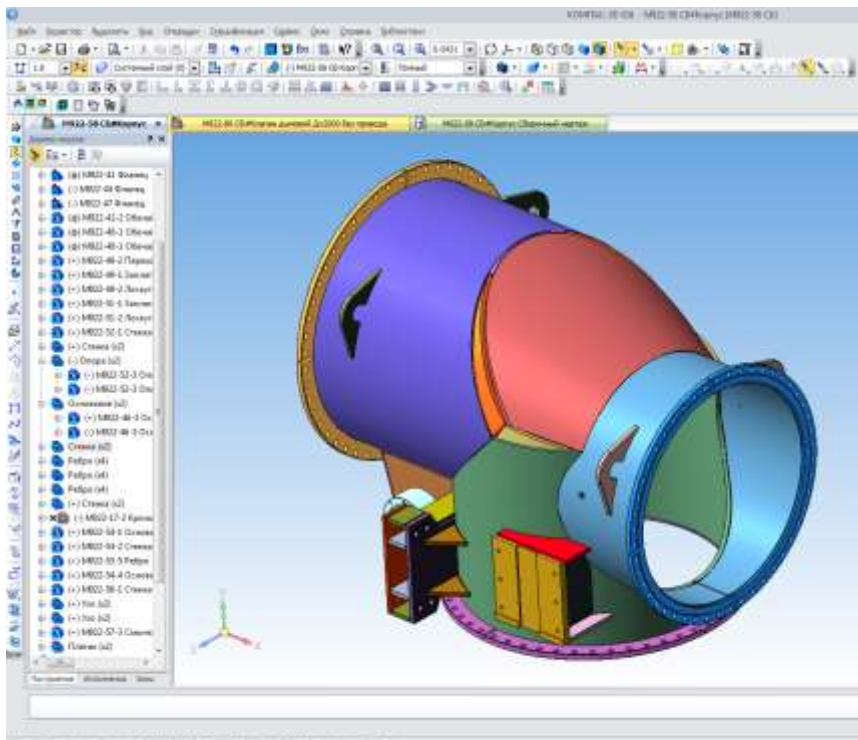


Рис. 2. 3D-модель корпуса дымового клапана Ду2000
Fig. 2. 3D model of Du 2000 smoke valve body

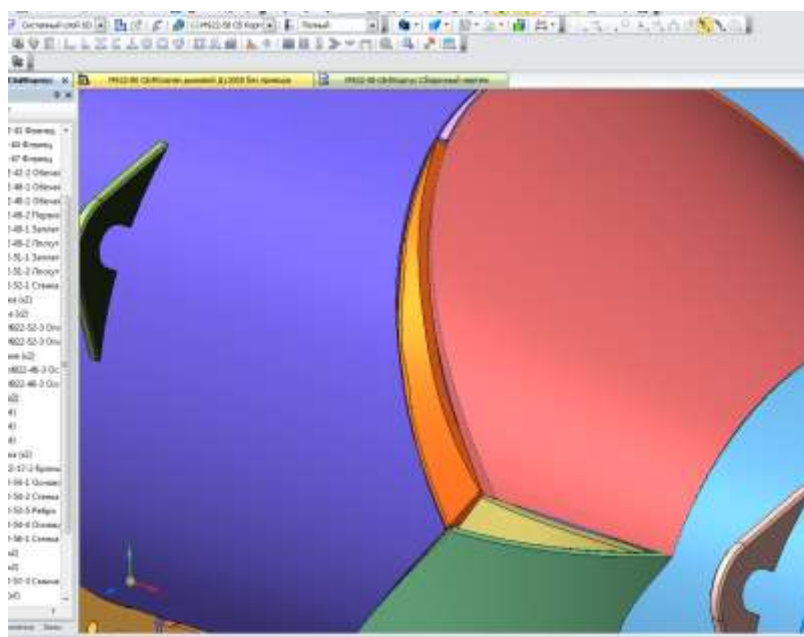


Рис. 3. Место стыка трех обечайек разного радиуса
Fig. 3. Joint of three shells of different radii

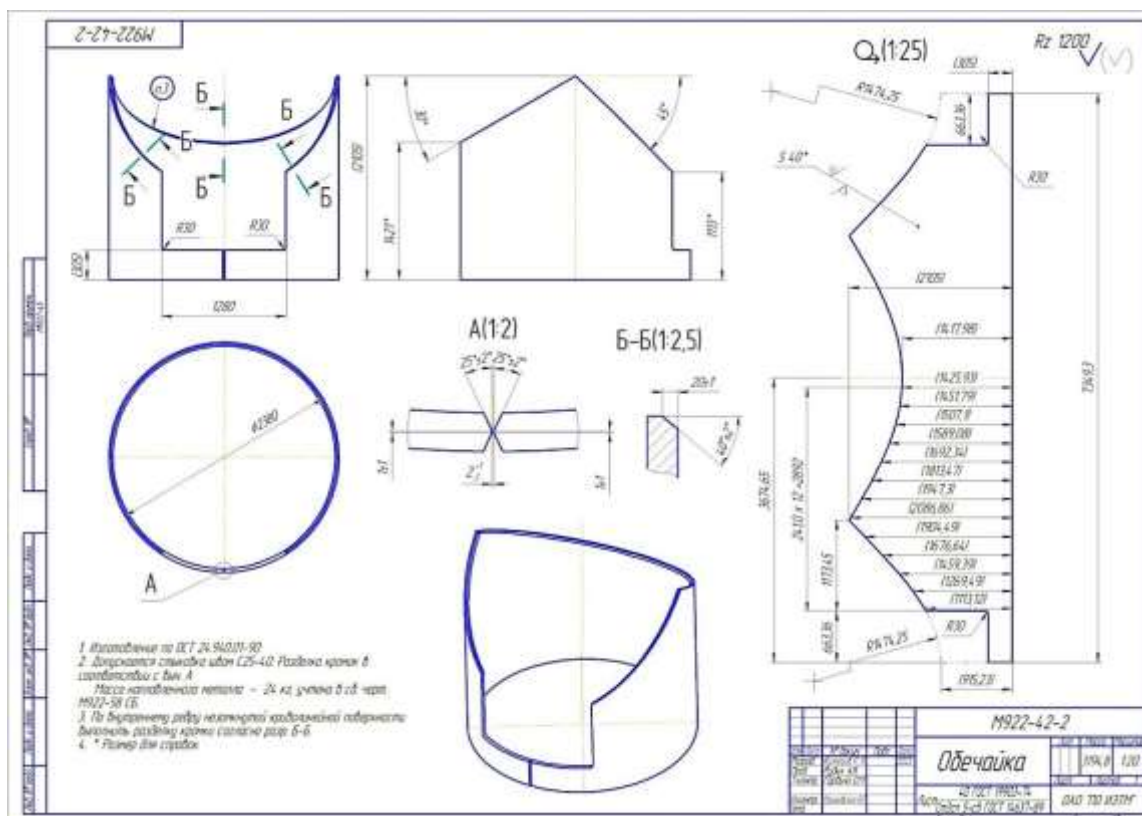


Рис. 4. Чертеж нижней обечайки с разверткой
 Fig. 4. Drawing of the lower shell with a scan

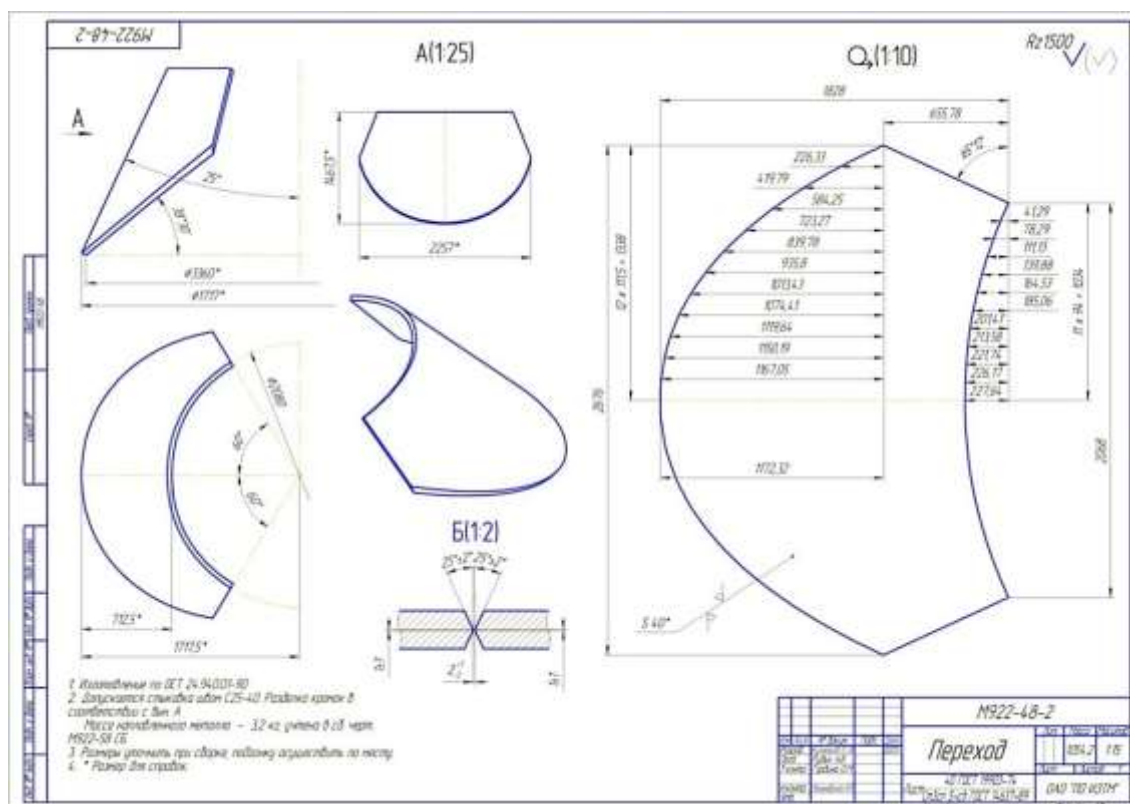


Рис. 5. Чертеж перехода с разверткой
 Fig. 5. Drawing of the transition with a scan

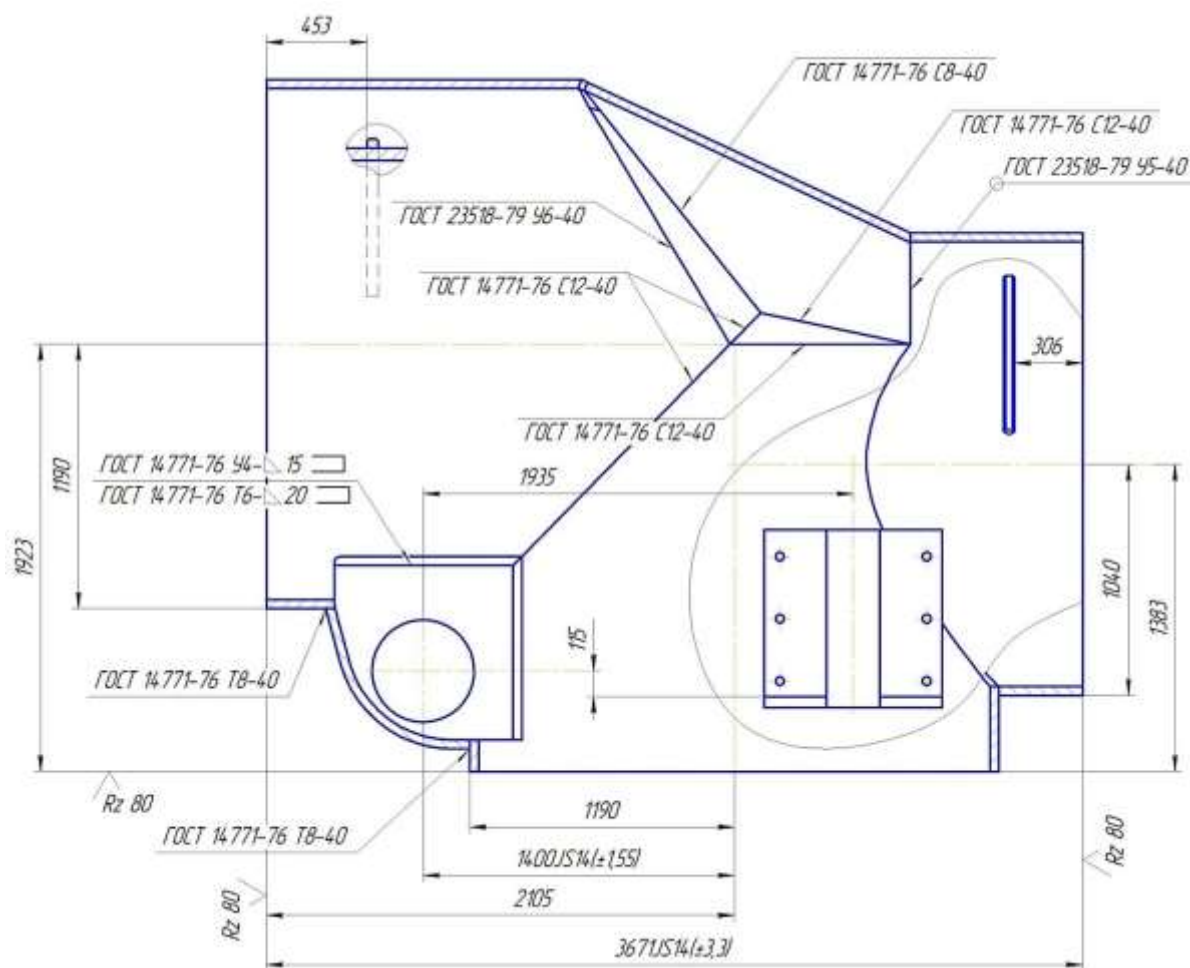


Рис. 6. Разрез корпуса с указанием сварных швов
Fig. 6. Body section with indication of welds

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Основными проблемами при изготовлении сварной конструкции явились изготовление точных гнутых деталей, гибка точных цилиндрических деталей, имеющих различную высоту (см. рис. 4), сборка конструкции без использования специальных приспособлений из-за невозможности разработки и изготовления в условиях единичного производства, необходимость изготовления корпуса с минимальным значением остаточных напряжений с проведением механической обработки поверхностей под установку фланцев.

Заготовительные операции. Из-за необходимости точной гибки листовых заготовок с предельной толщиной для имеющих листогибочных вальцев с гидравлическим приводом НБ 2224, для улучшения качества

гибки мелких деталей использована предварительная термическая обработка листа для повышения пластических свойств; применение технологических припусков на все гнутые детали из-за невозможности подгибки радиусов у краев развертки в вальцах, согласование чертежей деталей конструкции проводилось параллельно с проведением опытных работ по изготовлению деталей [16].

В качестве разупрочняющей термической обработки использован отжиг листа, после этого выполнены механические испытания металла в состоянии поставки (нормализация) и после отжига, причем отжиг проводился как на образцах в лабораторной печи, так и листах металла в цеховой печи [18]. Сравнительные результаты механических испытаний приведены в таблице.

Механические свойства листа в состоянии поставки и после термообработки
Mechanical properties of the sheet in the as-received condition and after heat treatment

Предел прочности σ_B , МПа		Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа		Относительное удлинение δ , %		Относительное сужение Ψ , %		Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²		Твердость, НВ	
До ТО	После ТО	До ТО	После ТО	До ТО	После ТО	До ТО	После ТО	До ТО	После ТО	До ТО	После ТО
439	409	240	210	24,7	26,3	57,0	53,4	135	149	126	111

Вырезка заготовок для гибки выполнялась на газорезательной машине с числовым программным управлением «Танак», обеспечивающей точность деталей $\pm 0,5$ мм на габариты листа (1500х6000 мм), причем на длину развертки учитывался технологический припуск по 500 мм на сторону для обеспечения точности радиуса гибки. Вырезка заготовок, габариты развертки которых с учетом технологического припуска превышают габариты листа, выполнялась с предварительной стыковкой полотнищ требуемых размеров сборкой, сваркой и правкой. Для исключения искажения размеров цилиндрических обечаек, имеющих разную высоту по периметру, вырезались и гнулись прямоугольные заготовки высотой по максимальной высоте обечайки, у которых криволинейная линия развертки сопряжения обечаек при резке выполнялась участками 150 мм с перемычками 50 мм. После гибки, сборки и сварки прямолинейного

шва обечаек перемычки вырезались, затем выполнялся скос кромок под сварку ручной газовой резкой с последующей зачисткой шлифовальной машиной. На рис. 7 показана гнутая обечайка с прерывистой (с перемычками) линией сопряжения.

Для защиты подшипникового узла вальцов при гибке толстостенных конусов разработано, изготовлено и установлено на вальцах специальное защитное приспособление (рис. 8).

Подгибка отдельных мелких переходных деталей, в том числе и сферической формы, выполнялась на горизонтальном правильно-гибочном гидравлическом прессе усилием 250 т.

СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Сборка под сварку производилась на сборочной плите по разметке с использованием различных, в том числе и регулируемых



Рис. 7. Гнутая заготовка с прерывистой линией сопряжения, выполненная из предварительно стыкованного полотнища

Fig. 7. Bent blank with an interrupted conjugation line made of a pre-joined sheet



Рис. 8. Гибка конуса с использованием защитного приспособления у подшипникового узла вальцев
Fig. 8. Cone bending using a protective device at the roller bearing assembly

винтовых, подложек и подставок. Перед сборкой производилась нивелировка станда. В процессе сборки и контроля использовались также лазерный уровень и рулетка. Прихватки выполнялись ручной дуговой сваркой электродами типа Э50А по ГОСТ 9467-75⁶ марки ТМУ-21У диаметром 3 и 4 мм (рис. 9). Подгибка элементов при сборке осуществлялась с местным нагревом пламенем горелки, закреплении или приварки распорок и стяжек. Для сохранения формы обечайек в процессе изготовления выполнялась приварка технологических распорок из уголка^{6,7} [19, 20].

После сварки выполнена местная термообработка зоны сварных соединений – отпуск для снятия остаточных напряжений с использованием для нагрева мощной газокислородной горелки [18–25]. Нагрев до температуры

450°C выполнялся с внутренней стороны корпуса, контроль температуры выполнялся с наружной стороны при помощи пирометра, продолжительность нагрева – не менее 1 ч на стык. Для замедления охлаждения стыки с наружной стороны укрывались слоем асбеста. Затем швы проверялись УЗК после предварительной проверки на плотность керосином.

Для создания возможностей механической обработки было принято решение механическую обработку конструкции производить до установки фланцев, корпус без фланцев подвергался термообработке, после этого выполнялась механическая обработка, в том числе и обработка для установки фланцев, чистовая механическая обработка фланцев. Дымовой клапан в сборе показан на рис. 10.

⁶ГОСТ 9467-75. Electrodes covered with metallic for manual arc welding of structural and heat-resistant steels. Types (with amendments). Введ. 01.01.1977. М.: Стандартинформ, 2008.

⁷Сварка. Резка. Контроль: справочник: в 2-х т. Т. 1. / под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. М.: Машиностроение, 2004. 624 с.



Рис. 9. Сборка корпуса клапана Иркутского завода тяжелого машиностроения (сварной корпус)
Fig. 9. Assembly of the valve body produced by the Irkutsk Heavy Engineering Plant (welded body)



Рис. 10. Дымовой клапан Ду 2000 мм³ производства
Fig. 10. Smoke valve Du 2000 m³



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изготовление крупного клапана Ду 2000 в сварном варианте потребовало разработки новой конструкции и специальной технологии, использован ряд нестандартных решений. В статье описаны ключевые моменты разработки конструкции и технологии только корпуса клапана. Кроме того, выполнен ряд операций по изготовлению заготовок, сборке, сварке, наплавке, термообработке, механической обработке, сборке и испытаниям плотности поверхностей сопряжения клапана. Опыт изготовления первой машины показал эффективность использования сварного варианта изготовления корпуса. Значительно

снижена себестоимость изготовления машины, сокращена трудоемкость изготовления и повышено качество продукции; за счет оптимизации конструкции корпуса удалось добиться снижения его массы на 5,5% от массы литого (13600 кг).

По разработанной технологии изготовлены два клапана для замены изношенных на крупнейшую в Европе домну 5500 м³ «Северянка» ПАО «Северсталь». Использованные технические решения предоставили значительное снижение трудоемкости изготовления при обеспечении необходимого качества конструкции и снижение массы конструкции по сравнению с литой.

Список литературы

1. Щиренко Н.С. Механическое оборудование доменных цехов. М.: Изд-во «Металлургиздат», 1962. 525 с.
2. Рыжков Н.И. Производство сварных конструкций в тяжелом машиностроении: организация и технология: 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во «Машиностроение», 1980. 376 с.
3. Liu Yun Qiang, Lv Yong. Study on the Welding of Feeder Hopper and Cylinder Instead of Casting Process // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 599-601. P. 486–488. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.599-601.486>
4. Схиртладзе А.Г. Определение целесообразности замены цельнолитых крупногабаритных заготовок сварно-литыми // *Технология металлов*. 2007. № 1. С. 18–22.
5. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций. М.: Изд-во «Высшая школа», 1971. 760 с.
6. Giarratani F., Gruver G., Jackson R. Clusters, agglomeration, and economic development potential: empirical evidence based on the advent of slab casting by U.S. steel minimills // *Economic Development Quarterly*. 2007. Vol. 21. No. 2. P. 148–164. <https://doi.org/10.1177/0891242406298833>
7. Патон Б.Е. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций // *Автоматическая сварка*. 2003. № 10-11. С. 7–13.
8. Литвинов А.П., Дерломенко В.В. Свариваемость и работоспособность сварных соединений // *Автоматическая сварка*. 2009. № 9. С. 50–56.
9. Delkhosh E., Khurshid M., Barsoum I., Barsoum Z. Fracture mechanics and fatigue life assessment of box-shaped welded structures: FEM analysis and parametric design // *Welding in the World*. 2020. Vol. 64. No. 9. P. 1535–1551. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00945-9>
10. Bull J.W., Woodford C.H., Christie W.C., Neau E., James M.N. The low stress design of welded plates using the self-designing structures approach // *Computers & Structures*. 2000. Vol. 78. No. 1-3. P. 487–496.
11. Стеклов О.И., Антонов А.А., Севостьянов С.П. Обеспечение целостности сварных конструкций и сооружений при их длительной эксплуатации с применением реновационных технологий // *Автоматическая сварка*. 2014. № 6-7. С. 7–12.
12. Чутов Е.И., Иванцов Н.В. Совершенствование сварных конструкций применением литых заготовок // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2016. Т. 1. № 12. С. 452–453.
13. Гончаров Н.Г., Колесников О.И., Юшин А.А., Гринев С.М., Временко А.В., Финатов Д.Н. [и др.]. Использование веллолетов в качестве тройниковых соединений при строительстве, реконструкции и ремонте трубопроводов // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2016. № 3. С. 60–64.
14. Nega Hailemariam Fisseha, Hui Yang, Ying Gao. Weld design of vehicle bodies and analysis of welded butt and t-joints using Simufact // *International Journal of Science and Research*. 2015. Vol. 4. Iss. 7. P. 420–427.
15. Sulaiman M.S., Manurung Yu.H.P., Haruman E., Bin Abdul Rahim M.R., Redza M.R., Lidam R.N.Ak., et al. Simulation and experimental study on distortion of butt and t-joints using weld planner // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2011. Vol. 25. Iss. 10. P. 2641–2646. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0701-8>
16. Москвичев В.В. Ресурсное проектирование и безопасность крупногабаритных сварных конструкций // *Сварка в России – 2019: современное состояние и перспективы: тезисы докладов Международной конференции, посвященной 100-летию Б.Е. Патона (г. Томск, 3–7 сентября 2019)*. Томск: Изд-во ИФПМ СО РАН, 2019. С. 209.
17. Бройдо В.Л., Блохин В.А. Технология изготовления корпуса дымового клапана Ду 2000 доменной печи // *Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): матер. VI Всерос. науч.-*

техн. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 25–27 апреля, 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. С. 273–280.

18. Фетисов В.П. Оценка пластичности при деформации углеродистой стали // Литье и металлургия. 2019. № 3. С. 85–88. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-85-88>

19. Винокуров В.А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.

20. Вовчук И.П., Шишватова О.В. Конструкторско-технологическое решение получения литой заготовки с удовлетворительной свариваемостью // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 1. № 12. С. 422–424.

21. Лоза А.В., Чигарев В.В., Шишкин В.В. Повышение качества стальных лито-сварных конструкций // Вестник Приазовского государственного технического уни-

верситета. Серия: Технические науки. 2016. № 33. С. 107–113.

22. Новокрещенов С.А. Пути улучшения качества сварных соединений // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. Т. 7. № 7. С. 152–156.

23. Ющенко К.А. Свариваемость и перспективные процессы сварки материалов // Автоматическая сварка. 2004. № 9. С. 39–44.

24. Радченко М.В., Радченко В.Г. Специфика производства сварных изделий и конструкций: монография: в 2 ч. Ч. 2. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. 204 с.

25. Слепцов О.И., Сивцев М.Н., Слепцов Г.Н., Харбин Н.Н., Эверстов М.М. Разработка ремонтно-сварочных технологий для восстановления узлов горнодобывающей техники в условиях естественно низких температур // Сварка и диагностика. 2019. № 1. С. 28–31.

References

1. Shchirenko NS. *Mechanical equipment for blast furnace shops*. Moscow: Metallurgizdat; 1962, 525 p. (In Russ.)

2. Ryzhkov NI. *Production of welded structures in heavy engineering: organization and technology*. Moscow: Mashinostroenie; 1980, 376 p. (In Russ.)

3. Liu Yun Qiang, Lv Yong. Study on the welding of feeder hopper and cylinder instead of casting process. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;599-601:486–488. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.599-601.486>

4. Skhirtladze AG. Determining expediency of one-piece large-size blank replacement with cast-welded ones. *Tekhnologiya metallov*. 2007;1:18–22. (In Russ.)

5. Nikolaev GA, Kurkin SA, Vinokurov VA. *Calculation, design and manufacture of welded structures*. Moscow: Vysshaya shkola; 1971, 760 p. (In Russ.)

6. Giarratani F, Gruver G, Jackson R. Clusters, agglomeration, and economic development potential: empirical evidence based on the advent of slab casting by U.S. steel minimills. *Economic Development Quarterly*. 2007;21(2):148–164. <https://doi.org/10.1177/0891242406298833>

7. Paton BE. Modern research and development trends in welding and structural strength. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*. 2003;10-11:7–13.

8. Litvinov AP, Derloimenko VV. Weldability and performance of welded joints. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*. 2009;9:50–56.

9. Delkhosh E, Khurshid M, Barsoum I, Barsoum Z. Fracture mechanics and fatigue life assessment of box-shaped welded structures: FEM analysis and parametric design. *Welding in the World*. 2020;64(9):1535–1551. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00945-9>

10. Bull JW, Woodford CH, Christie WC, Neau E, James MN. The low stress design of welded plates using the self-designing structures approach. *Computers & Structures*. 2000;78(1-3):487–496.

11. Steklov OI, Antonov AA, Sevost'yanov SP. Providing integrity of welded designs and structures during their long-

term operation using renovation technologies. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*. 2014;6-7:7–12.

12. Chutov EI, Ivantsov NV. Improving weldments application cast billets. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2016;1(12):452–453. (In Russ.)

13. Goncharov NG, Kolesnikov OI, Yushin AA, Gridnev SM, Vremenko AV, Finatov DN, et al. Application of weldolets as T-connectors for construction, renovation and repair of pipelines. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov*. 2016;3:60–64. (In Russ.)

14. Nega Hailemariam Fisseha, Hui Yang, Ying Gao. Weld design of vehicle bodies and analysis of welded butt and T-joints using Simufact. *International Journal of Science and Research*. 2015;4(7):420–427.

15. Sulaiman MS, Manurung YuHP, Haruman E, Bin Abdul Rahim MR, Redza MR, Lidam RNAk, et al. Simulation and experimental study on distortion of butt and T-joints using weld planner. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2011;25(10):2641–2646. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0701-8>

16. Moskvichev VV. Resource design and safety of large welded structures. In: *Svarka v Rossii – 2019: sovremennoe sostoyanie i perspektivy: tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferencii, posvyashchennoj 100-letiyu B.E. Patona = Welding in Russia - 2019: current state and prospects: abstracts of the International conference dedicated to the 100th anniversary of B.E. Paton*. 3–7 September 2019, Tomsk. Tomsk: Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; 2019, p. 209. (In Russ.)

17. Brojdo VL, Blohnnin VA. Manufacturing technology of a body of Du 2000 blast furnace smoke valve. *Zhiznennyi tsikl konstrukcionnykh materialov (ot polucheniya do utilizatsii): materialy VI Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Life cycle of structural materials (from manufacturing to disposal): proceedings of VI All-Russian scientific and technical conference with international participation*. 25–27 April 2016, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical Uni-



versity; 2016, p. 273–280. (In Russ.)

18. Fetisov VP. Evaluation of plasticity during deformation of carbon steel. *Lit'e i metallurgiya*. 2019;3:85–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-85-88>

19. Vinokurov VA. *Tempering of welded structures to reduce stresses*. Moscow: Mashinostroenie; 1973, 216 p. (In Russ.)

20. Vovchuk IP, Shishvatova OV. Technological methods for producing cast blanks with satisfactory weldability. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2016;1(12):422–424. (In Russ.)

21. Loza AV, Chigarev VV, Shishkin VV. Quality improvement of steel cast-welded constructions. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2016;33:107–113.

22. Novokreshchenov SA. Ways of improvement of quality

of welded compounds. *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2018;7:152–156. (In Russ.)

23. Yushchenko KA. Weldability and prospective processes of material welding. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*. 2004;9:39–44.

24. Radchenko MV, Radchenko VG. *Features of welded product and structure production: monograph*: in 2 parts. Part 2. Barnaul: Polzunov Altai State Technical University; 2010, 204 p. (In Russ.)

25. Slepcev OI, Sivcev MN, Slepcev GN, Harbin NN, Everstov MM. Development of repair and welding technologies for the recovery of mining equipment in conditions of naturally low temperatures. *Svarka i diagnostika*. 2019;1:28–31. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пятовский Артур Сергеевич,

ведущий инженер-конструктор,
ООО «ИЗТМ-Инжиниринг»,
664007, г. Иркутск, ул. Октябрьской Революции, 1,
Россия;

e-mail: pyatovskii_a@mail.ru

Бройдо Владимир Львович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры машиностроительных технологий
и материалов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: broidolv@gmail.com

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 22.02.2021; одобрена после рецензирования 19.03.2021; принята к публикации 29.04.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Artur S. Pyatovsky,

Leading Design Engineer,
Irkutsk Heavy Machinery Plant – Engineering LLC,
1 Oktyabrsky Revolyutsii St., Irkutsk 664007, Russia;
e-mail: pyatovskii_a@mail.ru

Vladimir L. Broido,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technologies and Materials,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: broidolv@gmail.com

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 22.02.2021; approved after reviewing 19.03.2021; accepted for publication 29.04.2021.