ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОПЛАМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ В ПРИСУТСТВИИ КОРРОЗИОННО-АКТИВНЫХ СРЕД

Докладчик:

Крюков Никита Алексеевич

Инженер ООО «ИТ-Сервис»,
Аспирант ФГБОУ ВО «СамГТУ»



ВВЕДЕНИЕ

- Применение металлизационных покрытий является простым и экономичным способом защиты оборудования от агрессивных факторов.





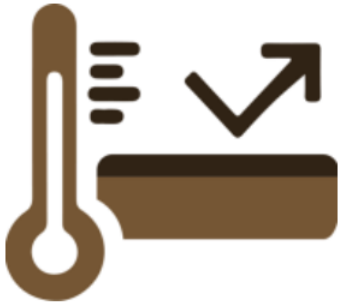
ВИДЫ ПОКРЫТИЙ



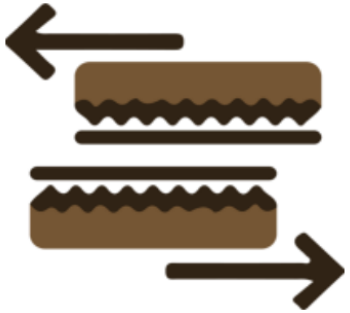
Износостойкие.
Применяются для защиты детали от разного вида абразивного износа - WC-10Co-4Cr.



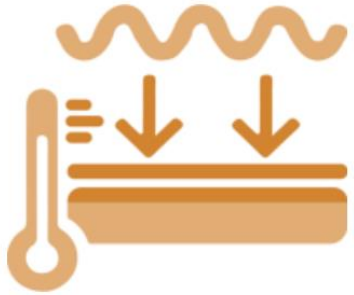
Коррозионностойкие.
Широко применяются для защиты деталей от атмосферной коррозии и агрессивных сред – Zn, нержавеющие стали типа 12Х18Н10Т, St316T, карбамидные стали типа Х23Н28М3, сплавы хастеллой, монель-металл.



Жаростойкие.
Применяются для увеличения срока службы детали при температуре свыше 1000°С -NiCrAlY



Антифрикционные.
Применяются в трибопарах для снижения коэффициента трения – Баббит, бронза (БрАМц 9-2, БрКМц 3-1)



Термобарьерные.
Применяется для изолирования деталей, работающих при повышенных температурах – Оксид циркония ZrO2Y (YSZ), алюминия, вольфрама, никелевые сплавы.



Восстановительные.
Легированная сталь, углеродистая сталь.

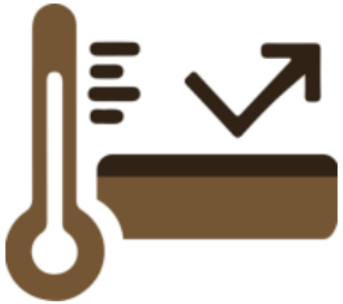
ВИДЫ ПОКРЫТИЙ



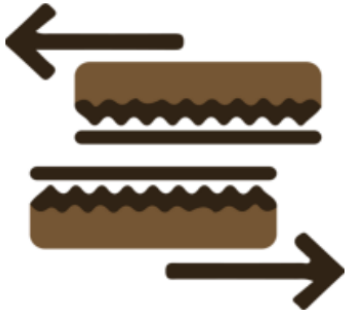
Износостойкие.
Применяются для защиты детали от разного вида абразивного износа - WC-10Co-4Cr.



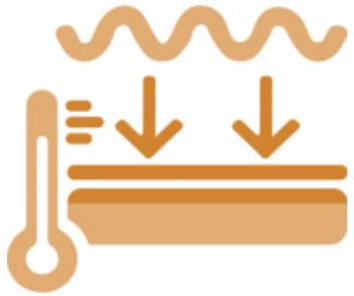
Коррозионностойкие.
Широко применяются для защиты деталей от атмосферной коррозии и агрессивных сред – Zn, нержавеющие стали типа 12Х18Н10Т, St316T, карбамидные стали типа Х23Н28М3, сплавы хастеллой, монель-металл.



Жаростойкие.
Применяются для увеличения срока службы детали при температуре свыше 1000°С -NiCrAlY



Антифрикционные.
Применяются в трибопарах для снижения коэффициента трения – Баббит, бронза (БрАМц 9-2, БрКМц 3-1)



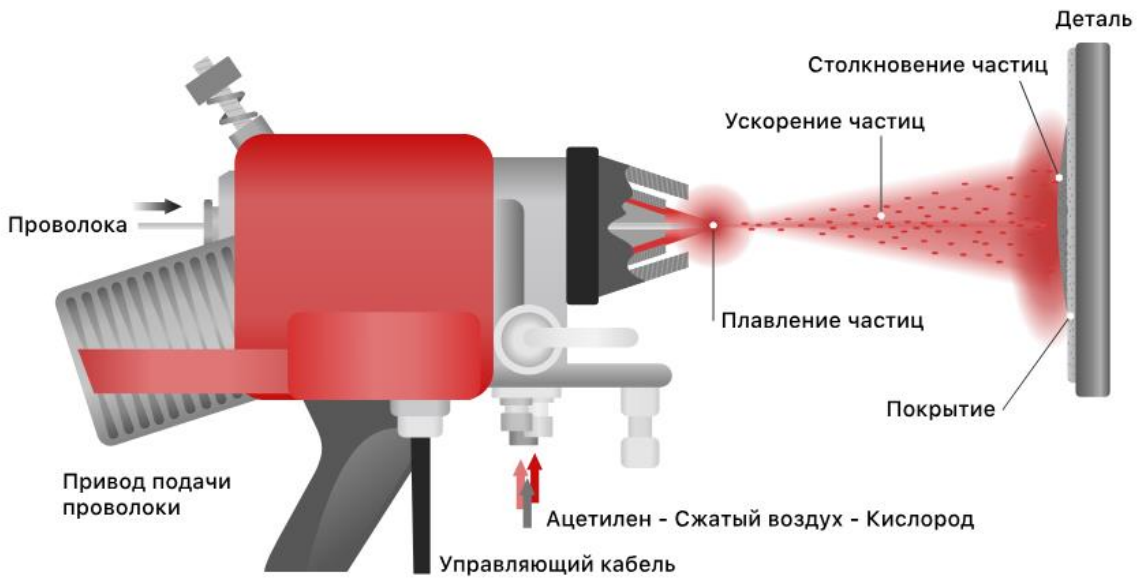
Термобарьерные.
Применяется для изолирования деталей, работающих при повышенных температурах – Оксид циркония ZrO2Y (YSZ), алюминия, вольфрама, никелевые сплавы.



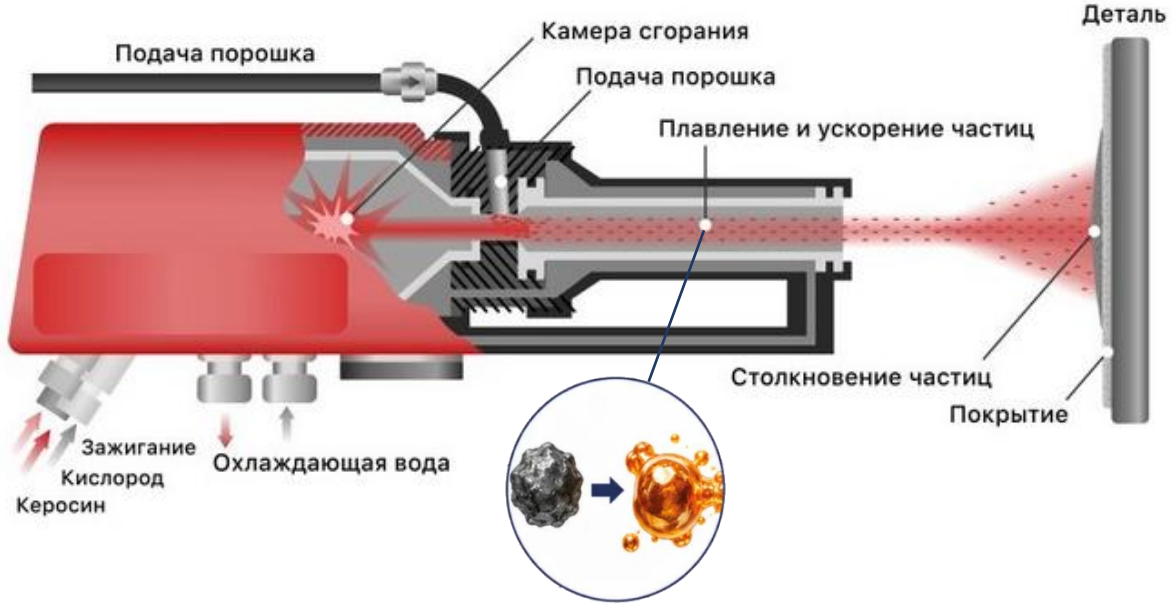
Восстановительные.
Легированная сталь, углеродистая сталь.

СХЕМА ПРОЦЕССА

- В основу технологии газотермического напыления положен принцип переноса частиц напыляемого материала, нагретых теплоносителем до расплавленного состояния на поверхность изделий, с целью придания им особых свойств.



Электродуговая металлизация



Высокоскоростное кислородно-топливное напыление (HVOF)

ПРЕИМУЩЕСТВА МЕТОДА

- ✓ **Широкий выбор материалов** – металлы, сплавы, керамика, карбиды и композиты;
- ✓ **Работа с крупногабаритными и сложными объектами**;
- ✓ **Альтернатива другим методам** – гальванические покрытия, ХТО, полимеры;
- ✓ **Возможность восстановления деталей;**
- ✓ **Относительно низкий нагрев основы до 200°С** - структура и геометрия детали сохраняются, нет риска коробления или нежелательных фазовых превращений в металле.



Преимущества высокой скорости частиц

- ✓ Интенсивное сплющивание частиц при ударе
- ✓ Лучшее механическое сцепление с поверхностью
- ✓ Более плотное и прочное покрытие



НЕДОСТАТКИ МЕТОДА

- К числу наиболее существенных недостатков применяемых покрытий относятся: недостаточная стойкость к ударным механическим воздействиям, недостаточная стойкость к абразивному износу, значительная пористость покрытий.



НЕБЛАГОПРИЯТНЫЕ УСЛОВИЯ ПОРАЖДАЮЩИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПОРИСТОСТИ

1. Частичное неполное расплавление частиц;
2. Недостаточная скорость потока;
3. Параметры распыления;
4. Свойства исходных материалов.

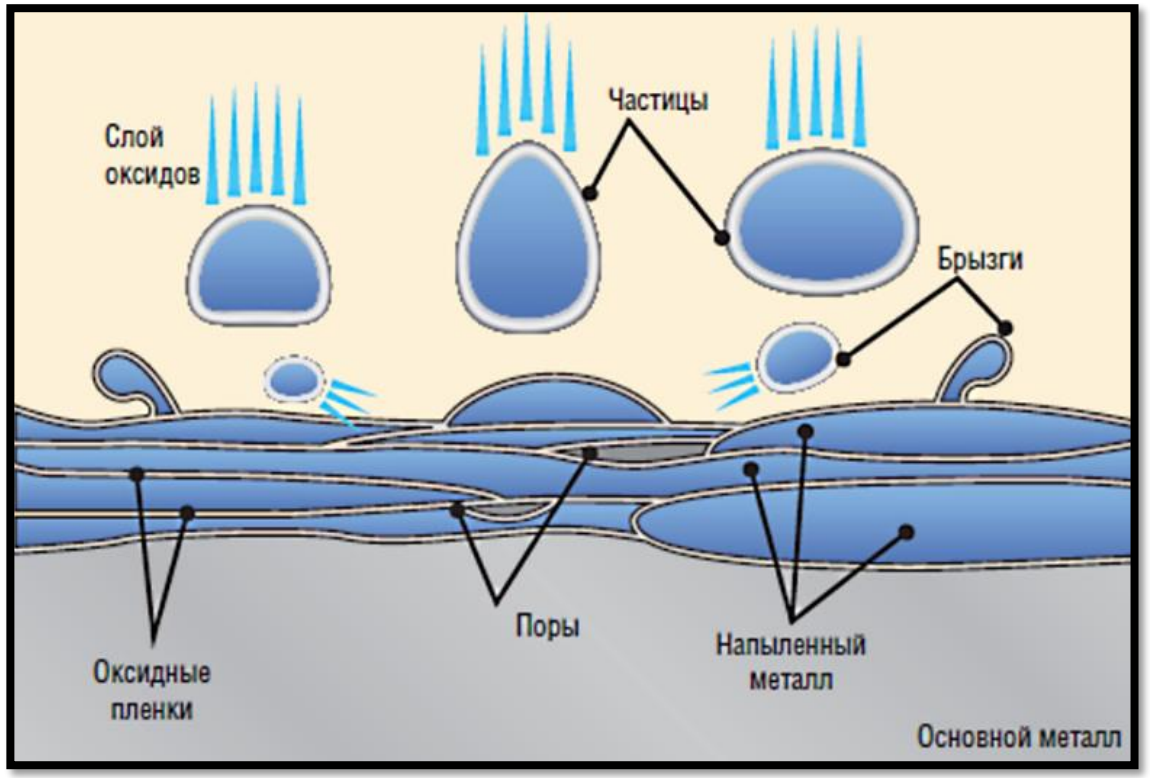


Схема газотермического напыления

ТРЕБОВАНИЯ К МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫМ ПОКРЫТИЯМ

- ГОСТ 28844-90 – Покрытия газотермические упрочняющие и восстанавливающие. общие требования;
- ГОСТ 9.304-87 – Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия газотермические. Общие требования и методы контроля.
- ISO 12679:2011 – Газотермическое напыление. Рекомендации

Методы испытания:



ASTM C633 – Стандартный метод испытаний на прочность сцепления термоплазменных покрытий;
ASTM G111 97 – Стандартное руководство по испытаниям на коррозию в условиях высокой температуры, высокого давления или обоих этих факторов;
ASTM E2109 – Стандартные методы испытаний для определения пористости в процентах по площади в термонапыленных покрытиях.

Разрушение металлизоционного покрытия



Кожухотрубный теплообменник 30-3414-E-401B

- Нанесение покрытия Сентябрь 2023 г.
- Обнаружение дефектов Май 2025 г.
- Способ напыления HVOF



Выходной оголовок



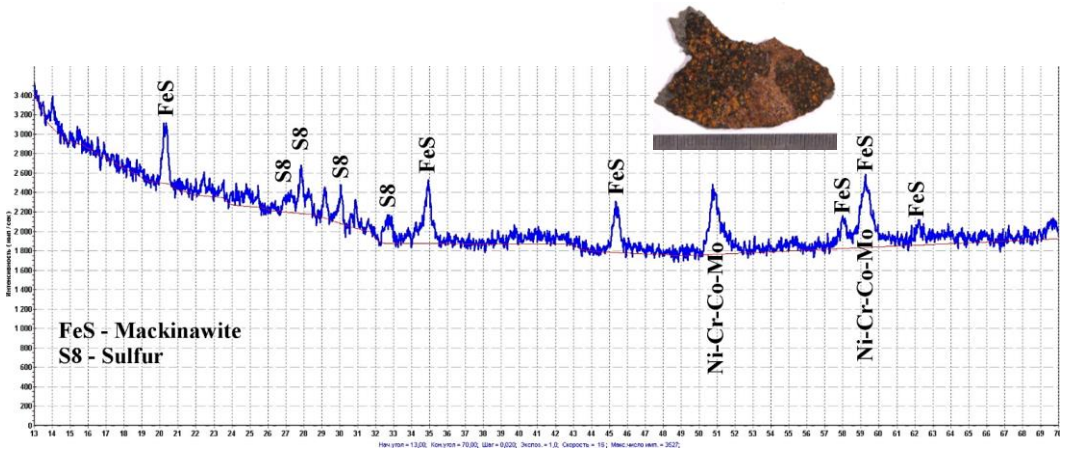
Поверхность контактировавшая со средой

Сторона основного металла покрытия

Фрагмент покрытия

Разрушение металлизоционного покрытия

- [x] Состав защитного слоя соответствует заявленному Hastelloy C-276;
- [ ] Выявлено высокое содержание кислорода – 4,9 %;
- [x] Отложения на границе раздела покрытие/основа представлены FeS и S8;
- [x] Отложения на покрытии, контактировавшем со средой и отложения, образовавшиеся на границе покрытие/основной металл содержат кислород и серу в одинаковом количестве;
- [x] Покрытие по толщине равномерное 1-1,2 мм;
- [ ] Толщина прослоек составляет в среднем 3,7 - 4,5 мкм. Соотношение средней толщины прослоек к ширине >1:5 ;
- [ ] Пористость покрытия составляет ~7%;
- [x] В процессе эксплуатации произошло образование трещин на всю толщину покрытия

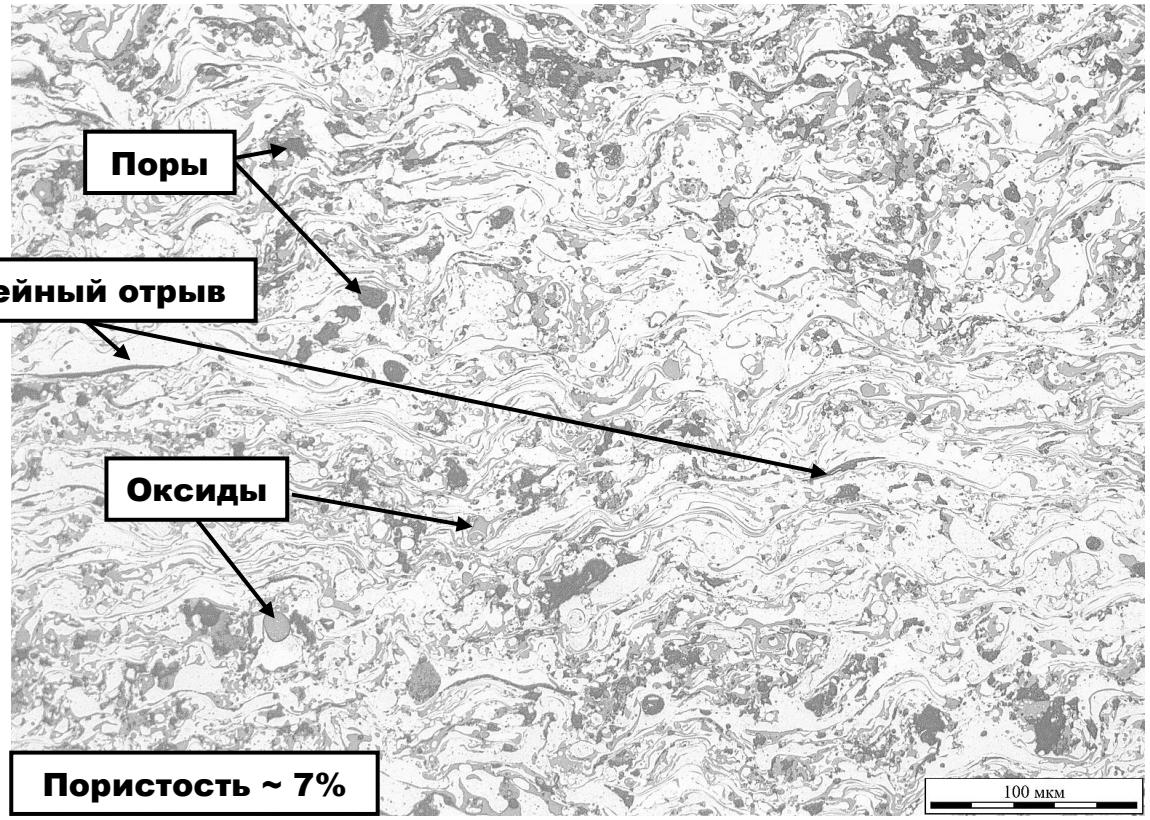


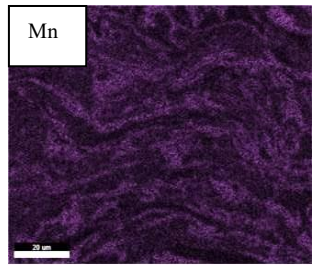
Результат рентгено-фазового анализа

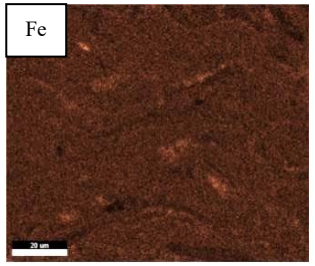
Результат анализа поверхностей покрытия

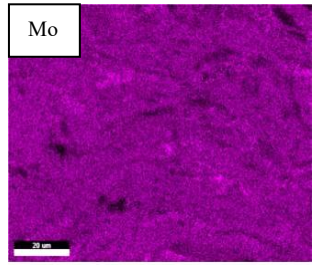
		Массовая доля элементов, %									
		C	O	Si	S	K	Ca	Fe	Mn	Cr	Ni
Наруж.	W, %	36.3	26.9	0.40	4.60	0.50	0.30	4.60	0.20	8.40	18.2
Внутр.	W, %	21.8	19.9	-	6.00	-	-	47.6	-	0.50	4.70

Разрушение металлизоционного покрытия

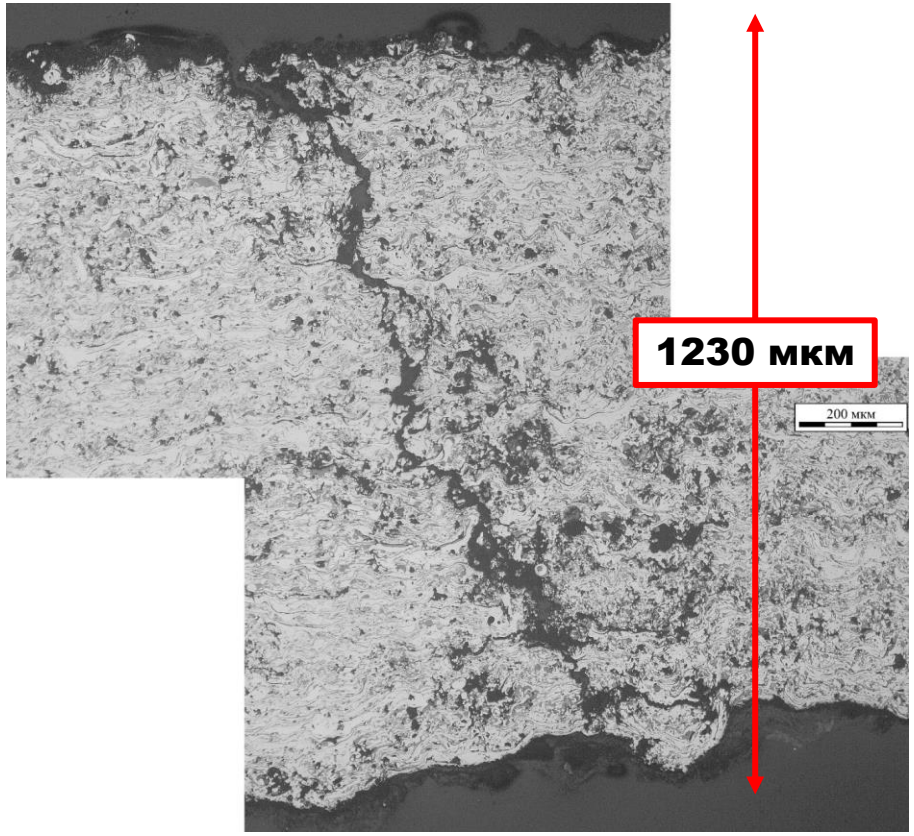


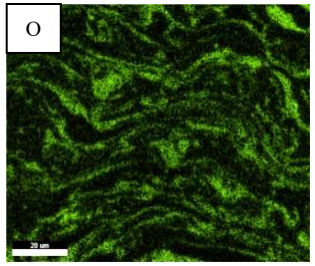


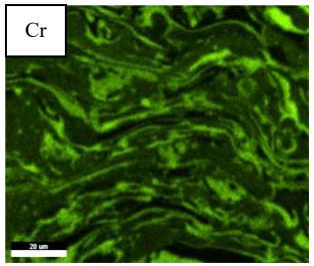


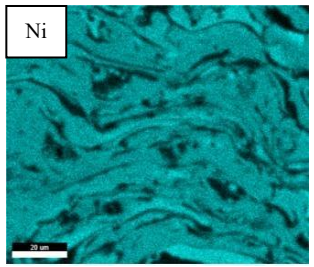


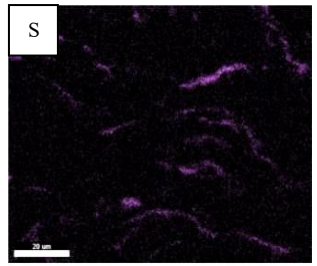












СПЕЦИФИКАЦИЯ ДЛЯ ВНУТРЕННЕГО КОНТРОЛЯ

Требования:

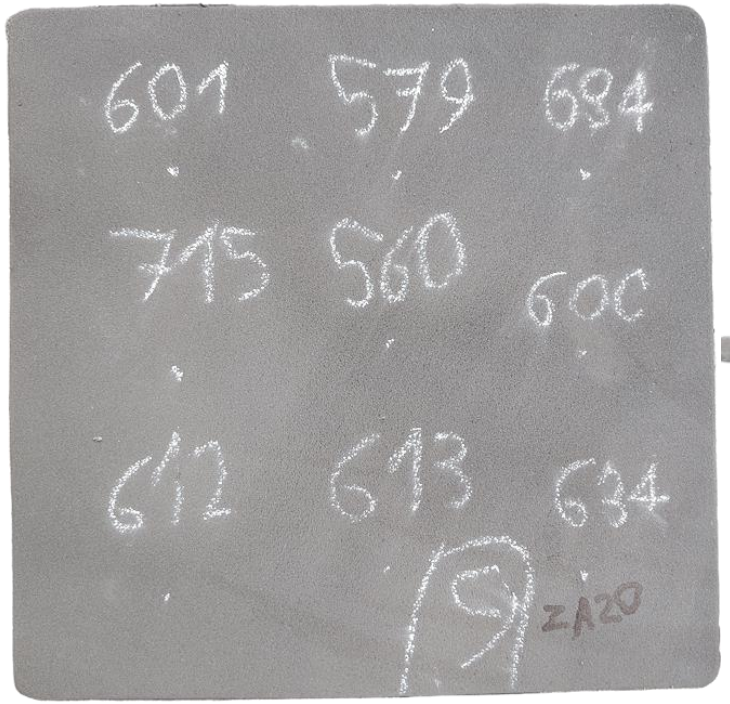


- Содержание кислорода не должно превышать 10% от общего доступного хрома в сплаве. ASTM E2823;
- Средний размер промежуточных слоев (сплэтов) должен быть ≤20 мкм;
- Пористость не должна превышать 2% (ASTM E2109 01);
- Однородность должна быть представлена как стандартное отклонение Cr от среднего, не превышающее 20% потери Cr в любой области 50 мкм (ASTM E1508);
- Прочность сцепления должна быть более 50 МПа (ASTM C633);
- Отсутствие после термоциклирования видимых признаков макротрещин или деламинации;
- Для коррозионных испытаний образцы должны быть помещены в автоклав и подвергнуты воздействию жидкой или газообразной среды, предназначенной для условий эксплуатации (ASTM G111 97).

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

- В качестве образцов-свидетелей используются стальные образцы. Технология нанесения покрытия на них полностью соответствует технологии нанесения покрытия на готовое изделие.







МАТЕРИАЛЬНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ПОКРЫТИЯ

Результат химического анализа металлического покрытия

Массовая доля элементов, %													
Ni	C	Si	Mn	Cr	Fe	Cu	Mo	Co	W	Nb	V	S	P
59.82	0.07	0.05	0.26	16.2	4.1	0.04	15.7	0.05	3.7	<0.01	<0.01	0.004	0.002
Требования стандарта ASTM B575 для никелевого сплава Hastelloy C276 - UNS N10276.													
Осн.	**≤0.01**	**≤0.08**	**≤1.00**	**14.5-16.5**	**4.0-7.0**	**-**	**15.0-17.0**	**≤2.5**	**3.0-4.5**	**-**	**≤0.35**	**≤0.03**	**≤0.04**

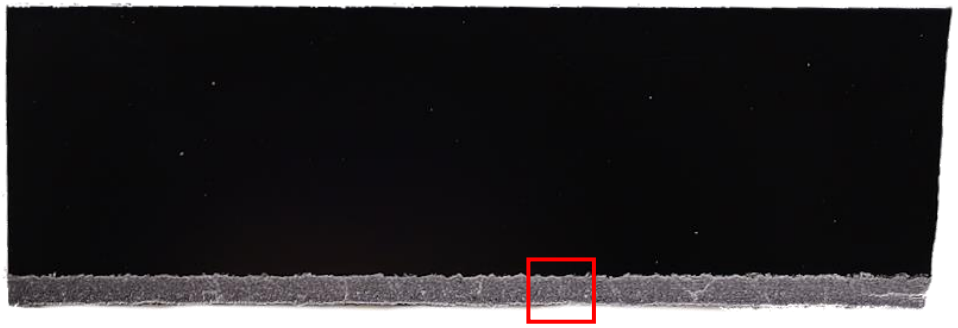
Результат измерения содержания кислорода

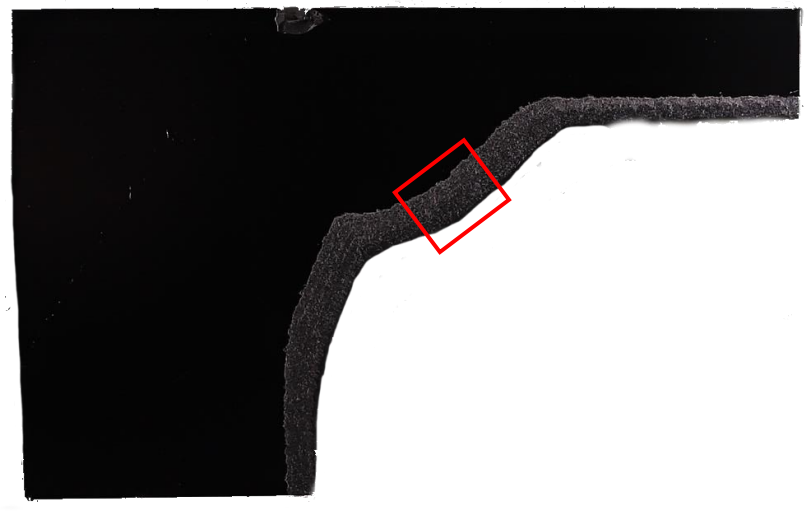
Содержание кислорода, %						
	Пластина №1			Пластина №2 (Сварной шов)		
	1,508	1,512	1,542	1,618	1,608	1,527
Ср.знач.	**1,521**			**1,612**		
	Требования внутренней спецификации ≤1,6%					

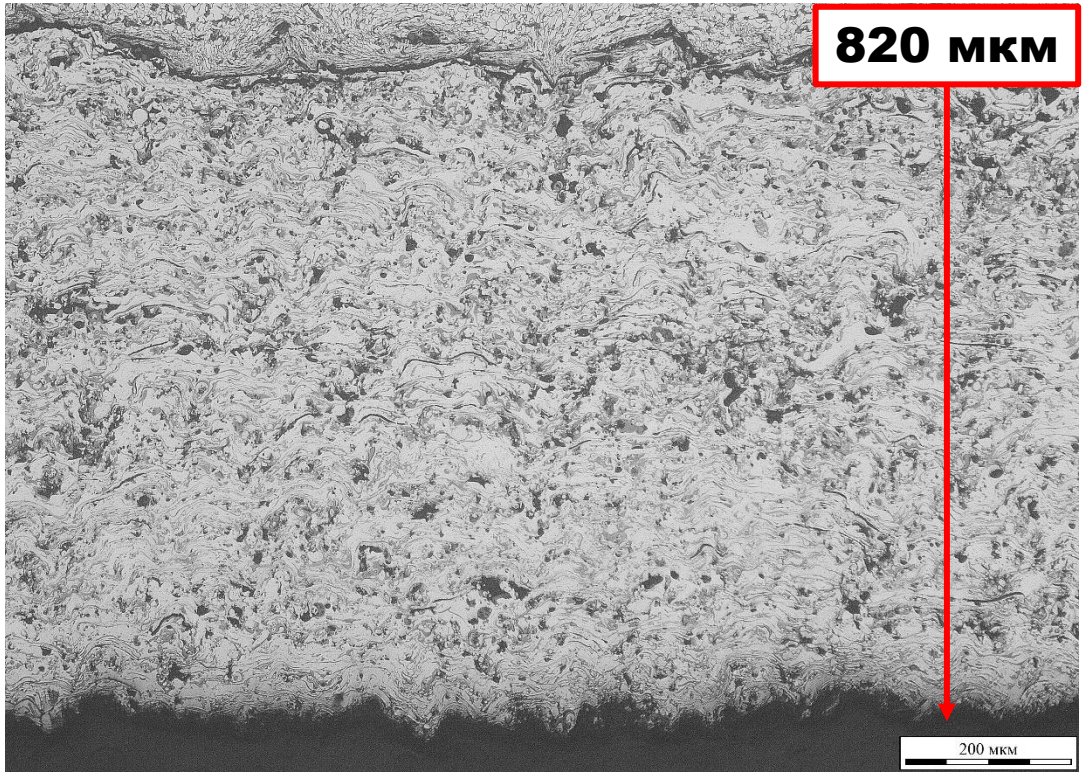


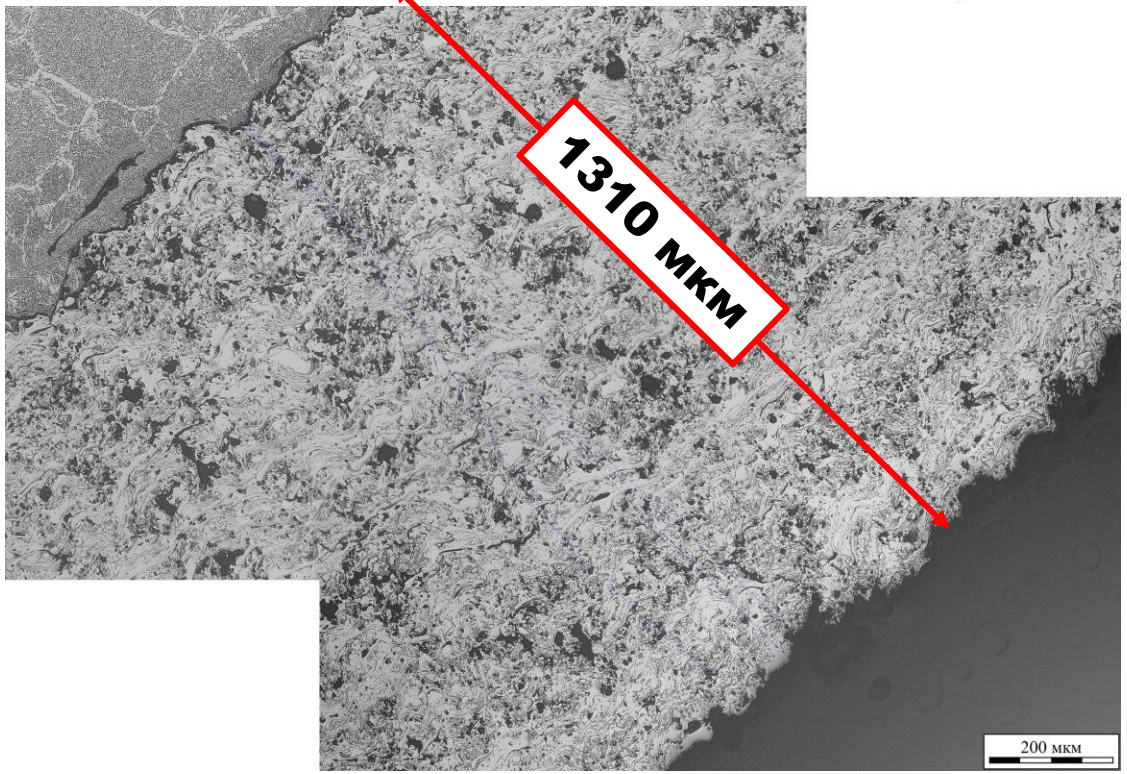
Hastelloy C276

ТОЛЩИНА ПОКРЫТИЯ

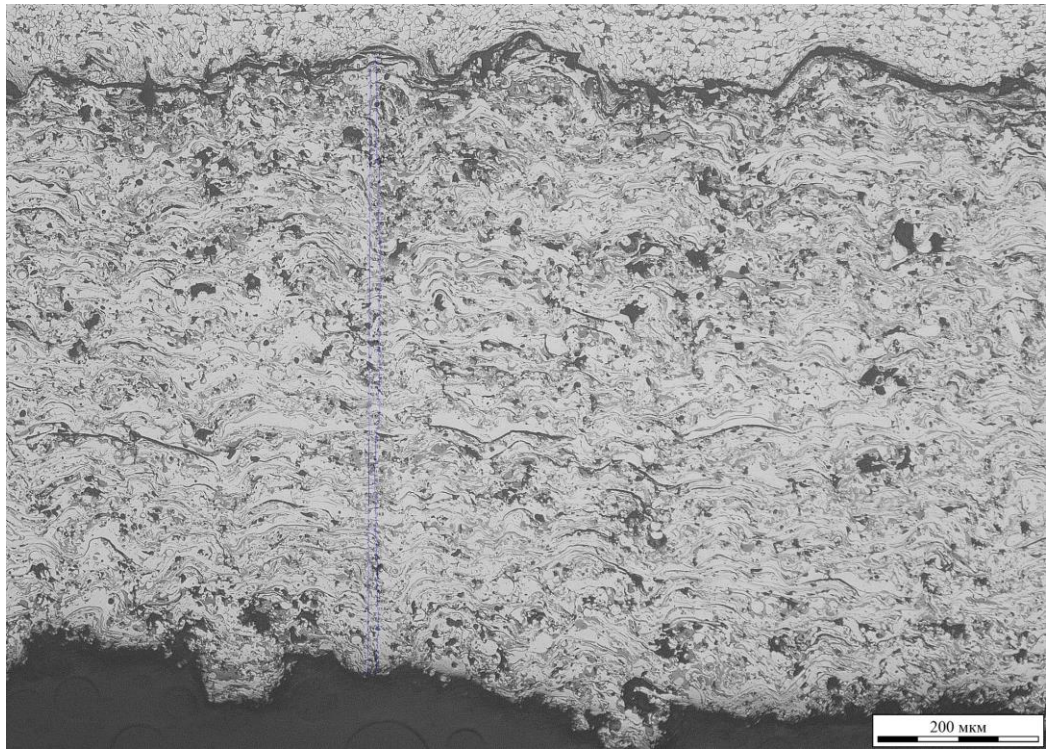


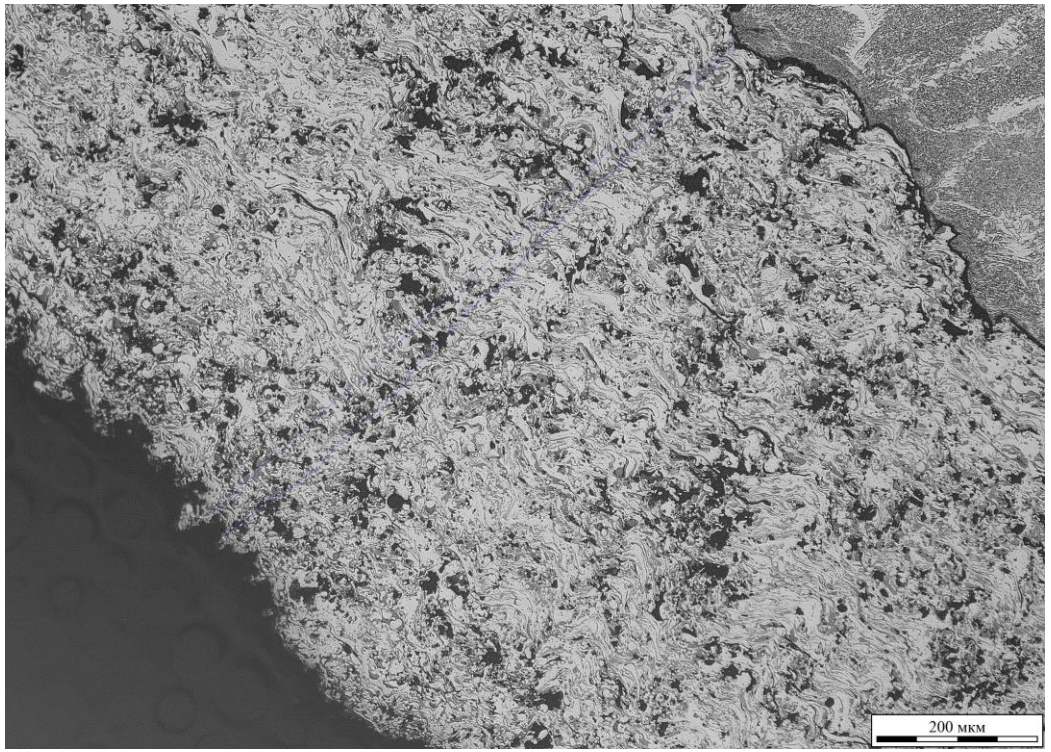






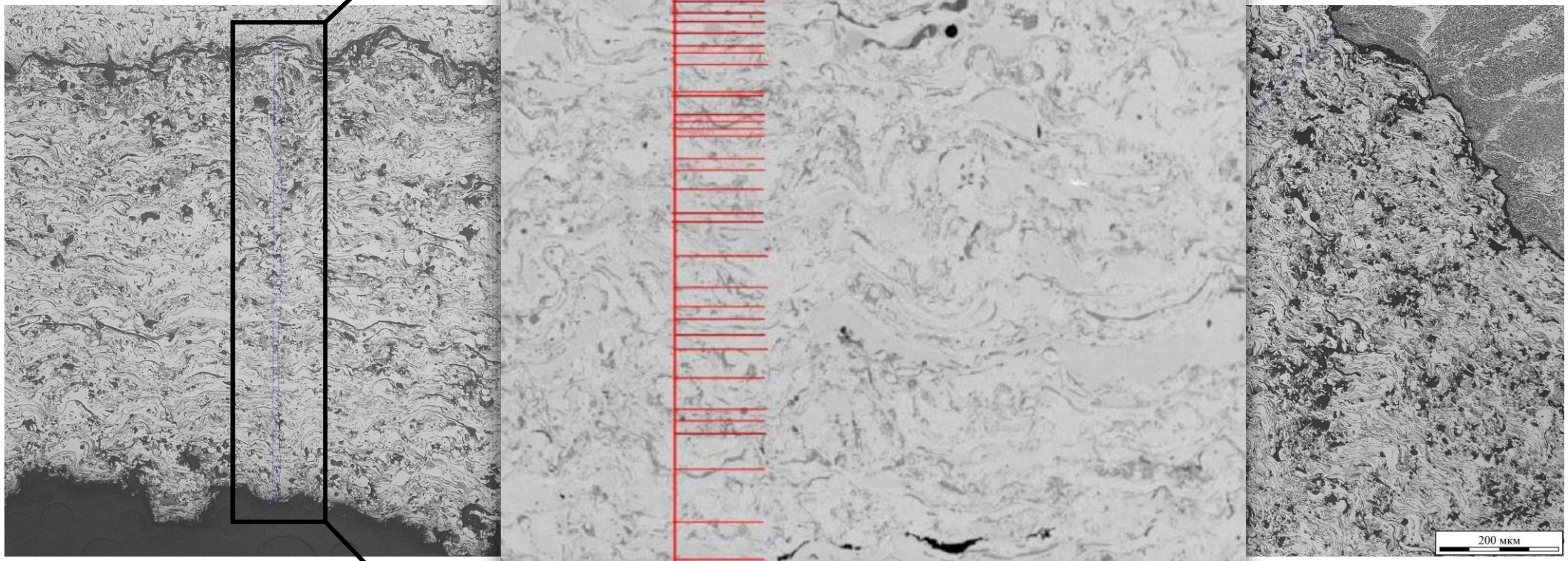
ПОРИСТОСТЬ и ОДНОРОДНОСТЬ ПОКРЫТИЯ





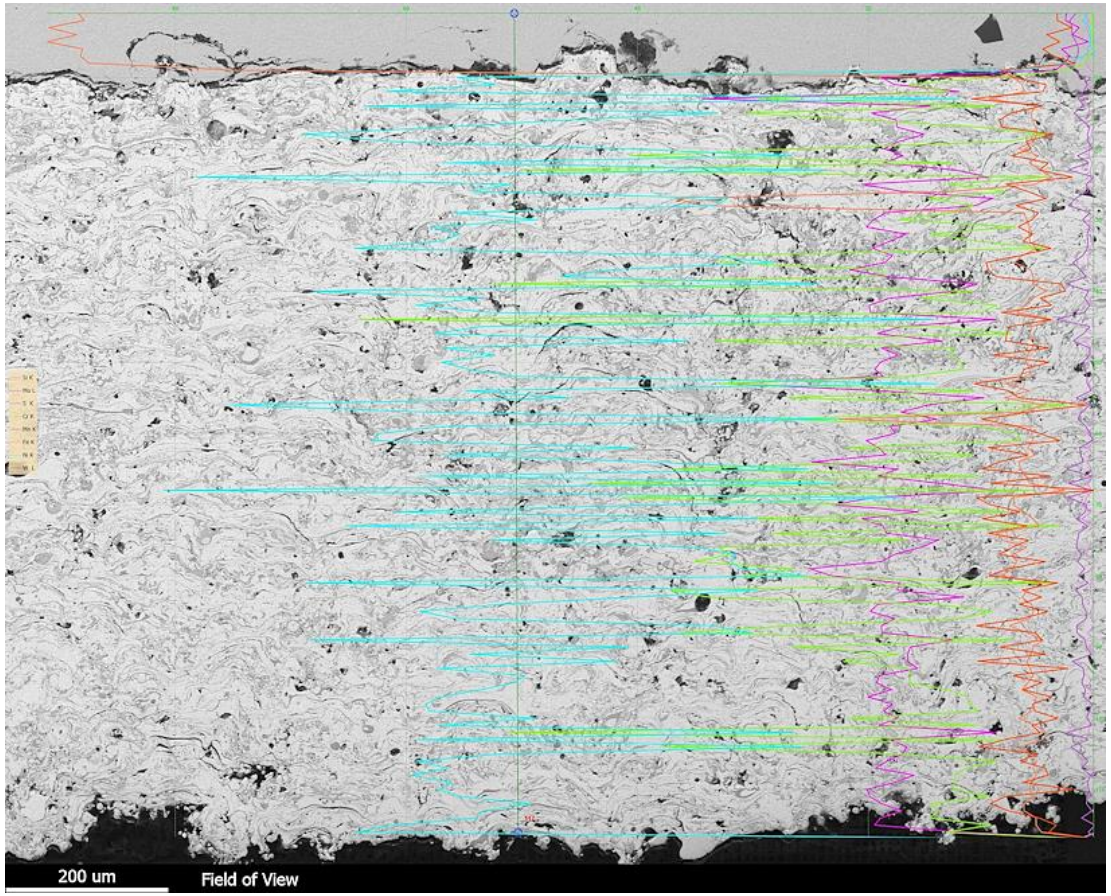
	Образец 1			Образец 2			Требования
	Область 1	Область 2	Область 3	Область 1	Область 2	Область 3	
Общая толщина, мкм	767	772	783	865	1054	1209	–
Средняя толщина промежуточных слоев (сплэтов), мкм	11,8	12,0	11,7	12,3	13,3	14,4	≤20мкм
Средняя пористорсть, %	1,0			2,0			≤2%

ПОРИСТОСТЬ И С

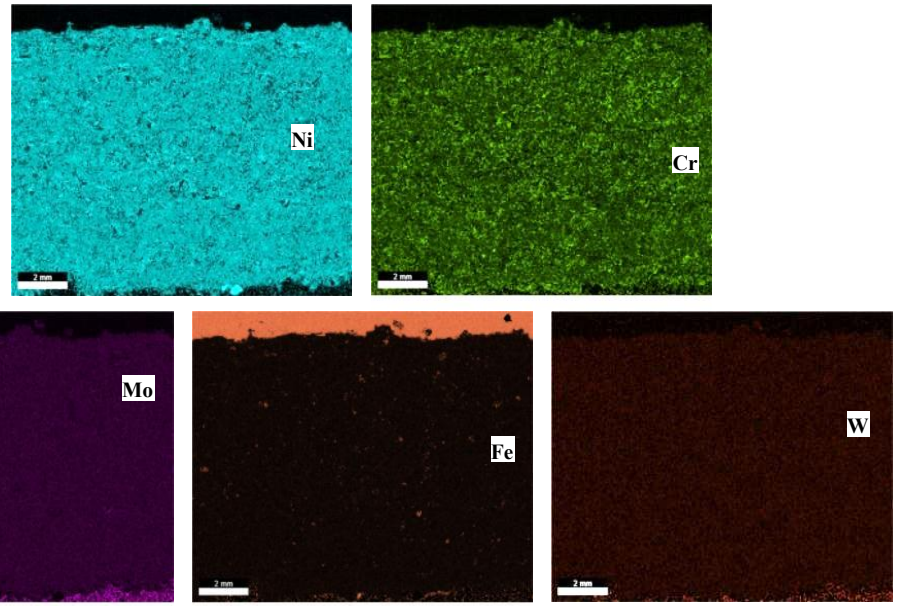


	Об						Требования
Общая толщина, мкм	7						–
Средняя толщина промежуточных слоев (сплэтов), мкм	11,8	12,0	11,7	12,3	13,3	14,4	≤20мкм
Средняя пористорсть, %	1,0			2,0			≤2%

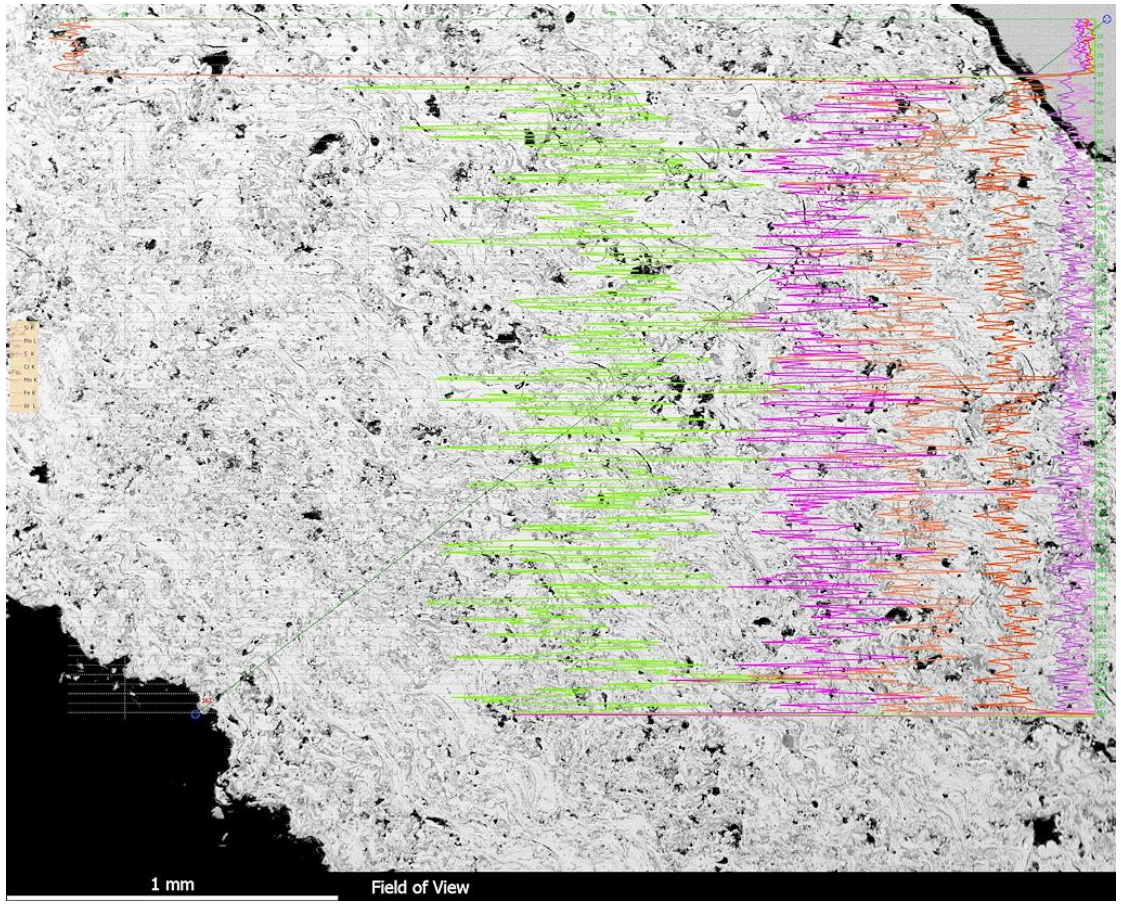
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

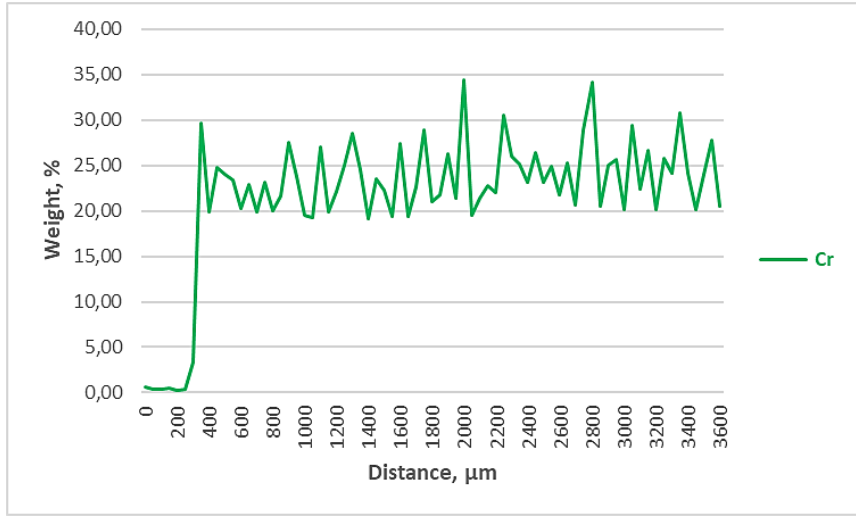


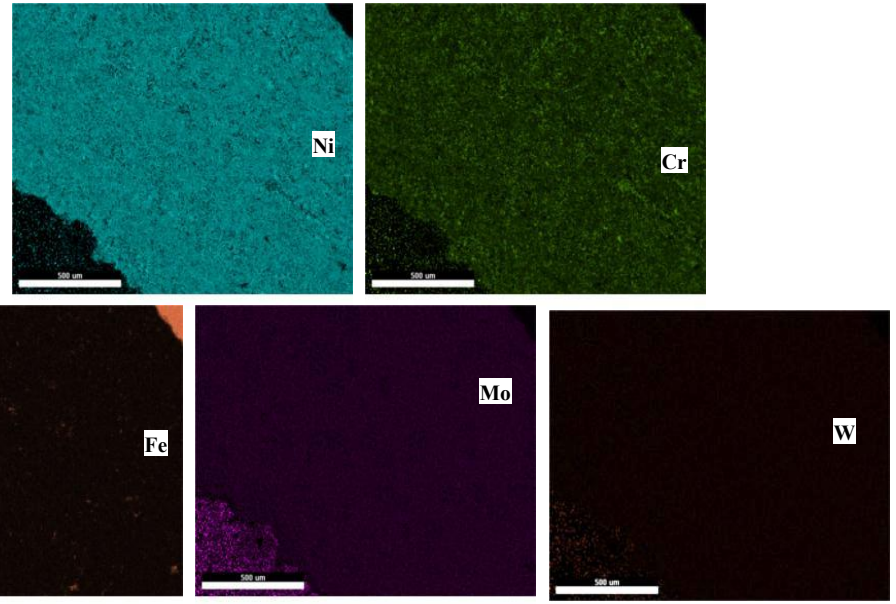




РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ







Испытание прочности сцепления и стойкости покрытия к циклическому изменению температуры

На покрытие был нанесен клей НТК Ultra Bond® 100
Результаты испытаний показали, что усилие отрыва превысило 52 МПа.



Фото установки для испытания



Вид зоны после отрыва

Режим: нагрев до 300°С – охлаждение до 90°С, в течение 100 циклов.
После термоциклирования деградации покрытия обнаружено не было.

до



после



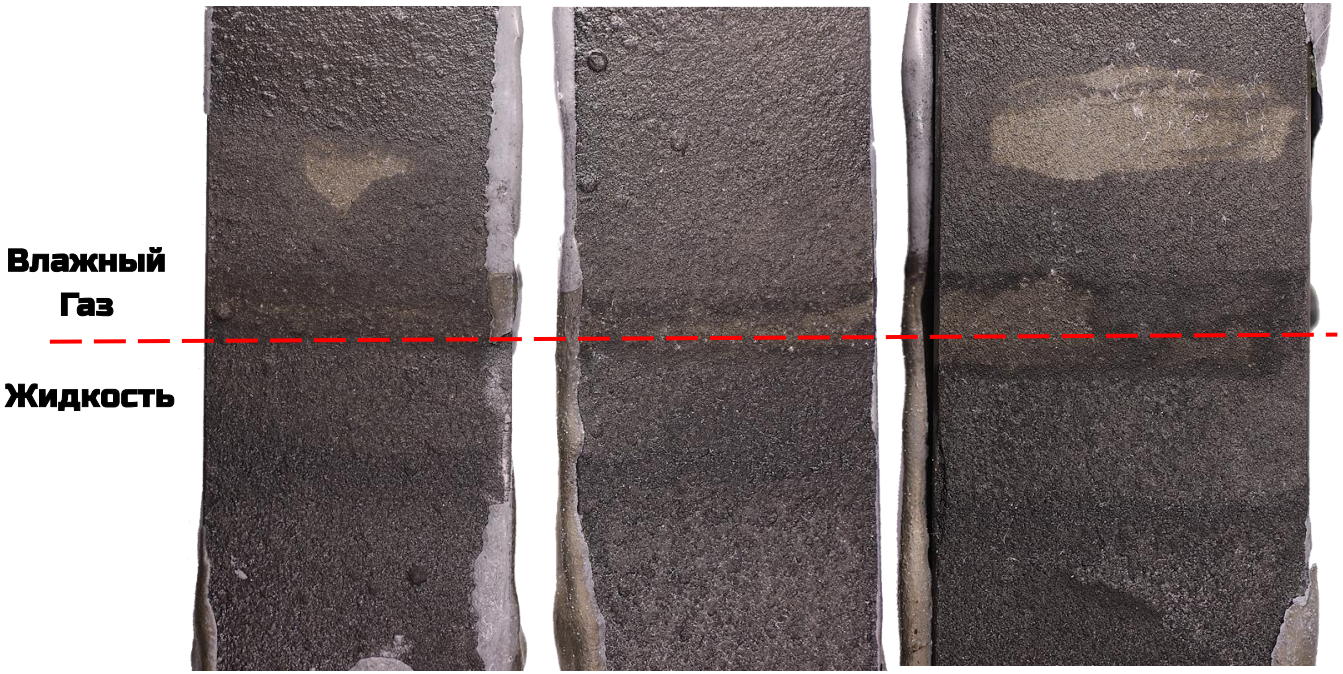


Муфельная печь

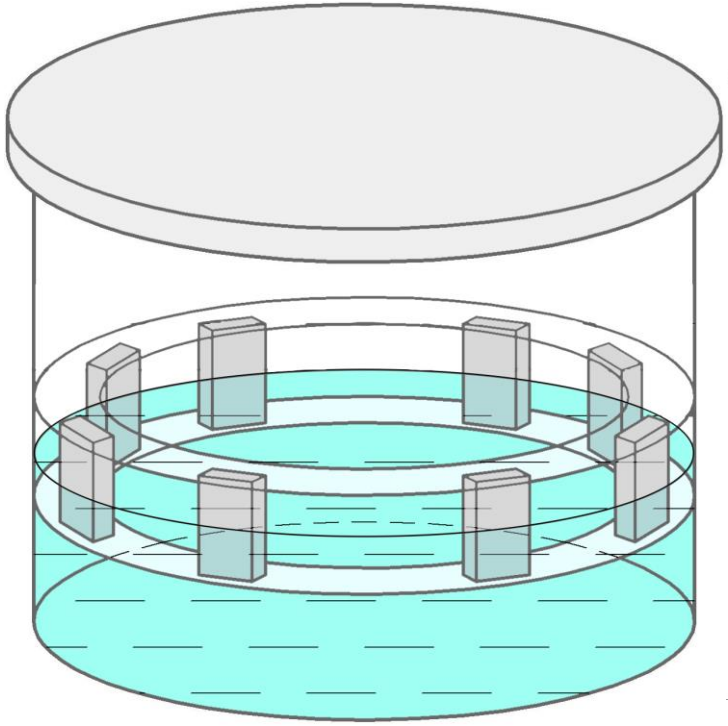
СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ CO_2- И H_2S СОДЕРЖАЩИХ СРЕД

Условия проведения испытания

Время испытания, час	Температура, °С	Давление, psi	Раствор	Смешивание, об/мин
360	150±8	2000±100	5% NaCl	200



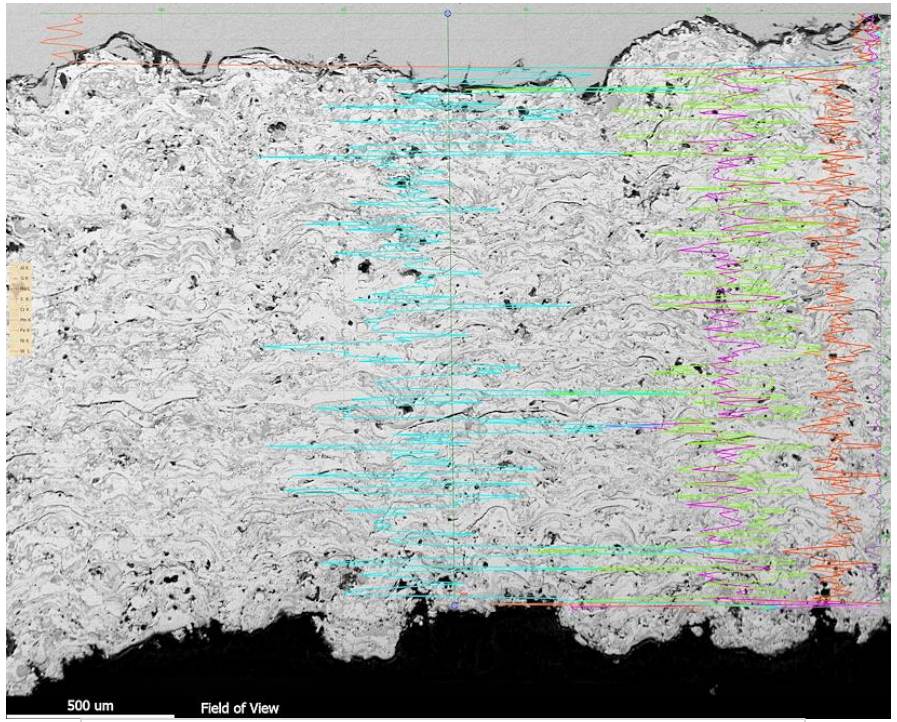
Внешний вид образцов после испытания

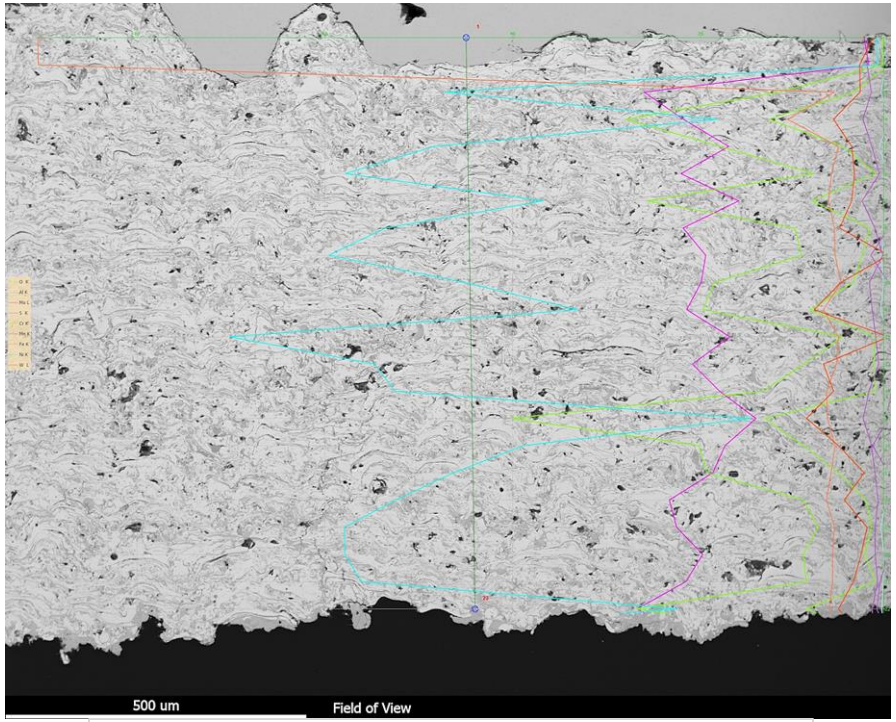


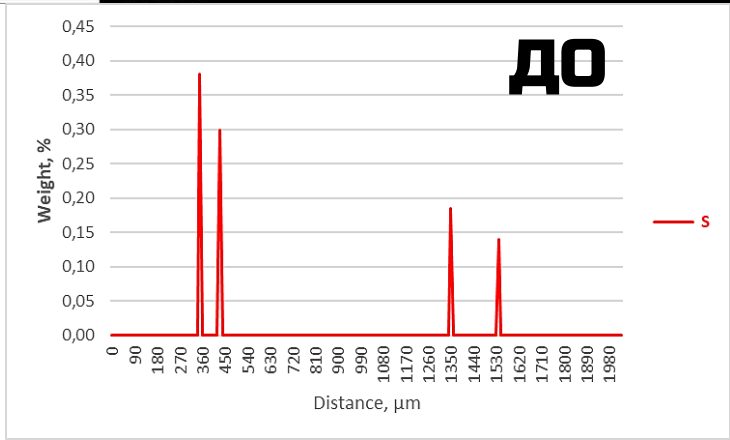
Расположение образцов в автоклаве

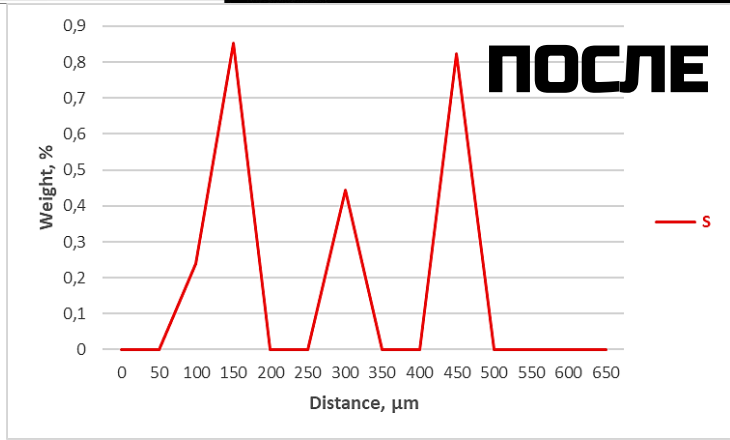


СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ CO_2- И H_2S СОДЕРЖАЩИХ СРЕД









РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

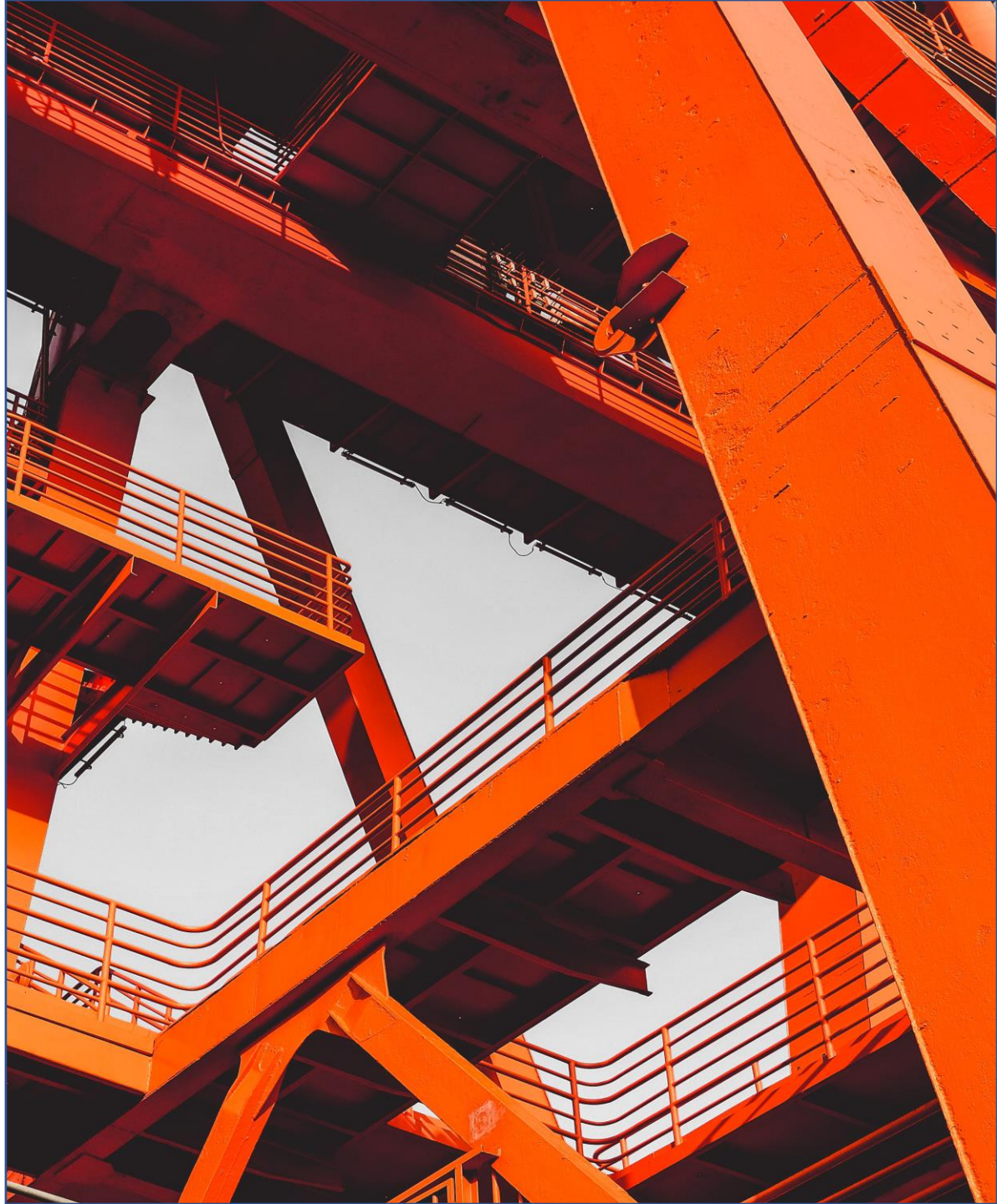


- Состав защитного слоя соответствует заявленному Hastelloy C-276;
- Содержание кислорода не превышает 1,6 %;
- Покрытие по толщине равномерное;
- Толщина прослоек составляет в среднем от 10 до 19 мкм.
- Пористость покрытия не превышает 2%;
- Распределение легирующих элементов, по сечению покрытия, равномерное.
- Повреждения покрытия в виде вздутий, отслоения, не выявлено
- По результатам автоклавных испытаний, при режимах, предложенных Заказчиком, коррозионного повреждения покрытия и материала пластины, не выявлено.

ВЫВОДЫ

- Специализированное оборудование позволяет контролировать качество напыляемых покрытий и проводить исследования защитных свойств покрытий для конкретных условий эксплуатации.

- Это позволяет оперативно корректировать режимы напыления при появлении первых признаков отклонений и обеспечивает стабильное нанесение покрытия самого высокого качества, соответствующего всем предъявляемым требованиям.



Благодарю за внимание!