ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ОТКАЗОВ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

RESEARCH OF THE CAUSES OF NICKEL ALLOY PIPELINE FAILURES UNDER EXPOSURE TO HIGH TEMPERATURES

В. В. Кравцов
Viktor V. Kravtsov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

А. С. Тюсенков
Anton S. Tyusenkov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Р. Г. Ризванов
Rif G. Rizvanov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

А. Ф. Летов
Alexander F. Letov

Всероссийский
научно-исследовательский
институт авиационных материалов,
г. Москва, Российская Федерация

Russian Scientific Research
Institute of Aviation Materials,
Moscow, Russian Federation

Р. М. Дворецков
Roman M. Dvoretzskov

Всероссийский
научно-исследовательский
институт авиационных материалов,
г. Москва, Российская Федерация

Russian Scientific Research
Institute of Aviation Materials,
Moscow, Russian Federation

Методами исследования микроструктуры и измерениями электродных потенциалов установлено, что продолжительное воздействие высоких температур на образцы никеля Nickel 201 ведет к возникновению на границах зерен пленки графита, что приводит к коррозионному растрескиванию межкристаллитного типа.

На разных участках внутренней поверхности труб наблюдается образование гальванических пар вследствие неоднородности их поверхности. При этом участки с более электроотрицательным потенциалом (сварные швы, деформированные поверхности отводов) выступают в роли анода, что приводит к их растворению. В отдельных случаях наблюдается сквозная коррозия по питтинговому механизму.

Измерения твердости подтвердили неоднородность свойств сварного соединения: значения твердости основного металла и сварного шва отличаются у нового соединения более чем на 4 единицы по шкале Роквелла. При эксплуатации трубопровода твердость сварного шва снижается, что повышает вероятность эрозии металла при высокой скорости потока, в котором кристаллы оксида никеля действуют на материал как абразивные частицы и, как следствие, приводит к утонению стенки трубопроводов.

Термическая обработка сварного соединения с последующим охлаждением на воздухе обеспечивает выравнивание твердости по всей поверхности образца, в то же время при охлаждении образцов вместе с печью в лабораторных условиях удалось получить более высокую твердость сварного шва.

После термической обработки разность потенциалов «сварной шов — основной металл» снижается, т.е. скорость коррозии сварного шва уменьшается.

Ключевые слова

никель; содержание углерода;
микроструктурный анализ;
твердость; электродные
потенциалы; газоанализатор;
эмиссионный вакуумный
спектрометр;
энергодисперсионный
рентгенфлуоресцентный
спектрометр; оптический
микроскоп; ультразвуковой
твердомер; сварной шов;
термическая обработка

It has been established by methods of studying the microstructure and measuring electrode potentials that prolonged exposure to high temperatures on nickel samples Nickel 201 leads to the appearance of a graphite film at the grain boundaries, which leads to intergranulartype stress corrosion cracking.

In different sections of the inner surface of the pipes, the formation of galvanic pairs is observed due to the inhomogeneity of their surface. In this case, areas with a more electronegative potential (welds, deformed surfaces of the bends) act as an anode, which leads to their dissolution. In some cases, pitting through corrosion is observed.

Hardness measurements confirmed the inhomogeneity of the properties of the welded joint: the hardness values of the base metal and the weld seam differ for the new joint by more than 4 units on the Rockwell scale. During pipeline operation, the hardness of the weld decreases, which increases the likelihood of metal erosion at high flow rates, in which nickel oxide crystals act on the material as abrasive particles and, as a consequence, to thinning of the pipeline wall.

Heat treatment of the welded joint, followed by cooling in air, ensures the leveling of hardness over the entire surface of the sample, while cooling the samples together with the furnace under laboratory conditions, it was possible to obtain a higher hardness of the weld.

After heat treatment, the potential difference «weld — base metal» decreases, i.e. the corrosion rate of the weld is reduced.

Введение

Развитие современной науки и технологии невозможно без реальных достижений в области материаловедения. При этом к материалам ужесточаются требования во всех отраслях промышленности [1–3]. Одним из условий успешной работы изделий разного назначения является стойкость конструкционных материалов к действию внешней среды и других факторов, обеспечивающая проектные сроки эксплуатации. К числу материалов, получающих в последние годы все большее распространение, следует отнести никель и сплавы на его основе, обладающие целым комплексом достоинств, особенно таких как жаро- и коррозионная стойкость [4–9].

Одной из важнейших стадий при промышленном получении товарного каустика является выпаривание его из полуфабриката — раствора едкого натра. Процесс ведется при высокой температуре, для обеспечения которого при аппаратурном оформлении применяется никель. В условиях промышленного производства на некоторых технологических позициях периодически наблюдаются преждевременные коррозионные отказы трубопроводов. Задачей исследования является установление причин этого явления и разработка предложений по их устранению.

Материалы и методика эксперимента

Содержание углерода в сплаве определяли с помощью спектрометра МСАП V5. Прибор предназначен для точного полного анализа химического состава черных и цветных сплавов и обеспечивает, с помощью персональ-

Keywords

nickel; carbon content; microstructural analysis; hardness; electrode potentials; gas analyzer; emission vacuum spectrometer; energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer; optical microscope; ultrasonic hardness tester; weld; heat treatment

ного компьютера, обработку результатов измерений и объективную регистрацию и передачу результатов анализа.

Пределы допускаемых относительных погрешностей выходного сигнала спектрометра в режиме измерения относительных интенсивностей в диапазоне массовых долей элементов свыше 0,010 % до 0,10 % не более 10 %.

Объемное содержание углерода в образцах никелевых сплавов определено с помощью газоанализатора CS-444 фирмы Лесо [10] методом сжигания в индукционной печи с последующим детектированием в инфракрасной ячейке.

Навеску пробы сплава сжигали в керамическом тигле, который предварительно подвергали нагреву при температуре $> 1000^{\circ}\text{C}$ в муфельной печи для уменьшения фонового сигнала от остаточного содержания углерода. Перед проведением анализа тигли помещали в эксикатор и вынимали только непосредственно перед помещением в прибор для максимального уменьшения времени нахождения тигля на открытом воздухе. В инфракрасной ячейке происходило формирование аналитического сигнала (пары оксида углерода попадали в ячейку, где в инфракрасной области спектра происходило поглощение части излучения, и далее рассчитывалась оптическая плотность, являющаяся аналитическим сигналом), прямо пропорционально зависящего от концентрации углерода в сплаве.

Химический состав отложений определяли с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра EDX-800HS.

Для регистрации квантов рентгеновского излучения в энергодисперсионном спектрометре EDX-800HS используется полупроводниковый детектор, охлаждаемый жидким азотом. В спектрометре использовали специальные фильтры, позволяющие увеличить соотношение сигнал/шум для отдельных элементов, и, соответственно, улучшить пределы обнаружения данных элементов.

Идентификация элементов и определение их содержания выполнялись на основе базы данных.

Для исследования микроструктуры из испытуемой детали вырезали образец и путем ряда операций (шлифования, полирования, травления) доводили до такого состояния, когда при рассмотрении его в металло-графический микроскоп можно было выявить вид микроструктуры, наличие неметаллических включений, мелких пор и т.п. Шлифование проводили на вращающемся шлифовальном круге, применяли шлифовальную бумагу следующих номеров: с 10-го до 65-го через десять номеров с убывающим размером зерна. При смене шлифовальной бумаги меняли направление шлифования на перпендикулярное, что уменьшало шероховатость поверхности образца. После шлифования на поверхности образца видны риски.

Полирование образцов проводили пастой. В качестве твердой фазы в состав пасты входил порошок Cr_2O_3 с размерами частиц 1–5 мкм. Полирование проводили механическим способом: на вращающийся круг, покрытый сукном, наносили полировочную пасту и полировали образец до «зеркального» блеска. Для травления образцов использовалась царская водка — смесь концентрированных азотной HNO_3 (65–68 % масс.) и соляной HCl (32–35 % масс.) кислот, взятых в соотношении 1 : 3 по объёму.

Микроструктурный анализ проводили с помощью оптического микроскопа Axio Scope A1.

Измерение электродных потенциалов выполняли в следующем порядке. Исследуемые образцы зачищали наждачной бумагой, обезжиривали ацетоном и закрепляли на подвижном столике установки.

Электрохимические измерения заключались в регистрации электродных потенциалов специальным электрохимическим щупом, состоящим из трубки со сменным наконечником определенного диаметра. Трубку заполняли

рабочим электролитом (насыщенным раствором KCl). Верхний конец трубки соединен с помощью капилляра Луггина с хлорсеребряным электродом сравнения (ХСЭ) типа ЭВЛ-1МЗ. Значение электродного потенциала регистрировали высокоомным вольтметром.

Передвигая столик, подводили измеряемый участок сварного соединения под электрохимический щуп. Винтом устройства вертикального перемещения щупа опускали его до соприкосновения с образцом. После минутной выдержки фиксировали значение электродного потенциала.

Твердость определяли электронным способом посредством измерения изменения ультразвуковой частоты.

UCI-датчик в основе своей использует стальной стержень с алмазной пирамидой Виккерса (угол между гранями 136°), который является акустическим резонатором встроенного генератора ультразвуковой частоты. При внедрении пирамиды в контролируемое изделие под действием фиксированного усилия калиброванной пружины происходит изменение собственной частоты резонатора, определяемое твердостью материала. Относительное изменение частоты резонатора преобразуется электронным блоком в значение твердости выбранной шкалы и выводится на дисплей.

Измерение твердости образцов никелевого сплава выполняли по шкале HRC.

Для выполнения измерения устанавливали датчик нижней плоскостью насадки к зоне измерения образца. Прижимали насадку к зоне измерения и удерживали её неподвижной в процессе измерения. Лёгким усилием нажимали на корпус датчика до первого сопротивления — алмазная пирамида стержня упиралась в поверхность. Сразу увеличивали усилие до второго сопротивления (упора) — алмазная пирамида внедрялась в поверхность. Удерживали постоянное усилие на корпус датчика в течение 3–4 с. После звукового сигнала и появления значения твердости на дисплее электронного блока прекращали усилие на корпус датчика. Для снижения погрешности измерений замеры твердости для каждого участка проводили 5 раз.

Результаты исследований и их обсуждение

Содержание углерода в исследуемых образцах, определенное на энергодисперсионном рентгенфлуоресцентном спектрометре EDX-800HS, — 0,438 % масс.

Содержание углерода в образцах из трубы, бывшей в эксплуатации, измеренное с помощью газоанализатора CS-600 фирмы Лесо, составило 0,11–0,59 % масс. (среднее значение 0,32 % масс.).

Таким образом, в исследуемых образцах обнаружено повышенное содержание угле-

Таблица 1. Результаты анализа химического состава отложений

№	Соединение	Массовая доля, %		
		1 измерение	2 измерение	Среднее значение
1	NiO	99,588	99,870	99,729
2	Fe ₂ O ₃	0,412	0,130	0,271

на внутренней поверхности трубопроводов каустика при контакте никелевого сплава с едким натром и уносится потоком.

Оксид никеля β -NiO, образующийся при температуре выше 252 °С, имеет твердость выше, чем у никеля. В связи с этим при значительной скорости потока кристаллы оксида никеля действуют на сплав как абразивные

рода, что существенно повышает склонность никелевых конструкций к коррозии.

Результаты анализа химического состава отложений в трубопроводе каустика представлены в таблице 1.

Таким образом, отложения состоят в основном из оксида никеля, который образуется

частицы, что приводит к эрозии и, как следствие, утонению стенки трубопроводов каустика.

Микроструктура

На рисунке 1 представлены фотографии микроструктур исследуемых образцов.

Из рисунка 1 видно, что в процессе эксплуатации никелевого сплава его зерна укруп-

а)

б)

Рисунок 1. Фотографии микроструктур исследуемых образцов после эксплуатации (а); после термической обработки и охлаждения в печи (б)

няются. Проведение отжига приводит к рекристаллизации, в результате которой образуются зерна большего размера.

Вредной примесью в никелевых сплавах является сера, вызывающая красноломкость. Сера образует соединение Ni_3S_2 , которое вместе с никелем дает легкоплавкую эвтектику ($Ni + Ni_3S_2$), плавящуюся при 644 °С. Эвтектика появляется при весьма незначительном содержании серы, т.к. сульфид Ni_3S_2 практически нерастворим в твердом никеле [11, 12]. Эта эвтектика, выделяясь по границам зерен, делает никель хрупким.

Вероятно, пластичность никеля была восстановлена при десульфурации его магнием, который при введении в жидкий никель, связывает серу в тугоплавкое химическое соеди-

нение MgS . Обладая высокой температурой плавления, сульфиды магния выделяются в первую очередь из расплава при затвердевании и являются центрами кристаллизации [13, 14]. Поэтому в твердом никеле включения сульфида магния располагаются внутри зерен. Десульфированный магнием никель имеет мелкозернистую структуру и двойники. Данная структура наблюдается на новом образце.

Результаты замера потенциалов в сварном соединении (аналогично [15]) со сквозным разрушением представлены в таблице 2 и на рисунке 2.

Из анализа графика на рисунке 2 видно, что в сварном шве происходит резкий скачок потенциала в анодную область до –0,37 В.

Рисунок 2. Результаты замера потенциалов в сварном соединении со сквозным разрушением

Таблица 2. Электродные потенциалы образца сварного соединения со сквозным разрушением

Точка замера	1	2	3	4	5 (СШ)	6 (СШ)	7 (СШ)	8	9	10
Электродный потенциал, мВ	-0,12	-0,18	-0,12	-0,16	-0,18	-0,37	-0,24	-0,15	-0,40	-0,15

Примечание: СШ — сварной шов.

Также обнаружен участок зоны термического влияния, на котором электродный потенциал более электроотрицателен, чем потенциал основного металла (точка № 9).

Отвод со сквозным разрушением

Результаты замера потенциалов в поперечном сечении отвода со сквозным разрушением в области сжатия представлены в таблице 3 и на рисунке 3.

Результаты замера потенциалов в поперечном сечении отвода со сквозным разрушением в области растяжения представлены в таблице 4 и на рисунке 4.

На участке сквозного разрушения отвода электродный потенциал поверхности составил $-0,21$ В.

Таблица 3. Электродные потенциалы в поперечном сечении отвода со сквозным разрушением в области сжатия

Точка замера	1(СШ)	2	3	4	5(СШ)
Электродный потенциал, мВ	-0,18	-0,17	-0,14	-0,12	-0,12

Примечание: СШ — сварной шов.

Анализ результатов измерений позволяет сделать вывод о неоднородности потенциалов по сечению отвода. Отметим наличие не только гальванической пары «сварной шов — основной металл», но и пары «сварной шов — сварной шов» (точка 5 на рисунке 3 и точка 9 на рисунке 4) с разностью потенциалов $0,13$ В, что свидетельствует о неоднородности сварного шва.

Образцы нового сварного шва

Для определения возможности устранения неблагоприятного с точки зрения коррозии распределения электродных потенциалов в сварных соединениях были проведены исследования, связанные с их термической обработкой. В ходе работ образцы новых сварных

Рисунок 3. Результаты замера потенциалов в сварном соединении со сквозным разрушением в области сжатия

Рисунок 4. Результаты замера потенциалов в сварном соединении со сквозным разрушением в области растяжения

Таблица 4. Электродные потенциалы в поперечном сечении отвода со сквозным разрушением в области растяжения

Точка замера	1(СШ)	2	3	4	5	6	7	8	9(СШ)
Электродный потенциал, мВ	-0,18	-0,18	-0,19	-0,19	-0,17	-0,14	-0,15	-0,15	-0,25

Примечание: СШ — сварной шов.

соединений, не подвергавшиеся эксплуатации, нагревались в муфельной печи до температуры 900 °С, выдерживались на протяжении 1 ч и охлаждались медленно (вместе с печью) и со средней скоростью (на воздухе).

После проведения термической обработки проводили измерение электродных потенциалов. Результаты измерений представлены на рисунках 5 и 6. Центр сварного шва соответствует точке 4 на всех графиках.

На участке сквозного разрушения отвода электродный потенциал поверхности составил –0,21 В.

Анализ результатов измерений позволяет сделать вывод о неоднородности потенциалов по сечению отвода. Отметим наличие не только гальванической пары «сварной шов — основной металл», но и пары «сварной

шов — сварной шов» (точка 5 на рисунке 3 и точка 9 на рисунке 4) с разностью потенциалов 0,13 В, что свидетельствует о неоднородности сварного шва.

Образцы нового сварного шва

Для определения возможности устранения неблагоприятного с точки зрения коррозии распределения электродных потенциалов в сварных соединениях были проведены исследования, связанные с их термической обработкой. В ходе работ образцы новых сварных соединений, не подвергавшиеся эксплуатации, нагревались в муфельной печи до температуры 900 °С, выдерживались на протяжении 1 ч и охлаждались медленно (вместе с печью) и со средней скоростью (на воздухе).

После проведения термической обработки проводили измерение электродных потенциа-

Рисунок 5. Электродные потенциалы образца никелевого сплава до и после термической обработки с охлаждением вместе с печью

Рисунок 6. Электродные потенциалы образца никелевого сплава до и после термической обработки с охлаждением на воздухе

лов. Результаты измерений представлены на рисунках 5 и 6. Центр сварного шва соответствует точке 4 на всех графиках.

Измерение неравновесных потенциалов в среде горячего NaOH показало смещение значений в отрицательную область, при этом зна-

чения потенциалов основного металла и сварного шва составили $-0,84$ В и $-0,88$ В соответственно.

Твердость образцов

Результаты измерения твердости образцов из никелевого сплава представлены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты измерения твердости

Образец	Основной металл	Сварной шов
Сварное соединение со сквозным разрушением	25,5	22,5
	24,0	23,3
	24,8	21,1
	25,4	20,8
	24,6	22,8
Среднее значение	24,9	22,1
Сварное соединение после термической обработки с охлаждением на воздухе	22,1	23,4
	21,8	22,7
	23,1	23,1
	21,3	21,6
	24,2	22,3
Среднее значение	22,5	22,6
Сварное соединение после термической обработки с охлаждением вместе с печью	22,1	24,5
	21,6	24,1
	20,3	25,2
	23,4	26,6
	21,8	25,5
Среднее значение	21,8	25,2
Новое сварное соединение	20,5	23,4
	19,4	25,7
	20,1	24,1
	19,8	25,2
	20,9	24,4
Среднее значение	20,1	24,6

Данные таблицы 5 подтверждают неоднородность свойств сварного соединения, выявленную ранее: значения твердости основного металла и сварного шва отличаются у нового соединения более чем на 4 единицы по шкале Роквелла. При эксплуатации трубопровода твердость сварного шва снижается, что повышает вероятность эрозии металла. Установлено, что термическая обработка сварного соединения с последующим охлаждением на воздухе обеспечивает выравнивание твердости по всей поверхности образца, в то же время при охлаждении вместе с печью удастся обеспечить максимальную твердость сварного шва.

Выводы

1. Во всех исследуемых образцах никеля обнаружено повышенное содержание углерода ($0,11-0,480\%$), что существенно снижает устойчивость никеля к коррозии. Продолжительное воздействие высоких температур приводит к возникновению на грани-

цах зерен пленки графита. Эта пленка делает материал склонным к коррозионному растрескиванию межкристаллитного типа. Скоростной поток каустика, содержащего абразивные частицы, уносит ослабленные граничные слои металла. Происходит утонение стенки, и при последующем обследовании поверхность выглядит как в случае сплошной коррозии, и межкристаллитная коррозия не обнаруживается.

Можно предположить, что преобладает коррозия никелевых конструкций при пусках — остановках технологического процесса, снижении температуры и разгерметизации системы. В такой ситуации полезно предусмотреть продувку инертным газом.

2. На разных участках внутренней поверхности труб наблюдается образование гальванических пар вследствие неоднородности их поверхности. При этом участки с более электроотрицательным потенциалом (сварные швы, деформированные поверхности отво-

дов) выступают в роли анода, что приводит к их растворению. В отдельных случаях наблюдается сквозная коррозия по питтинговому механизму («свищи»).

3. Отложения в трубопроводе каустика состоят в основном из оксида никеля (II). Оксид никеля β -NiO, образующийся при температуре выше 252 °С, более плотный и имеет твердость выше, чем у сплава Nickel 201. Измерения твердости подтвердили неоднородность свойств сварного соединения: значения твердости основного металла и сварного шва отличаются у нового соединения более чем на 4 единицы по шкале Роквелла. При эксплуатации трубопровода твердость сварного шва снижается, что повышает вероятность эрозии металла. В связи с этим при значительной скорости потока кристаллы оксида никеля действуют на сплав как абразивные частицы и, как следствие, приводят к утонению стенки трубопроводов.

Отжиг сварных швов может проводиться после сварки при температуре от 550 °С до 650 °С со временем выдержки от 30 мин до 3 ч.

4. Термическая обработка сварного соединения с последующим охлаждением на воз-

духе обеспечивает выравнивание твердости по всей поверхности образца, в то же время при охлаждении вместе с печью в лабораторных условиях удалось получить более высокую твердость сварного шва.

5. Исследования, связанные с термической обработкой сварных швов, позволяют сделать вывод о благоприятном воздействии нагрева на перераспределение электродных потенциалов. Установлено, что после термической обработки разность потенциалов «сварной шов — основной металл» снижается, т.е. скорость коррозии сварного шва уменьшается.

6. Максимально сокращать количество и продолжительность «простоев» оборудования в разгерметизированном состоянии. Пуски — остановки оборудования способствуют появлению циклических напряжений и коррозионному растрескиванию, в нашем случае — коррозионному растрескиванию межкристаллитного типа. Сварные соединения, выполняемые при ремонте или реконструкции, подвергать отжигу при температуре 550–650 °С в течение 0,5–3 ч (в зависимости от массы свариваемой конструкции).

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kulakov P., Rubtsov A., Afanasenko V., Gracheva V., Technical Condition Parameters Affecting the Period of Safe Operation of Technological Pipelines // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224. Article Number 02090. DOI: 10.1051/mateconf/201822402090.

2. Свистунова Т.В. Коррозионностойкие сплавы на основе никеля // Металловедение и термическая обработка металлов. 1980. № 7. С. 24–29.

3. Латыпова Д.Р., Бугай Д.Е., Латыпов О.Р., Рябухина В.Н. Исследование коррозии контактной пары сталей 09Г2С/12Х18Н10Т в технологических средах колонного оборудования // Нефтегазовое дело. 2020. Т. 18. № 6. С. 122–129. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-6-122-129.

4. ГОСТ 849-2008. Никель первичный. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2011. 10 с.

5. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 36–52.

6. Nasibullina O.A., Tyusenkov A.S. Electronic and Microscopic Researches of Dislocation Structure of Metal Near Crack Top // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537. Issue 2. Article Number 022023. DOI: 10.1088/1757-899X/537/2/022023.

7. Семенчев В.В., Смирнова Т.Б. Оценка коррозионной стойкости защитных и функциональных покрытий с помощью измерителя скорости коррозии // Труды ВИАМ. 2016. № 6. С. 109–114. URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/976>.

pdf (дата обращения: 04.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-12-12.

8. Шеин Е.А. Тенденции в области легирования и микролегирования жаропрочных монокристаллических сплавов на основе никеля (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 3. С. 10–22. URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/930.pdf> (дата обращения: 04.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-2-2.

9. Кулаков П.А., Рубцов А.В., Афанасенко В.Г., Зубкова О.Е., Иванова К.К., Шарипова Р.Р. Выбор определяющих параметров технического состояния, оказывающих влияние на остаточный срок службы теплообменного оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 1. С. 97–105. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2451.

10. Алексеев А.В., Растегаева Г.Ю., Пахомкина Т.Н. Опыт определения углерода, серы, кислорода и азота в сплавах на основе ниобия на газоанализаторах фирмы Leco // Труды ВИАМ. 2018. № 1. С. 24–30. URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1198.pdf> (дата обращения: 05.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-3-3.

11. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

12. Каблов Е.Н., Чабина Е.Б., Морозов Г.А., Муравская Н.П. Оценка соответствия новых материалов

с использованием СО и МИ высокого уровня // Компетентность. 2017. № 2 (143). С. 40–46.

13. Медведев И.М., Никитин Я.Ю., Пузанов А.И., Лаптев А.Б. Методы испытаний жаропрочных сплавов на стойкость к сульфидно-окисной коррозии (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 11. С. 93–100. URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1337.pdf> (дата обращения: 05.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-93-100.

14. Гецов Л.Б., Лаптев А.Б., Пузанов А.И., Шеляпина Н.М. Сульфидно-окисная коррозия современных жаропрочных сплавов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2019. № 4. С. 150–155.

15. Лаптев А.Б., Курс М.Г., Лукина Е.А., Коган А.М. Исследование особенностей коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях // Коррозия: материалы, защита. 2020. № 1. С. 35–45. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-1-35-45.

REFERENCES

1. Kulakov P., Rubtsov A., Afanasenko V., Gracheva V., Technical Condition Parameters Affecting the Period of Safe Operation of Technological Pipelines. *MATEC Web of Conferences*, 2018, Vol. 224, Article Number 02090. DOI: 10.1051/mateconf/201822402090.

2. Svistunova T.V. Korroziionnostoikie splavy na osnove nikelya [Corrosion Resistant Nickel Base Alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov — Metal Science and Heat Treatment*, 1980, No. 7, pp. 24–29. [in Russian].

3. Latypova D.R., Bugai D.E., Latypov O.R., Ryabukhina V.N. Issledovanie korrozii kontaktnoi pary staley 09G2S/12Kh18Ni10T v tekhnologicheskikh sredakh kolonnogo oborudovaniya [Study of the Corrosion of Contact Steel Vapors 09MN2Si/12CR18Ni10Ti in the Process Media of the Column Equipment]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2020, Vol. 18, No. 6, pp. 122–129. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-6-122-129. [in Russian].

4. GOST 849-2008. *Nikel' pervichnyi. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 849-2008. Primary Nickel. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 10 p. [in Russian].

5. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye liteinye zharoprochnye splavy novogo pokoleniya [Ni-Base Casting Superalloy of the New Generation]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviacionnye Materialy and Tehnologii*, 2012, No. 5, pp. 36–52. [in Russian].

6. Nasibullina O.A., Tyusenkov A.S. Electronic and Microscopic Researches of Dislocation Structure of Metal Near Crack Top. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 537, Issue 2, Article Number 022023. DOI: 10.1088/1757-899X/537/2/022023.

7. Semenychev V.V., Smirnova T.B. Otsenka korroziionnoi stoikosti zashchitnykh i funktsional'nykh pokrytii s pomoshch'yu izmeritelya skorosti korrozii [The Evaluation of Corrosion Resistance of Protective and Functional Coatings Using Corrosion-Ratometer]. *Trudy VIAM — Proceedings of VIAM*, 2016, No. 6, pp. 109–114.

URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/976.pdf> (accessed 04.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-12-12. [in Russian].

8. Shein E.A. Tendentsii v oblasti legirovaniya i mikrolegirovaniya zharoprochnykh monokristallicheskikh splavov na osnove nikelya (obzor) [Trends in Alloying and Microalloying of Nickel-Based Single Crystal Superalloys (Review)]. *Trudy VIAM — Proceedings of VIAM*, 2016, No. 3, pp. 10–22. URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/930.pdf> (accessed 04.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-2-2. [in Russian].

9. Kulakov P.A., Rubtsov A.V., Afanasenko V.G., Zubkova O.E., Ivanova K.K., Sharipova R.R. Vybore opredelyayushchikh parametrov tekhnicheskogo sostoyaniya, okazyvayushchikh vliyaniye na ostatochnyyi srok sluzhby teploobmennogo oborudovaniya [Selection of Determining Parameters of Technical Condition Affecting the Residual Life of the Heat Exchanging Equipment]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, Vol. 331, No. 1, pp. 97–105. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2451. [in Russian].

10. Alekseev A.V., Rastegaeva G.Yu., Pakhomkina T.N. Opyt opredeleniya ugleroda, sery, kisloroda i azota v splavakh na osnove niobiya na gazoanalizatorakh firmy Leco [Experience of the Determination of Carbon, Sulfur, Oxygen and Nitrogen in Alloys Based on Niobium on the Gas-Analyzers of the Leco Firm]. *Trudy VIAM — Proceedings of VIAM*, 2018, No. 1, pp. 24–30. URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1198.pdf> (accessed 05.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-3-3. [in Russian].

11. Kablov E.N. Innovatsionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNTs RF po realizatsii «Strategicheskikh napravlenii razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative Developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on Realization of «Strategic Directions of the Development of Materials and Technologies of Their Processing for the Period until 2030»]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviacionnye Materialy and Tehnologii*, 2015, No. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33. [in Russian].

12. Kablov E.N., Chabina E.B., Morozov G.A., Muravskaya N.P. Otsenka sootvetstviya novykh materialov s ispol'zovaniem SO i MI vysokogo urovnya [Conformity Assessment of New Materials Using High-Level CRM and MI]. *Kompetentnost' — Competency (Russia)*, 2017, No. 2 (143), pp. 40–46. [in Russian].

13. Medvedev I.M., Nikitin Ya.Yu., Puzanov A.I., Laptev A.B. Metody ispytaniy zharoprochnykh splavov na stoikost' k sul'fidno-oksidnoi korrozii (obzor) [Hot Corrosion Testing Methods for High-Temperature Alloys (Review)]. *Trudy VIAM — Proceedings of VIAM*, 2018, No. 11, pp. 93–100. URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1337.pdf> (accessed 05.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-93-100. [in Russian].

14. Getsov L.B., Laptev A.B., Puzanov A.I., Shelyapina N.M. Sul'fidno-oksidnaya korroziya sovremennykh zharoprochnykh splavov [Sulfide Oxide Corrosion of Modern Heat-Resistant Alloys]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika — Izvestiya*

Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Aviatsionnaya Tekhnika, 2019, No. 4, pp. 150–155. [in Russian].

15. Laptev A.B., Kurs M.G., Lukina E.A., Kogan A.M. Issledovanie osobennostei korrozionnogo razrusheniya deformiruemyykh alyuminievykh splavov pri naturno-

uskorennykh ispytaniyakh [Peculiarity Study of Corrosion Damage of Wrought Aluminum Alloys in Full-Scale Accelerated Tests]. *Korroziya: materialy, zashchita — Korroziya: Materialy, Zashchita*, 2020, No. 1, pp. 35–45. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-1-35-45. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Кравцов Виктор Васильевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Материаловедение и защита от коррозии», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Viktor V. Kravtsov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Materials and Corrosion Protection Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: korrkvv@gmail.com

Тюсенов Антон Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Материаловедение и защита от коррозии», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Anton S. Tyusenkov, Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor, Assistant Professor of Materials and Corrosion Protection Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: anton.tyusenkov@yandex.ru

Ризванов Риф Гарифович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Технологии материалов нефтегазового машиностроения», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Rif G. Rizvanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Materials Technologies for Oil and Gas Machine Building Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: rifriz@mail.ru

Летов Александр Фёдорович, канд. хим. наук, заместитель начальника лаборатории спектральных, химико-аналитических исследований и эталонных образцов, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, г. Москва, Российская Федерация

Alexander F. Letov, Candidate of Chemical Sciences, Deputy Head of the Laboratory for Spectral, Chemical-Analytical Research and Reference Samples, Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Moscow, Russian Federation

e-mail: letov_af@viam.ru

Дворецков Роман Михайлович, канд. хим. наук, начальник сектора, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, г. Москва, Российская Федерация

Roman M. Dvoretskov, Candidate of Chemical Sciences, Head of Sector, Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Moscow, Russian Federation

e-mail: dvoreckov_rm@viam.ru