

УДК 669.715.046.5:622.411.33 © Е.А. Головенко¹, А.И. Безруких¹, И.Л. Константинов¹, Д.С. Ворошилов¹, С.Н. Лежнев², 2025

UDC 669.715.046.5:622.411.33 © E.A. Golovenko¹, A.I. Bezrukikh¹, I.L. Konstantinov¹, D.S. Voroshilov¹, S.N. Lezhnev², 2025

¹ ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

² НАО «Рудненский индустриальный университет», 111503, г. Рудный, Казахстан

² Rudny Industrial University, Rudny, 111503, Kazakhstan

✉ e-mail: golovenko_ea@mail.ru

✉ e-mail: golovenko_ea@mail.ru

Использование алюминиевых сплавов для изготовления корпусов взрывозащищенных электроприводов угольной и газовой промышленности*

Use of aluminum alloys for manufacturing casings of explosion-proof electric drives in the coal and gas industries

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-7-119-124>

Установлено, что для изготовления корпусов взрывозащищенных электроприводов в угольной и газовой промышленности целесообразно использовать алюминиевые сплавы, которые обладают высокой прочностью, коррозионной стойкостью, искробезопасностью и отличаются надежностью при эксплуатации во влажных и агрессивных средах. Для разработки технологии изготовления корпуса использовано компьютерное моделирование в программе QForm, что позволило изучить формоизменение заготовки при горячей объемной штамповке и определить требуемое усилие для деформирования.

Ключевые слова: угольная шахта, взрывозащищенный электропривод, алюминиевые сплавы, компьютерное моделирование, метан, горячая объемная штамповка, фонтанная арматура, прессованный профиль.

Для цитирования: Использование алюминиевых сплавов для изготовления корпусов взрывозащищенных электроприводов угольной и газовой промышленности / Е.А. Головенко, А.И. Безруких, И.Л. Константинов и др. // Уголь. 2025;(7):119-124. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-7-119-124.

ГОЛОВЕНКО Е.А.

Канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: golovenko_ea@mail.ru

БЕЗРУКИХ А.И.

Канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физикохимии металлургических процессов и материалов ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: ai@bezru.ru

КОНСТАНТИНОВ И.Л.

Канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории низкоуглеродной металлургии и энергетики ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: ilcon@mail.ru

*Работа выполнена в рамках программы кооперации с образовательными учреждениями и промышленными предприятиями Красноярского края, финансируемой краевым государственным автономным учреждением «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» в соответствии с договором о порядке целевого финансирования № 743 от «29» декабря 2023 г. «Разработка серийного образца, технологии производства и постановки на производство Электропривода взрывозащищенного EV-Drive».

ВОРОШИЛОВ Д.С.

Канд. техн. наук,
заведующий лабораторией
физикохимии металлургических
процессов и материалов
ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»,
660041, г. Красноярск, Россия,
e-mail: d.s.voroshilov@gmail.com

ЛЕЖНЕВ С.Н.

Канд. техн. наук, профессор кафедры
«Металлургия и горное дело»,
НАО «Рудненский
индустриальный университет»,
111503, г. Рудный, Казахстан,
e-mail: sergey_legnev@mail.ru

Abstract

It was found that for the production of explosion-proof electric drive casings in the coal and gas industry it is advisable using aluminum alloys that have high strength, corrosion resistance, spark safety and are reliable when used in humid and aggressive environments. Computer modeling in the QForm program was used to develop the casing production technology, which made it possible to study the change in the shape of the workpiece during hot volume stamping and determine the required force for deformation.

Keywords

Coal mine, explosion-proof electric drive, aluminum alloys, computer modeling, methane, hot volume stamping, fountain fittings, pressed profile.

Acknowledgements

The work was carried out as part of a cooperation program with the educational institutions and industrial enterprises of the Krasnoyarsk Territory, financed by the Regional State Autonomous Institution "Krasnoyarsk Regional Fund for the Support of Scientific and Scientific-Technical Activities" in accordance with the Agreement on Targeted Financing No. 743 dated December 29, 2023, "Development of a production sample, manufacturing technology, and commissioning of the explosion-proof EV-Drive electric drive".

For citation

Golovenko E.A., Bezrukikh A.I., Konstantinov I.L., Voroshilov D.S., Lezhnev S.N. Use of aluminum alloys for manufacturing casings of explosion-proof electric drives in the coal and gas industries. *Ugol*. 2025;(7):119-124. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-7-119-124.

ВВЕДЕНИЕ

В угольной, газовой и других энергетических отраслях промышленности, производство которых связано с повышенным содержанием взрывоопасных веществ, в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51330.0-99 применяют электроприводы взрывозащищенного исполнения [1]. В условиях угольных шахт такие электроприводы используются в насосах, вентиляторах, воздуходувках, конвейерных системах, подъемниках и других системах, работающих в условиях действия взрывоопасной атмосферы. Так, например, добыча угля сопровождается выделением газа метана, взрыв которого в подземной угольной шахте представляет собой смертельную опасность для шахтеров и наносит вред окружающей среде [2, 3, 4, 5]. В источнике [6] методом численного моделирования проанализирован эффект динамического давления, возникающего в канале и туннеле при взрыве метана, а результаты, приведенные в работе [7], позволяют не только улучшить понимание опасности взрыва метана, но и способствовать разработке новой технологии подавления взрыва этого газа для угольной промышленности. В целях обеспечения безопасности условий труда контроль концентрации метана в шахтах должен осуществляться стационарными автоматическими приборами. При этом системы управления всеми забойными машинами и агрегатами комплекса, а также аварийным выключением должны быть искробезопасными, обеспечивать нулевую защиту и автоматическое отключение аппаратов в случае обрыва или замыкания проводов цепей управления или повреждения элементов схемы при управлении по радиоканалу.

В газодобывающей отрасли электроприводы применяют для обеспечения энергией перекачивающих компрессорных агрегатов, для управления транспортировкой газовых потоков, как привод запорной арматуры и для прочих вспомогательных нужд [8]. Газовая отрасль относится к взрывоопасным, так как неосторожное обращение с природным газом может привести к трагическим последствиям. Так, в источнике [9] описаны последствия аварии, случившейся в результате воспламенения газа от электрической искры. Пиковое избыточное давление взрыва в районе

возгорания составляло 57 кПа, максимальная температура выросла до 1620 К, а взрывная мощность этой аварии в тротиловом эквиваленте составила 80 кг. Поэтому от быстрой, точной и надежной работы электроприводов запорной арматуры в газовой отрасли напрямую зависит безопасная и эффективная работа всего газотранспортного комплекса. Электрические приводы, согласно [10], реализуют во взрывозащищенном исполнении класса 1ExdIIBT3, а степень защиты оболочки должна быть не ниже IP 66 [11]. Таким образом, задача разработки взрывобезопасной конструкции электроприводов, как для угольной промышленности, так и для газовой отрасли, является актуальной. Одним из важных факторов, обеспечивающих взрывобезопасность электроприводов (электродвигателей) является материал, из которого изготавливаются их корпуса. Основным требованием к корпусу двигателя является обеспечение прочности конструкции с учетом условий ее эксплуатации. Для двигателей, предназначенных к эксплуатации во взрывоопасной среде, важным условием является исключение искрообразования и перегревов. Современные электродвигатели изготавливаются в корпусах из алюминиевого сплава или чугуна. Однако не всегда имеющиеся в наличии конструкции электродвигателей полностью удовлетворяют требованиям потребителя, и для конкретной производственной ситуации требуется новая, более совершенная конструкция привода. Поэтому целью настоящей работы являлось совершенствование конструкции и технологии производства корпусов электропривода для угольной и газовой промышленности в соответствии с требованиями, предъявляемыми к взрывозащитным изделиям. Для достижения поставленной цели в работе решали следующие задачи:

- выбор материала для корпуса электропривода;
- разработка компьютерной модели технологии изготовления корпуса электропривода;
- изготовление опытной модели корпуса электропривода.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Учитывая, что используемый ПАО ГАЗПРОМ серийный электропривод фонтанной арматуры постоянного тока частично перестал отвечать современным требованиям, была проведена работа по его совершенствованию. В рамках этого была разработана новая конструкция электропривода, в которой машина постоянного тока была заменена на синхронную машину, произведена замена платы управления приводом, а освободившееся при этом в корпусе свободное пространство было использовано для размещения встроенного энергоаккумулятора. Инновационный образец существенно улучшил аналог по техническим характеристикам и получил высокие оценки специалистов. Указанные изменения привода потребовали разработки новой конструкции корпуса. В качестве материала для корпуса был выбран сплав на основе алюминия, который обеспечивает надежную защиту, повышает долговечность электродвигателей, отличается легкостью и хорошей коррозионной стойкостью и, что важно, искробезопасен, что позволяет использовать электродвигатель во влажных и агрессивных средах. Кро-

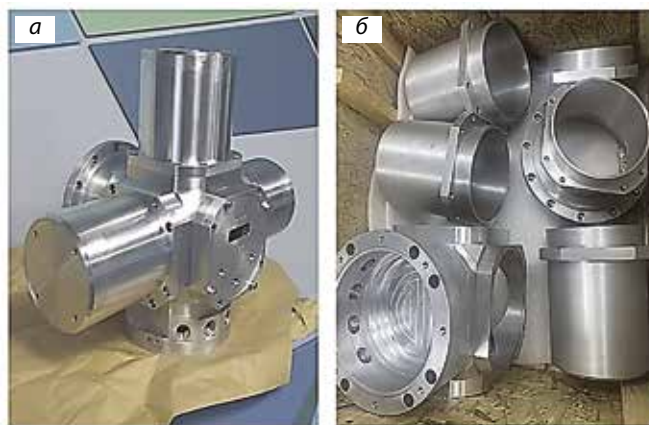


Рис. 1. Корпус инновационного электропривода в сборе (а) и в разобранном состоянии (б)

Fig. 1. Assembled (a) and disassembled (b) housing of an innovative electric drive

ме того, алюминиевые сплавы обладают высокой теплопроводностью, что способствует эффективному охлаждению электродвигателя. Корпус для инновационного электропривода представлен на рис. 1.

Изделие относится к продукции точного машиностроения. Опытным путем было установлено, что изготовление одного привода обработкой резанием занимает до 85 машино-часов работы трех- и пятикоординатных ЧПУ-станков. Это объясняется тем, что первоначально для фрезеровки корпусных изделий использовали цилиндрические заготовки из алюминиевого сплава диаметром 150-350 мм и массой более 300 кг. При массе готового корпуса взрывозащитного исполнения около 20 кг в стружку уходило 280 кг, а коэффициент использования металла (отношение массы готовой детали к массе заготовки) составил около 0,07. Известными способами получения заготовок из алюминиевых сплавов, которые по своей форме и размерам приближены к готовой детали, являются литье под давлением и горячая объемная штамповка. Первый вид обработки позволяет максимально приблизить заготовку к готовой детали, что резко снижает объем последующей обработки резанием, но литейные алюминиевые сплавы ограничены по уровню механических свойств, и поэтому использование этого способа для получения заготовки корпуса взрывозащитного электропривода считается нецелесообразным [12]. Расчеты показали, что способом, обеспечивающим получение заготовки, близкой по форме к детали и обладающей высоким уровнем механических свойств, является горячая объемная штамповка, что в рассматриваемом случае послужило основанием для его выбора [13]. В качестве примера реализации этого способа для получения заготовки была выбрана деталь «Корпус верхний», чертеж и компьютерная модель которой представлены на рис. 2.

В качестве материала для детали был выбран сплав Д16 по ГОСТ 4784-2019, свойства которого подробно описаны в источнике [14]. Разработку технологии штамповки проводили согласно рекомендациям, изложенным в работе [15]. В первую очередь было проведено компьютерное моделирование технологии штамповки в программе QForm

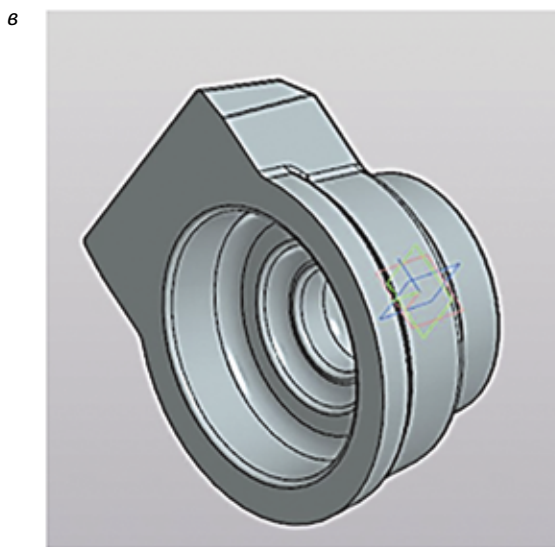
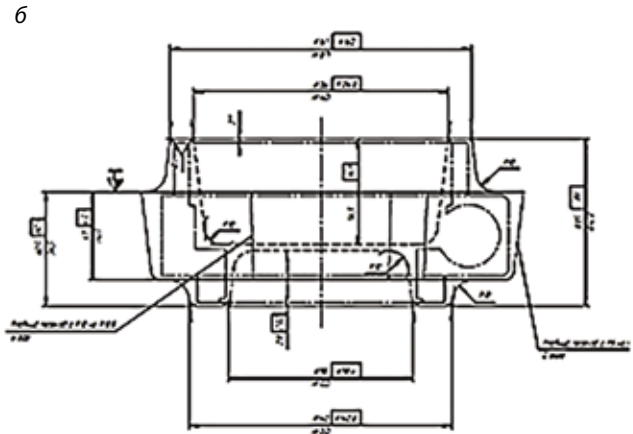
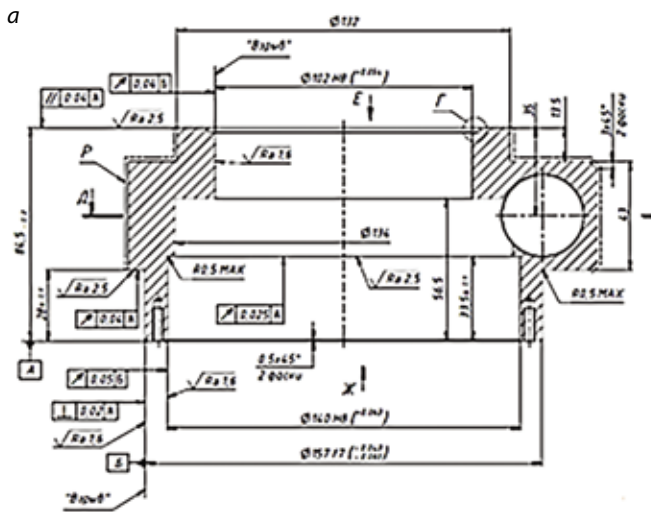


Рис. 2. Чертеж детали (а) штампованной заготовки (б) и компьютерная модель (в) «Корпуса верхнего»
 Fig. 2. A drawing of the part (a), the forged blank (b), and the computer model (c) of the upper housing

Параметры моделирования горячей объемной штамповки заготовки для детали «Корпус верхний» в программе QForm

Parameters for modeling hot forging of a blank for the upper housing in the QForm software suite

Параметр	Значение
Материал заготовки	Сплав Д16
Температура заготовки, градус	430
Материал штампового инструмента	Сталь 5ХНМ
Температура инструмента, градус	400
Трение заготовки об инструмент	Минеральное масло + графит (закон трения Леванова)
Температура окружающей среды, градус	20
Условие остановки	Полное смыкание штампа

[16, 17]. Предварительно была подготовлена 2D-геометрия верхней и нижней частей штампа, а также заготовки в формате dxf. Для моделирования были заданы параметры, приведенные в таблице.

Стадии процесса компьютерного моделирования представлены на рис. 3. Модель штамповки показала, что при постоянной скорости движения траверсы пресса в 5 мм/с деформирование одной штамповки займет около 38 с, а расчетное усилие для штамповки корпуса составит 15 МН. Для штамповки использовали гидравлический пресс усилием 20 МН. При использовании штампованных заготовок для изготовления всех деталей корпуса коэффициент использования металла составил около 0,75.

В угольной промышленности также необходимо учитывать опасность, связанную с выделением метана, и поэтому для привода стационарных и передвижных забойных машин, ленточных конвейеров и другого горношахтного оборудования, эксплуатируемого в подземных выработках угольных и сланцевых шахт, а также в помещениях и наружных установках, опасных по содержанию метана и угольной пыли, рекомендуется использовать взрывозащищенные электродвигатели.

Для этих двигателей также следует использовать искробезопасный материал, которым является алюминиевый сплав. Например, взрывозащищенный двигатель ВА 112МВ6 имеет несколько степеней взрывозащиты, используется в угольной и атомной отраслях, имеет непроницаемую для взрывов оболочку, а в случае опасности взрыв происходит внутри агрегата, не позволяя распространиться во внешнюю среду. Клеммная коробка и проводка этого электродвигателя также герметичны.

К подобному типу двигателей можно отнести двигатели марок ЭВР, 5АМХ, Grundfos, Siemens, WEG и др. Алюминиевые корпуса для этих двигателей изготавливаются методом литья под давлением в специальных литейных машинах экструзией из алюминиевого пресованного полого профиля (рис. 4) или горячей объемной штамповкой.

Кроме преимуществ по взрывобезопасности использование электродвигателей с алюминиевыми корпусами сокращает расходы на транспортировку агрегатов, так как небольшой вес двигателей положительно сказывается на общем весе оборудования, приводом которого он служит.

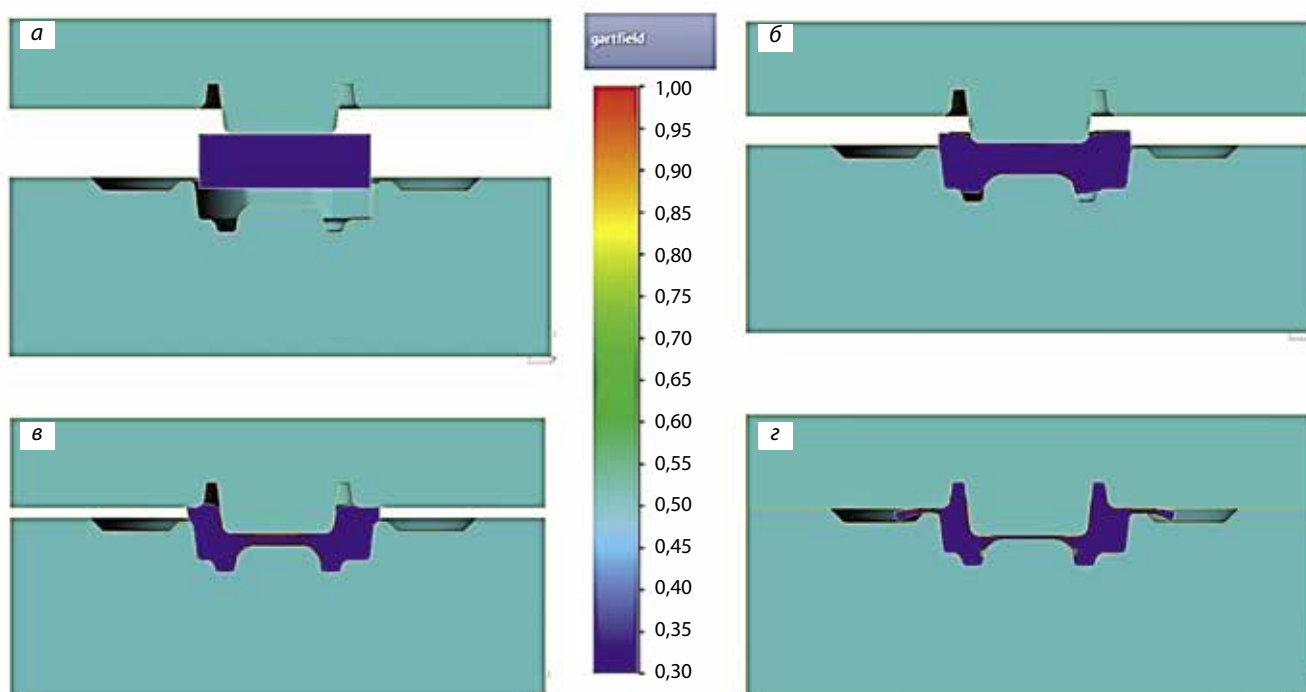


Рис. 3. Компьютерная модель формоизменения при горячей объемной штамповке заготовки «Корпус верхний» в начальный момент (а) и после 1 (б) 2 (в) и 3 (г) секунд деформирования

Fig. 3. A computer model of the shape changes during hot forging of the upper housing blank at the initial moment (a) and after 1 (б), 2 (в) and 3 (г) seconds of deformation

Эти двигатели незаменимы при использовании в вентиляционном оборудовании, поскольку важным условием их конструкции является небольшой вес. Для изготовления корпусов этих двигателей используются такие алюминиевые сплавы, как 6061, 6063, АД31, Д16 и др.

Прессованный алюминиевый профиль корпуса мотора имеет преимущества по сравнению с чугунными за счет снижения веса (приблизительно в три раза), хорошего тепловыделения, лучшего качества поверхности, обычно не требующей окрашивания, коррозионной стойкости и пр. Чрезвычайно важно, что алюминиевые корпуса являются искробезопасными, что важно при их эксплуатации в условиях возможного контакта с метаном. Корпуса электродвигателей, традиционно изготавливаемые из чугуна, успешно заменяются на получаемые из прессованной фасонной трубы, так как операция прессования трубы, например из сплава АД31, высокопроизводительна и за одну минуту можно отпрессовать заготовку приблизительно на 50 двигателей. При этом форма сечения профиля повторяет наружную и внутреннюю конфигурации корпуса и не требует последующей обработки, а для получения готовых корпусов из него требуется только разрезать профиль механической пилой на заготовки, равные длине корпуса, и выполнить фрезерование пазов для крепежных болтов в опорных лапах. При необходимости получения деталей привода, имеющих несимметричную форму, таких как крышки, коробки и прочее, целесообразно использовать горячую объемную штамповку, а разработку технологии проводить в последовательности, описанной выше для получения заготовки для детали «Крышка верхняя».



Рис. 4. Корпус электропривода из алюминиевого сплава, полученный прессованием

Fig. 4. An aluminum alloy housing for electric drive produced by hot forging

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований было установлено, что для изготовления корпусов взрывозащищенных электроприводов в угольной и газовой промышленности целесообразно использовать алюминиевые сплавы, которые отличаются высокой прочностью, коррозионной стойкостью, искробезопасностью и надежностью при эксплуатации во влажных и агрессивных средах. При этом при разработке конструкции заготовки для изготовления корпусов целесообразно использовать компьютерное моделирование.

Список литературы • References

1. Arvind Kumar Singh. Explosion-Proof Equipment in Hazardous Area. Book, Springer; 2023rd edition. 309 p.
2. Long Shi, Jinhui Wang, Guomin Zhang, Xudong Cheng, Xianbo Zhao. A risk assessment method to quantitatively investigate the methane explosion in underground coal mine. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017;(107):317-333.
3. Smirnyakov V.V., Smirnyakova V.V., Pekarchuk D.S., Orlov F.A. Analysis of Methane and Dust Explosions in Modern Coal Mines in Russia. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(2):1917-1929.
4. Опарин В.Н., Скрицкий В.А. Взрывы метана и эндогенные пожары на угольных шахтах Кузбасса. Причины и возможности их предотвращения // Горная промышленность. 2010. № 3. С. 50.
Oparin V.N., Skritskiy V.A. Methane explosions and endogenous fires in coal mines of Kuzbass. Causes and ways to prevent them. *Gornaya promyshlennost'*. 2010;(3):50. (In. Russ.).
5. Lei Huang. Study on explosion-proof intelligent electric control system of mine special vehicle with hydrostatic driving. *Coal Science and Technology*. 2015;(6).
6. Zhang Q., Ma Q.J. Dynamic pressure induced by a methane-air explosion in a coal mine, *Process Safety and Environmental Protection*. 2015;(93):233-239.
7. Dong Ma, Botao Qin, Xiaoxing Zhong, Peng Sheng, Chungen Yin. Effect of flammable gases produced from spontaneous smoldering combustion of coal on methane explosion in coal mines. *Energy*. 2023;(279):128125.
8. Гошко А.И. Арматура трубопроводная целевого назначения. Выбор. Эксплуатация. Ремонт. М.: Машиностроение, 2003 432 с.
9. Qianran Hu, Qi Zhang, Mengqi Yuan, Xinming Qian, Mingzhi Li, Hao Wu, Xingyu Shen, Yiming Liang. Traceability and failure consequences of natural gas explosion accidents based on key investigation technology. *Engineering Failure Analysis*. 2022;(139).
10. ГОСТ Р 51330.0-99. «Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 0. Общие требования».
11. ГОСТ 14254-96. Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP).
12. Плавление и литье алюминиевых сплавов: монография / В.И. Напалков, В.Ф. Фролов, В.Н. Баранов и др. Красноярск: Изд-во Сибирского федерального университета, 2020. 714 с.
13. Производство полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справочник / ред. А.Ф. Белов. М.: Металлургия, 1985. 350 с.
14. Квасов Ф.И., Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы типа дуралюмин. М.: Металлургия, 1984. 240 с.
15. Методология модернизации технологии горячей объемной штамповки алюминиевых сплавов методом компьютерного моделирования / И.Л. Константинов, И.Ю. Губанов, Д.В. Клеменкова и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 1. С. 46-52.
Konstantinov I.L., Gubanov I.Yu., Klemenkova D.V. et al. Methodology for modernization of hot volume stamping technology of aluminum alloys using computer modeling. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2016;14(1):46-52. (In. Russ.).
16. Сайт программы QForm. URL: <https://qform3d.com / Russia.htm> (дата обращения: 15.06.2025).
17. Элингхаузен Т., Стебунов С.А. QForm 7 – новое слово в моделировании процессов обработки металлов давлением // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 2. С. 31-34.
Elingkhauzen T., Stebunov S.A. QForm 7 – a new word in modeling metal forming processes. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2014;(2):31-34. (In. Russ.).

Authors Information

Golovenko E.A. – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: golovenko_ea@mail.ru

Bezrukikh A.I. – PhD (Engineering), Leading Researcher of the Laboratory of Physical Chemistry of Metallurgical Processes and Materials, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: ai@bezru.ru

Konstantinov I.L. – PhD (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of Low-Carbon Metallurgy and Energy, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: ilcon@mail.ru

Voroshilov D.S. – PhD (Engineering), Head of the Laboratory of Physical Chemistry of Metallurgical Processes and Materials, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: d.s.voroshilov@gmail.com

Lezhnev S.N. – PhD (Engineering), Professor of the Department of Metallurgy and Mining, Rudny Industrial University, Rudny, 111503, Kazakhstan, e-mail: sergey_legnev@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.01.2025

Поступила после рецензирования: 17.06.2025

Принята к публикации: 27.06.2025

Paper info

Received January 17, 2025

Reviewed June 17, 2025

Accepted June 27, 2025