ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОЙ ДОБЫЧИ

УДК 622.279.04
В.Ю. Шарохин, ООО «Газпром 335» (Санкт-Петербург, РФ)
А.А. Выдра, ООО «Газпром 335»
В.И. Городецкий, к.т.н., ООО «Газпром 335»
А.В. Ковалев, ООО «Газпром 335»

Системы подводной добычи эксплуатируются в агрессивных условиях. Повышение надежности и обеспечение заданных механических свойств их компонентов достигают за счет использования коррозионностойких материалов. Дуплексные нержавеющие стали сочетают в себе названные качества и широко применяются при изготовлении подводного оборудования.
В работе описан вариант технологии изготовления деталей из дуплексных сталей методом горячего изостатического прессования. Этот способ позволяет производить изделия уникальной конфигурации с увеличенным сопротивлением растрескиванию и улучшенными механическими свойствами. Рассмотрены ограничения предложенного метода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ШЕЛЬФ, СИСТЕМЫ ПОДВОДНОЙ ДОБЫЧИ, МАНИФОЛЬД, ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ГОРЯЧЕЕ ИЗОСТАТИЧЕСКОЕ ПРЕССОВАНИЕ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дуплексные нержавеющие стали широко применяются при производстве оборудования систем подводной добычи (СПД) благодаря сочетанию высокой коррозионной стойкости и необходимых механических свойств (рис. 1). Для формирования дуплексной структуры, состоящей из 50 % феррита и 50 % аустенита, сталь должна содержать значительное количество ферритообразующих элементов (хром и молибден), а также элементы, стабилизирующие аустенит (никель и азот).

Идея создания дуплексных нержавеющих сталей возникла в конце 1920-х годов [2]. Они были основаны на аустенитной матрице, содержащей 20–30 % феррита, и обладали коррозионной стойкостью аустенитных сталей при улучшенных механических свойствах. Однако ввиду технических ограничений сталеплавильного производства того времени было невозможно обеспечить узкий диапазон химического состава, необходимый для формирования дуплексной структуры. Высокое содержание серы, кислорода и углерода приводило к плохой обрабатываемости и образованию трещин, что сдерживало эффективное применение данного материала.

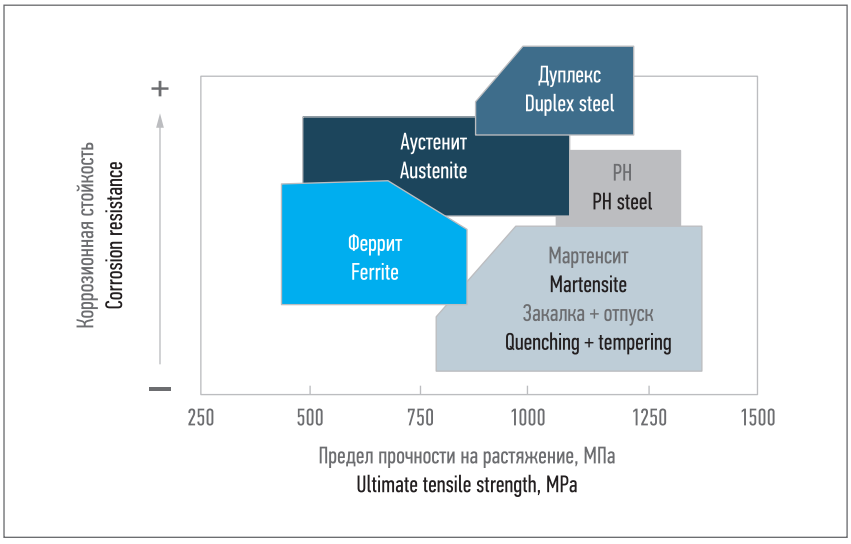


Рис. 1. Коррозионная стойкость и прочностные характеристики различных групп нержавеющих сталей [1]: PH – дисперсионно-твердеющие стали
Fig. 1. Corrosion resistance and strength characteristics of various stainless steel (SS) groups [1]: PH – precipitation hardened steels

Более современные дуплексные нержавеющие стали были разработаны в начале 1970-х годов на фоне развития шельфовой

V.Yu. Sharokhin, Gazprom 335 LLC (Saint Petersburg, the Russian Federation)
A.A. Vydra, Gazprom 335 LLC
V.I. Gorodetskiy, PhD in Engineering, Gazprom 335 LLC
A.V. Kovalev, Gazprom 335 LLC

Using powder material hot isostatic pressing for equipment component manufacturing of subsea production system

Subsea production systems operate in severe conditions. Increased reliability and desired mechanical properties of their components are achieved through using corrosion-resistant materials. Duplex stainless steels are widely used in subsea equipment production as they combine the named qualities.
The study describes a technology option for production of duplex steel components using hot isostatic pressing technique. This technique allows to produce uniquely designed items with enhanced crack resistance and improved mechanical properties. Limitations of the proposed technique are considered.

KEYWORDS: OFFSHORE, SUBSEA PRODUCTION SYSTEMS, MANIFOLD, POWDER MATERIALS, HOT ISOSTATIC PRESSING.

Таблица 1. Химический состав дуплексных сталей
Table 1. Chemical compositions of duplex steels

Сталь Steel	Химический состав, % Chemical composition, %								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Другие Others
UNS S31803	0,030	1,00	2,00	0,045	0,030	24,0–26,0	5,5–6,5	1,20–2,00	N 0,14–0,20
UNS S32205	0,030	1,00	2,00	0,030	0,020	22,0–23,0	4,5–6,5	3,0–3,5	N 0,14–0,20
UNS S32550	0,040	1,00	1,50	0,040	0,030	24,0–27,0	4,5–6,5	2,9–3,9	Cu 1,50–2,50 N 0,10–0,25
UNS S32750	0,030	0,80	1,20	0,035	0,020	24,0–26,0	6,0–8,0	3,0–5,0	N 0,24–0,32 Cu 0,50
UNS S32760	0,030	1,00	1,00	0,030	0,010	24,0–26,0	6,0–8,0	3,0–4,0	N 0,20–0,30 Cu 0,50–1,00 W 0,50–1,00

добычи углеводородов и увеличения стоимости никеля. Низкое содержание Ni в дуплексных сталях по сравнению с другими нержавеющими сталями обеспечивало значительное экономическое преимущество, а новые способы производства, такие как вакуумно-кислородное и аргоно-кислородное обезуглероживание, позволили снизить остаточное содержание S, C, O и улучшить обрабатываемость материала.

Следующим этапом развития технологии дуплексных сталей стало добавление азота для стабилизации аустенита. Это позволило еще более снизить содержание никеля, что положительно сказалось на рентабельности производства. Кроме того, добавление азота повышает предел текучести материала без существенного ухудшения его ударной вязкости.

В последнее время из-за ужесточения требований к прочностным характеристикам и коррозионной стойкости применяются высоколегированные стали (25 % Cr), известные как «супердуплекс».

Ниже перечислены основные группы используемых при производстве компонентов СПД дуплексных сталей (PREN = % Cr + 3.3 % (Mo + 0.5 W) + 16 N):

– 22 % Cr дуплексная сталь с PREN > 35 (UNS S31803, UNS S32205);

– 25 % Cr дуплексная сталь с PREN < 40 (UNS S32550);

– 25 % Cr супердуплексная сталь с PREN > 40 (UNS S32750, UNS S32760).

Их химический состав и механические свойства представлены в табл. 1 и 2.

Микроструктура современных дуплексных сталей обычно основана на ферритной матрице, содержащей аустенитные колонии, ориентированные в соответствии с соотношением Курдюмова – Закса [3]. Для определения фазового состава равновесной микроструктуры ранее применяли диаграммы Шеффлера (рис. 2). В последнее время для этих целей используют компьютерное моделирование. Следует отметить, что различия в химическом составе фаз обуславливают медленную диффузию некоторых элементов, и условия равновесия редко достигаются.

Таблица 2. Механические свойства дуплексных сталей
Table 2. Mechanical properties of duplex steels

Сталь Steel	Предел текучести, МПа Yield point, MPa	Предел прочности, МПа Ultimate strength, MPa	Относительное удлинение, % Percentage elongation
UNS S31803	450	690–900	25
UNS S32205	450	655	25
UNS S32550	550	750	25
UNS S32750	550	800	15
UNS S32760	550	750–895	25

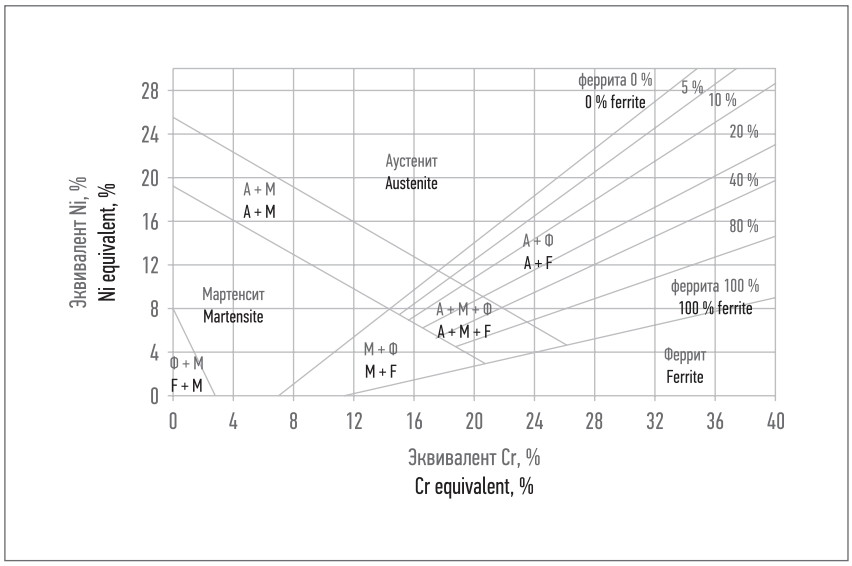


Рис. 2. Диаграмма Шеффлера для определения фазового состава нержавеющих сталей [4]
Fig. 2. Schaeffler's diagram for determination of SS phase compositions [4]

Трубы из дуплексных сталей производят бесшовными или сваркой из листового проката. Соединительные детали (фланцы) изготавливают ковкой и штамповкой. Особо ответственные детали трубопроводов (разветвители, тройники и переходники) делают из поковок или методом горячего изостатического прессования (ГИП) из порошкового металла – частный случай аддитивных технологий.

Технология ГИП сводит к минимуму количество операций механической обработки и сварочных работ за счет проектирования капсулы под конкретные исходные данные, требования и параметры, рассчитанные в том числе методом конечных элементов. Это позволяет получить сложные формы изделий (корпус арматуры, фасонные Y-образные трубопроводные фитинги, комбинации трубопроводных фитингов) с пониженными массовыми характеристиками по отношению к прочностным свойствам (рис. 3).

Для текущих и перспективных проектов добычи углеводородов на шельфе рационально использовать отечественное оборудование СПД, однако до настоящего времени в России не получали дуплексные стали в промышленном масштабе. В рамках освоения их производства организовано взаимодействие между ПАО «Газпром» и ведущими российскими компаниями – производителями и поставщиками специальных сталей: ПАО «ЧТПЗ», ПАО «Русполимет», АО «Полема», АО ТД «Галион».

ПРЕИМУЩЕСТВА ТЕХНОЛОГИИ ГИП

Поскольку дуплексные стали заметно чувствительны к водородному растрескиванию под напря-



а) a) б) b) в) c)

Рис. 3. Общий вид изделий, изготовленных методом ГИП: а) комбинированный трубопровод с отводом и фланцами; б) корпус арматуры [5]; в) трубопроводные фитинги (тройник и Y-образный)
Fig. 3. General appearance of the items produced using hot isostatic pressing (HIP): a) grade taper with offset and flanges; b) valve body [5]; c) pipeline fittings (three way joint and wye)



а) a) б) b)

Рис. 4. Последствие HISC: а) трещина на подводной трубе [6]; б) трещина в сварном шве [7]
Fig. 4. Hydrogen induced stress cracking (HISC) consequence: a) a crack on subsea pipe [6]; b) a crack in weld bead [7]

жением (hydrogen induced stress cracking, HISC) (рис. 4), применяемые в СПД материалы под воздействием катодной защиты должны изготавливаться согласно требованиям [8], учитывающим основные влияющие на HISC факторы, которые рассмотрены ниже.

Водород, образующийся на поверхности изделий под воздействием катодной защиты, способен проникать внутрь и накапливаться в структурных дефектах, таких как неметаллические и интерметаллидные включения, вторичные фазы. Чаще всего в дуплексных сталях встречается σ-фаза, образованная соединениями на основе Fe и Cr, обогащенных Mo, Si и W при температурах от 650 °C до 900 °C за счет эвтектического превращения ферритной фазы в σ-фазу и вторичный аустенит. Хрупкость σ-фазы негативно сказывается на прочности матрицы.

На чувствительность дуплексных сталей к HISC влияет различие в скоростях диффузии и растворимости водорода в ферритной и аустенитной фазе. Перенос водорода легче осуществляется через ферритную фазу и медленно протекает в аустените. Таким образом, меньшее расстояние между аустенитными зернами повышает устойчивость материала к HISC. Рекомендованное в [8] максимальное расстояние составляет 30 мкм. Поскольку добиться таких характеристик материала в кованых изделиях крайне сложно, наиболее ответственные детали, особенно подвергающиеся дополнительному напряжению из-за изменения потока транспортируемых сред (тройники, разветвители, переходы), а также другие элементы в случае экономической целесообразности изготавливаются методом ГИП.



а) a) б) b) в) c)

Рис. 5. Микроструктура стали UNS S32760 при увеличении [9]: а) ГИП; б) холоднокатаная труба; в) поковка
Fig. 5. UNS S32760 steel microstructure under magnification [9]: a) HIP; b) cold-rolled tube; c) forging

Полученные по технологии ГИП изделия обладают большей устойчивостью по сравнению с поковками из дуплексных сталей [7]. При этом среднее расстояние между аустенитными зернами в них составляет порядка 14 мкм, тогда как в кованых изделиях – 49 мкм (рис. 5).

РАЗРАБОТАННАЯ СХЕМА ПРОИЗВОДСТВА

Предложенная нами схема процесса производства изделий методом ГИП включает следующие этапы.

Плавление и распыление. Сплав заданного химического состава получают в вакуумной индукционной печи. Готовый расплав в среде защитного газа переливают в ковш и подают из нижней части ковша в колонну распыления – атомайзер, где образуются металлические порошки. Распыление сплава производят струями инертного газа, в результате чего он затвердевает в виде мелких (диаметром менее $5 \cdot 10^{-4}$ м) частиц многогранной формы с низким содержанием О. Полученный таким образом порошок рассеивают по фракциям и хранят в герметичных сосудах. Качество продукта можно повысить за счет дополнительной операции – обжига в инертной среде для удаления кислорода с поверхности частиц и придания им более приближенной к сферической формы.

В мировой практике известен другой способ получения металлического порошка – центробежное распыление. Использование данного метода при производстве оборудования для СПД нецелесообразно. Размер, процент брака и форма частиц, а также выход целевого продукта по отношению к затраченному времени отличаются от результатов распыления в атомайзере, что ведет к повышению цены порошка.

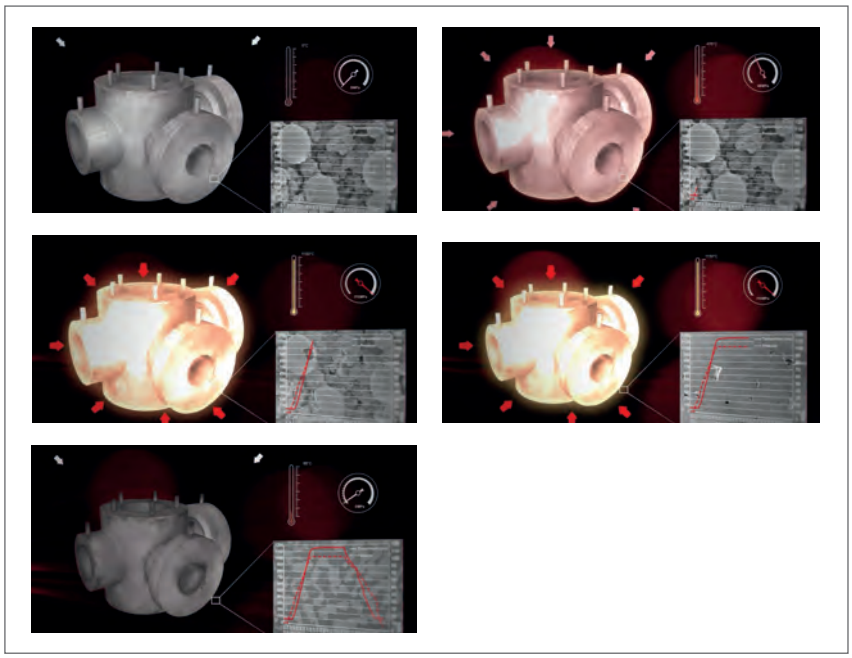


Рис. 6. Этапы ГИП: стоп-кадры из видео фирмы Bodycote [10]
Fig. 6. HIP stages: screenshots from Bodycote video [10]

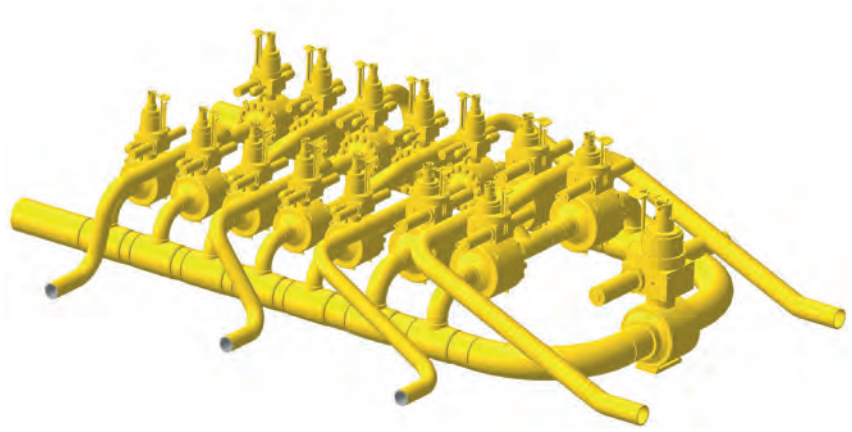


Рис. 7. Общий вид трубопроводной обвязки манифольда
Fig. 7. General appearance of manifold piping

Капсулирование и засыпка. Порошок засыпают в капсулы из низколегированной стали, которые изготавливают путем формовки и сварки листового проката. Капсулы проектируют с учетом предварительно рассчитанного режима спекания и размеров целевого изделия. Их изготавливают с минимальным припуском на последующую обработку, предполагающую удаление материала капсулы и пограничного слоя, в котором возможно образование неоднородности материала. Засыпку необходимо производить на вибростоле в вакуумной камере с постоянным контролем среды. После окончания засыпки капсулу заваривают и подготавливают к транспортировке на следующий этап.

Горячее изостатическое прессование. Капсулы помещают в изостатический пресс, где они подвергаются воздействию высокого давления (до 200 МПа) и температуры (до 1200 °С). Давление, температура и время прессования зависят от марки материала, размеров капсулы и возможностей оборудования, что в конечном итоге определяет режим спекания. Оптимизацию условий спекания проводят эмпирическим путем по пробным партиям с отслеживанием поведения материала и капсулы в установленном режиме. Важно поддерживать равномерность нагрева и плавное изменение давления в прессе, в связи с чем процесс занимает продолжительный период времени. Обычно на каждую новую конфигурацию изделия требуется не менее двух итераций. На рис. 6 представлены этапы ГИП с изменением микроструктуры изделия.

Термическая обработка. В зависимости от типа материала и области применения полученные изделия могут подвергаться разной термической обработке. Дуплексные стали проходят термообработку в режиме «аустенизация и закалка в воде».

Удаление капсулы. Материал капсул остается на изделии после ГИП и термообработки. Ее удаление производится методом кислотного травления, путем механической обработки или комбинацией этих операций. Качество поверхности и размеры после травления, как правило, соответствуют требованиям, определяемым условиями эксплуатации оборудования для СПД. Дополнительная обработка выполняется для получения конечных присоединительных размеров и кромок под сварку.

Контроль качества готового изделия включает ультразвуковой контроль, контроль качества поверхности, определение химического состава, механические испытания, микроструктурные исследования и коррозионные испытания.

Следует отметить, что производство одной детали занимает от 120 до 180 дней, при этом изменения в конструкцию могут быть внесены не позднее этапа проектирования капсулы, поскольку расчет ее параметров определяется предполагаемым режимом спекания.

ГРАСИС

Российская научно-производственная компания «Грасис» – ведущий производитель и EPC-подрядчик в области газоразделения в СНГ и Восточной Европе.

18 лет опыта производства

Более 1000 выполненных проектов

Выполнение программ импортозамещения



Блочные компрессорные станции

Применение

- сжатие углеводородных газов, азота, воздуха и др. для различных технологических нужд;
- обеспечение буферным природным газом СГДУ ГПА;
- подготовка барьерного воздуха для СГДУ ГПА;
- питание пневмоарматуры и приборов КИПиА;
- подключение пневмоинструмента, технический воздух.



Стационарные и передвижные азотные станции

Применение

- продувка азотом систем трубопроводов;
- испытание и ремонт технологического оборудования;
- наддув азота в технологические емкости («азотное дыхание»);
- подача азота на газодинамические уплотнения ГПА компрессорных станций;
- питание пневмоарматуры.



Установки подготовки природного и попутного нефтяного газа

Применение

- подготовка топливного газа;
- подготовка газа для сдачи в газотранспортную систему;
- осушка и отбензинивание газа, удаление серосодержащих соединений и CO_2;
- выделение гелиевого концентрата из природного газа.

НПК «Грасис»
Тел./факс: +7 (495) 777-77-34
E-mail: info@grasys.ru
www.grasys.ru

на правах рекламы

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗГОТОВЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В СПД можно выделить несколько групп оборудования (устьевое, система управления, система сбора газа, оборудование для ремонта и закачивания скважин), где в качестве ключевых компонентов рационально использовать изделия, полученные методом ГИП. Все компоненты СПД проектируются с учетом особенностей месторождения для каждого проекта. В качестве примера можно рассмотреть трубопроводную обвязку манифольда (рис. 7) системы сбора газа [11]. Параметры ее конструкции рассчитывают, исходя из особенностей химического состава пластового продукта, параметров давления, комбинаций нагрузок, влияющих на возникновение HISC, типоразмеров трубопроводов и других специфических требований. На основании исходных данных производят реинжиниринг трубопроводной обвязки за счет изменения компоновки и исполнения оборудования с помощью стандартных трубопроводных компонентов и решений. Однако ввиду уникальности трассировки и состава трубопроводной обвязки и ограничений, которые наложены на проектирование (время, размеры, нагрузки), стандартные решения не всегда целесообразны, выгодны и отвечают предъявляемым требованиям. В таких случаях возникает потребность в изготовленных методом ГИП изделиях уникальной конфигурации, устойчивых к HISC и с повышенными прочностными характеристиками.

Следует учитывать, что сложный многоэтапный процесс производства по технологии ГИП повышает стоимость продукта. Это трудоемкий и поэтапный процесс, который требует серьезной подготовки оборудования, наличия квалифицированных кадров и отработанной системы взаимодействия на всех этапах для контроля и своевременной коррекции процесса.

Существуют ограничения по максимальным размерам изделий: самый большой изостатический пресс находится в Японии и представляет собой цилиндр диаметром 2 м и высотой 4 м.

В настоящее время в ходе работ по освоению изготовления оборудования СПД ведется производство изделий методом ГИП. Уже завершен этап снятия капсулы, ведется подготовка образцов для испытаний с целью подтверждения механических свойств материала. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Chauveau E., Mantel M., Drab B., Chedal S. Cutting costs: improving your efficiency // Stainless steel world, 2006, P. 30–33 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.stainless-steel-world.net/pdf/ssw_metallurgy_lr. pdf (дата обращения: 02.09.2019).
2. Bain E.C., Griffiths W.E. An introduction to the Iron-Chromium-Nickel alloys // Trans. Am. Inst.Min. Metall. Eng., 1927, V. 75, P. 166–211.
3. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. М.: Металлургия, 1973. 583 с.
4. Schaeffler A.L. Constitution diagram for stainless steel weld metal // Met. Prog., 1949, V. 56, P. 680–688.
5. Компания-поставщик оборудования и изделий для подводной добычи Sandvik [Электронный ресурс]. Режим доступа: https:// www.materials.sandvik/en/products/hot-isostatic-pressed-hip-products/production-process/(дата обращения: 02.09.2019).
6. Oil and Gas corrosion [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://oilandgascorrosion.com/duplex-steels-why-is-everyone-so-picky/(дата обращения: 02.09.2019).
7. Bahrami A., Woolin P. Hydrogen induced stress cracking of duplex stainless steel subsea components // The book of abstracts of the 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2010). Shanghai, China: 2010 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings-abstract/OMAE2010/49149/13/349829 (дата обращения: 02.09.2019).
8. DNVGL-RP-F112. Duplex stainless steel – design against hydrogen induced stress cracking [Электронный ресурс]. Режим доступа: http:// rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RP/2018-06/DNVGL-RP-F112. pdf (дата обращения: 02.09.2019).
9. Компания-поставщик оборудования и изделий для подводной добычи Sandvik. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https:// www.materials.sandvik/en/products/hot-isostatic-pressed-hip-products/product-advantages/(дата обращения: 02.09.2019).
10. Bodycote [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=_mqDqdAkLL0 (дата обращения: 02.09.2019).
11. Крылов П.В., Шарохин В.Ю., Выдра А.А., Кудряшова Е.С. Опыт проектирования отечественной системы сбора газа в рамках реализации стратегии импортозамещения в области производства оборудования для систем подводной добычи углеводородов // Газовая промышленность. 2018. №1 (763). С. 12–18.

REFERENCES

(1) Chauveau E, Mantel M, Drab B, Chedal S. *Cutting costs: improving your efficiency*. Available from: http://www.stainless-steel-world.net/pdf/ssw_ metallurgy_lr.pdf [Accessed: 2nd September 2019].
(2) Bain EC, Griffiths WE. An introduction to the Iron-Chromium-Nickel alloys. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*. 1927; 75: 166–211.
(3) Utevskiy LM. *Diffraction Electron Microscopy in Metal Science*. Moscow: Metallurgiya; 1973. (In Russian)
(4) Schaeffler AL. Constitution diagram for stainless steel weld metal. *Metal Progress*. 1949; 56: 680–688.
(5) Sandvik AB. *Production process for hot isostatic pressing*. Available from: https://www.materials.sandvik/en/products/hot-isostatic-pressed-hip-products/production-process/ [Accessed: 2nd September 2019].
(6) Oil and Gas Corrosion Ltd. *Duplex and SuperDuplex Stainless Steels, why is everyone so picky? the answer is HISC*. Available from: https:// oilandgascorrosion.com/duplex-steels-why-is-everyone-so-picky/ [Accessed: 2nd September 2019].
(7) Bahrami A, Woolin P. Hydrogen induced stress cracking of duplex stainless steel subsea components. In: *The book of abstracts of the 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2010)*. Shanghai, China: ASME; 2010. Available from: https:// asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings-abstract/OMAE2010/49149/13/349829 [Accessed: 2nd September 2019].
(8) DNV GL. DNVGL-RP-F112. *Duplex stainless steel – design against hydrogen induced stress cracking*. Available from: http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/ DNVGL/RP/2018-06/DNVGL-RP-F112.pdf [Accessed: 2nd September 2019].
(9) Sandvik AB. *Advantages of HIP products*. Available from: https://www.materials.sandvik/en/products/hot-isostatic-pressed-hip-products/ product-advantages/ [Accessed: 2nd September 2019].
(10) Bodycote. *HIP product fabrication process*. Available from: https://www.youtube.com/watch?v=_mqDqdAkLL0 [Accessed: 2nd September 2019].
(11) Krylov PV, Sharokhin VYu, Vydra AA, Kudryashova YeS. Experience in designing a domestic gas gathering system as a part of the import substitution strategy in the field of equipment manufacturing for subsea hydrocarbon production systems. *Gas Industry = Gazovaya Promyshlennost'*. 2018; 763(1): 12–18. (In Russian)