



**РОСАТОМ**

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

# **Разработка технологии комплексного воздействия мощными импульсными потоками высокотемпературной плазмы и лазерного излучения**

**Авторы работы: Кутуков А.К.; Коваленко Д.В.; Климов Н.С.;  
Житлухин А.М.; Смирнов Р.В.; Барсук В.А.; Подковыров В.Л.  
Панин С.Е.; Данилина Н.А.**

**Докладчик:  
Кутуков Антон Константинович  
Организация:  
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»**

# Модификация поверхностных слоев материала воздействием импульсных плазменных потоков



## Физический процесс:

- нагрев поверхностного слоя материала до температур плавления со скоростью  $10^7 - 10^9 \text{ K/c}$ ;
- внедрение в нагретый слой вещества плазмы;
- отвод тепла от поверхностного слоя за счет теплопроводности вглубь материала и охлаждение поверхностного слоя материала со скоростями до  $10^8 \text{ K/c}$ ;
- Рекристаллизация с образованием псевдоаморфного слоя.

**Технологический результат** – многократное увеличение микротвердости, износостойкости и коррозионной стойкости

# Результаты упрочнения изделий на импульсных плазменных установках



Установка	Примеры использования	Эксплуатационная характеристика	Результат обработки
Установка по осесимметричному облучению изделий импульсным потоком плазмы (установка «Десна»)	Обработка внешней поверхности ниппельной части замков из стали XJY850 и DM950 (трубы для буровых установок)	Толщина упрочненного слоя	8-10 мкм по всему профилю резьбы
		Твердость упрочненного слоя	54-56 HRC
	Сверла диаметром 6 мм Coby Steel (Япония)	Количество отверстий до выхода из строя при сверлении нержавеющей стали толщиной 20 мм	>1500
		Увеличение ресурса по сравнению с традиционной технологией	более чем в 6 раз
Импульсный плазменный ускоритель МК-200	Лопатки газотурбинных двигателей (с покрытием)	Испытания на термоудар (количество циклов до разрушения)	>1300
		Увеличение по сравнению с внедренными технологиями	более чем в 1,6 раза
		Коррозионная стойкость в продуктах сгорания топлива (время в часах)	1300
		Увеличение по сравнению с внедренными технологиями	Более чем на 100 часов
	ст.45, 20ГС, 38ХМА	Твердость упрочненного слоя	55-60 HRC

1. Зафиксировано многократное увеличение свойств поверхности после обработки
2. Толщина обработанного слоя не превышала 20-25 мкм
3. Поставлена задача увеличить толщину обработанного слоя до 50 мкм за счет увеличения длительности плазменного импульса

# Методика проведения эксперимента на плазменном ускорителе

Ключевые параметры влияющие на характеристики модифицированного слоя при обработке импульсной плазмой являются:

$Q$ , Дж/см<sup>2</sup> – количество теплоты приходящей на образец;

$t$ , мс – длительность импульса;

He, N<sub>2</sub> – плазмообразующий газ

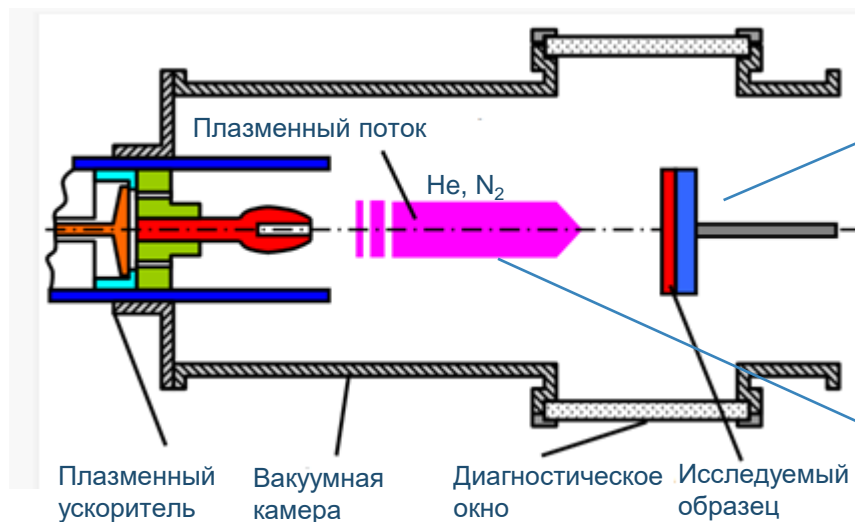
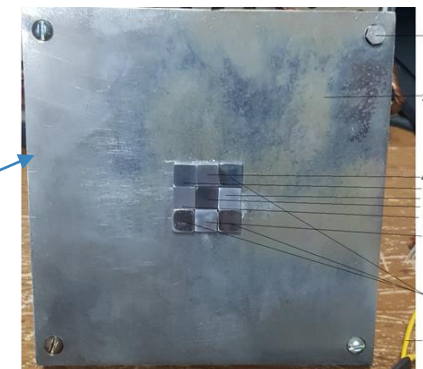
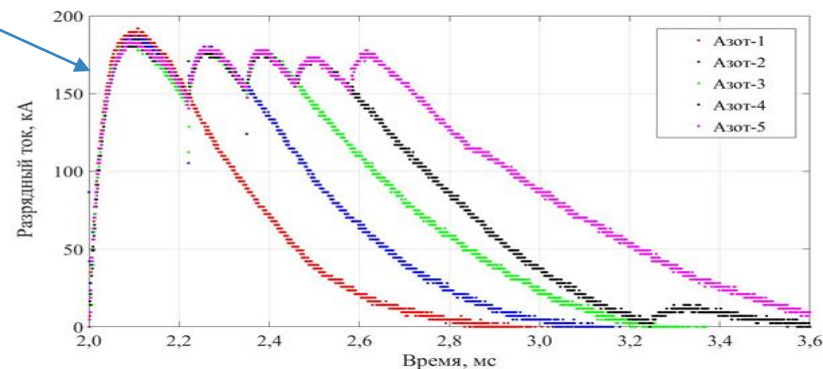


Рисунок – Экспериментальная схема



Мишень для обработки импульсной плазмой с закрепленными образцами



Варьируемая длительность импульса

Величиной  $Q$  можно управлять путем изменения напряжения на конденсаторной батарее и расстоянием от электродной системы

# Характеристика микротвердости модифицированного слоя при длительности импульса до 1 мс

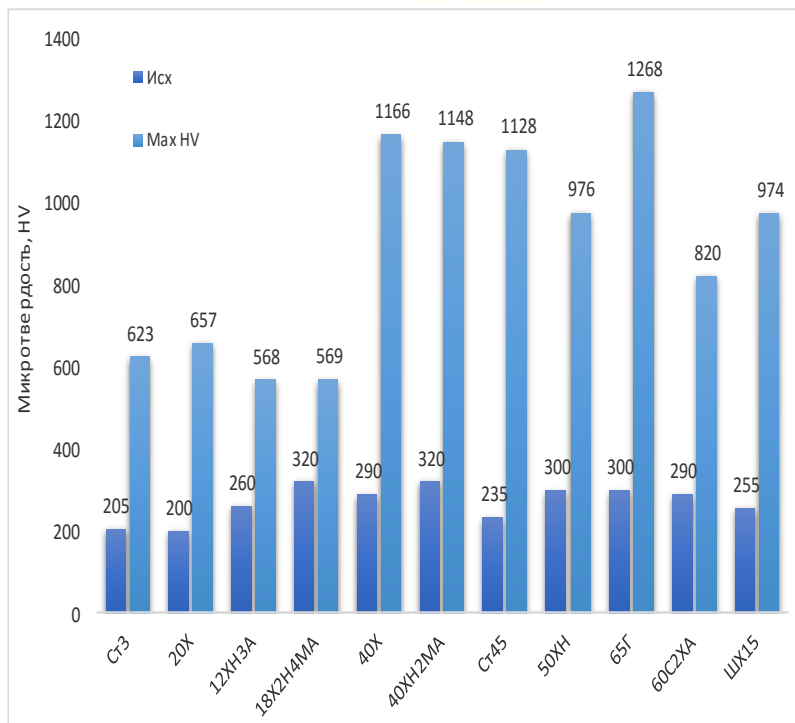


Рисунок – отношение исходных и максимальных значений микротвердости

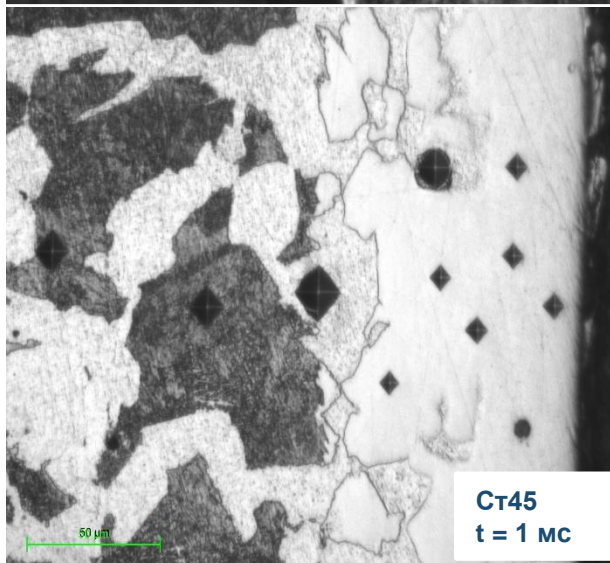
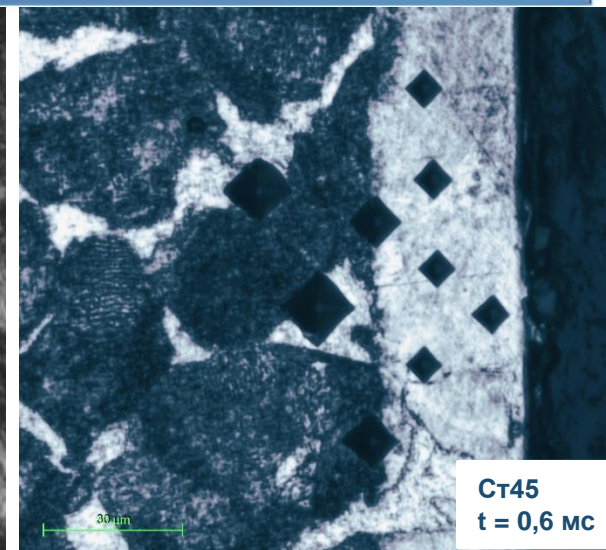
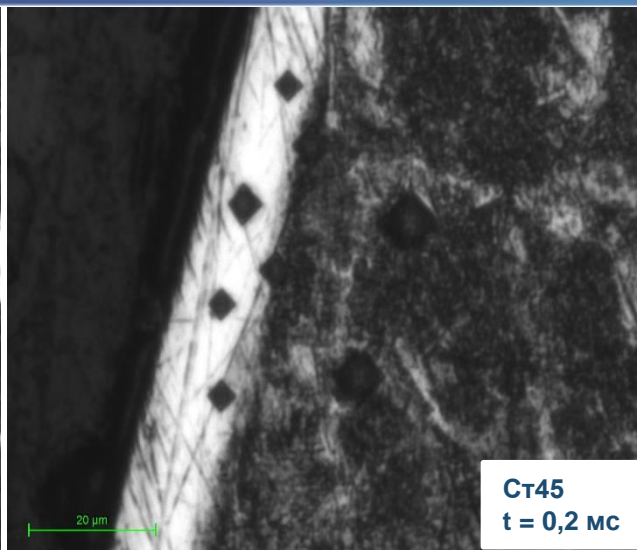
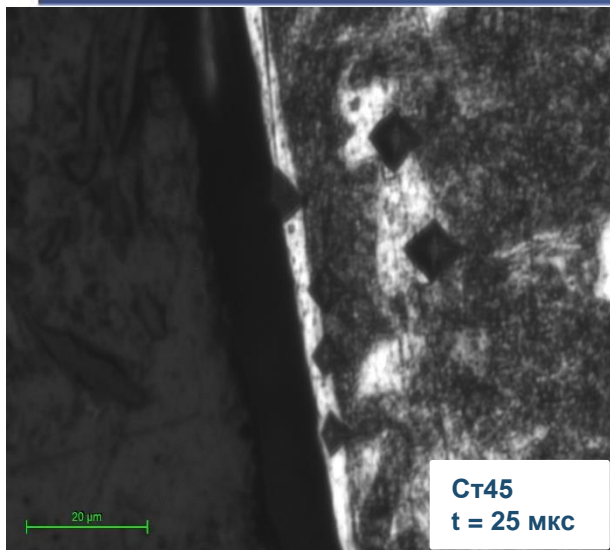
Марка стали	HV <sub>50</sub> поверхностный модифицированный слой	Толщина поверхностного слоя	HV <sub>50</sub> зоны термического влияния	Толщина зоны термического влияния
ШХ15	500	10 ÷ 60	720	30
Ст45	880	20 ÷ 50	760	50 ÷ 60
Ст3	520	30 ÷ 50	290	50 ÷ 60
65Г	1190	30 ÷ 150	530	-
20Х	570	10 ÷ 30	280	30 ÷ 40
40Х	970	40 ÷ 60	800	50
12ХН3А	500	10 ÷ 30	400	30
60С2ХА	970	20 ÷ 60	860	20 ÷ 30
40ХН2М А	910	10 ÷ 20	810	30 ÷ 40
18Х2Н4 МА	530	5 ÷ 60	390	30
50ХН	760	10 ÷ 30	580	30 ÷ 40

1. Толщина модифицированного слоя неоднородна и сильно отличается от режима обработки.
2. В низкоуглеродистых сталях диапазоны толщин модифицированного слоя колеблются от 25 до 35 мкм.
3. В углеродистых толщина колеблется до 50-60 мкм.
4. В высокоуглеродистых толщина колеблется до 60-90 мкм.
5. Максимальная толщина модифицированного слоя у стали 65Г вплоть до 150 мкм.

# Толщина модифицированного слоя в зависимости от длительности импульса



РОСАТОМ



## Выводы

1. С увеличением длительности действия импульса увеличивается толщина модифицированного слоя
2. Плазмообразующий газ гелия или азота не влияют на толщину модифицированного слоя

## Планы

1. Изучить толщину модифицированного слоя при длительности импульса в диапазоне 1-5 мс
2. Изучить толщину модифицированного слоя изменяя давление под клапаном
3. Изучить толщину модифицированного слоя в зависимости от количества импульсов





# Исследование скорости коррозии гравиметрическим методом

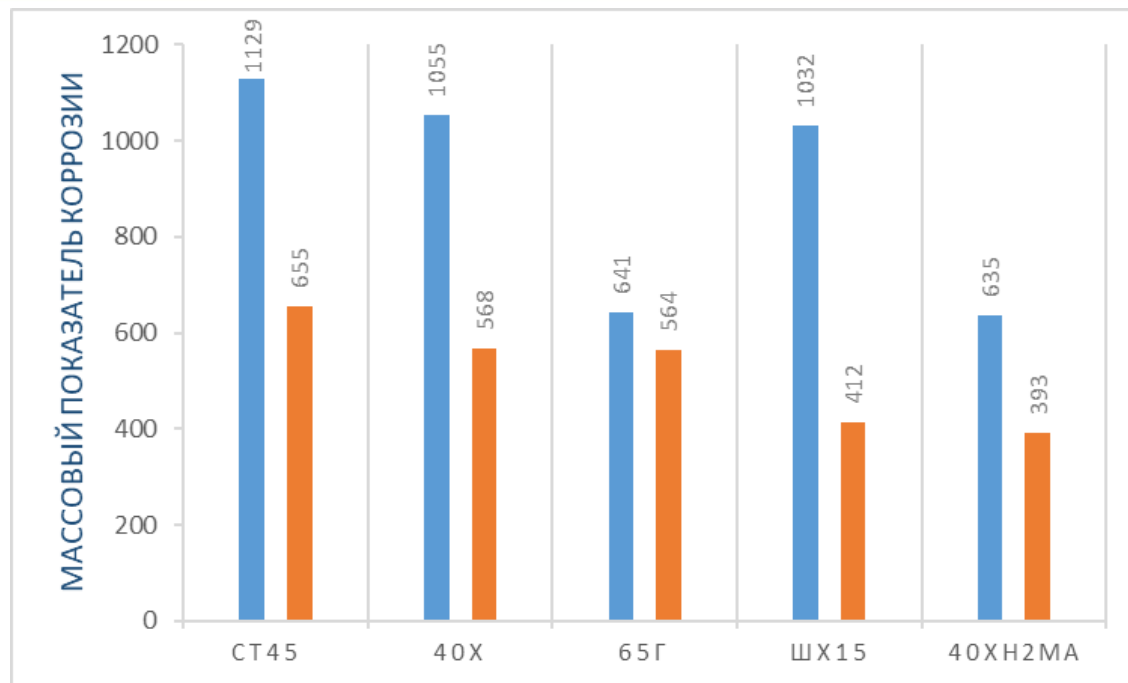


Рисунок – отношение исходных и максимальных значений массового показателя коррозии

Метод потенциостатического травления в электролите  $\text{HClO}_4$

1. Наибольшее увеличение коррозионной стойкости достигнуто для стали ШХ15
2. Наименьший рост коррозионной стойкости был получен у марганцевой стали 65Г

# Анализ модифицированного слоя

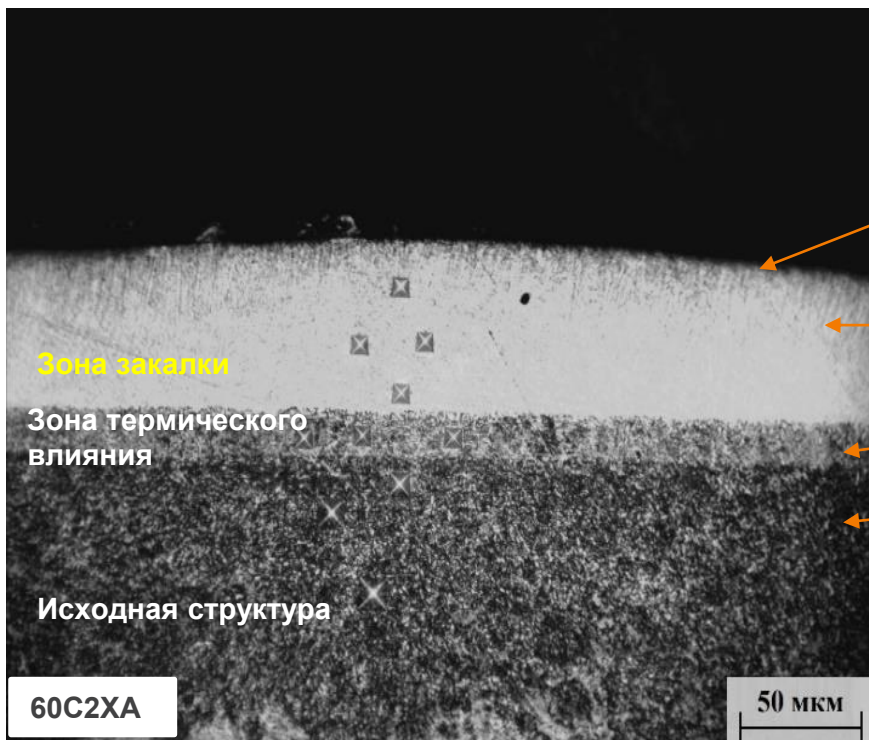


Рисунок 1 – микроструктура стали 3Х15 в разрезе после плазменной обработки с падающей энергией потока на поверхность 50 Дж/см<sup>2</sup>

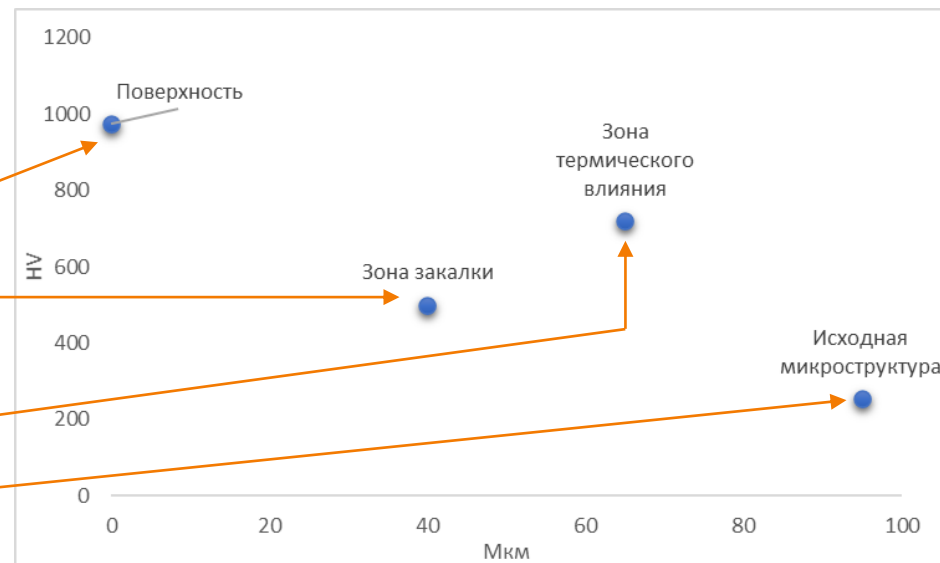
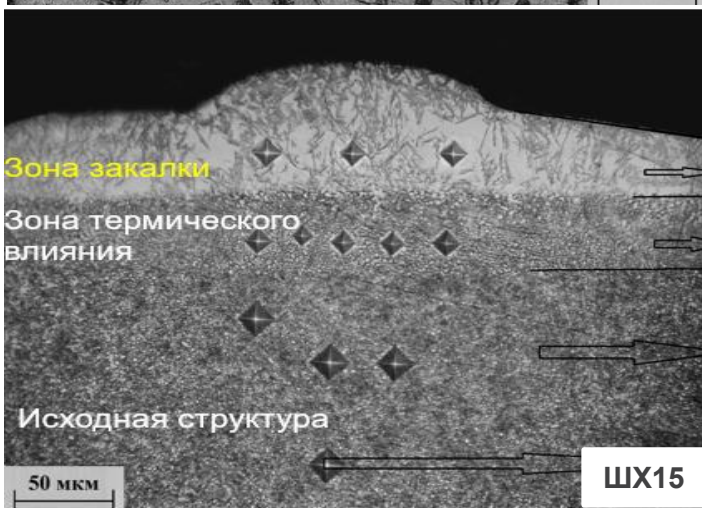
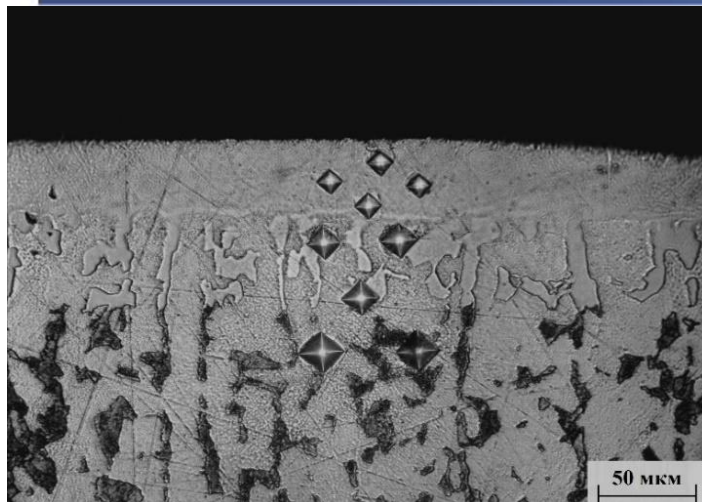


Рисунок 2 – распределение значений микротвердости по глубине для стали 3Х15

Микротвердость на поверхности самая высокая, это можно объяснить наличием упрочненного тонкого слоя, состоящего из неравновесной мелкодисперсной структуры, близкой к аморфной, она имеет место при закалке из расплавленного состояния. в нетравленной зоне закалке она ниже, чем в зоне термического влияния. Это можно объясняется наличием остаточного аустенита, который наблюдался при рентгенофазовом анализе.



# Анализ модифицированного слоя



При плазменной обработке в закаленном слое возникают растягивающие остаточные напряжения

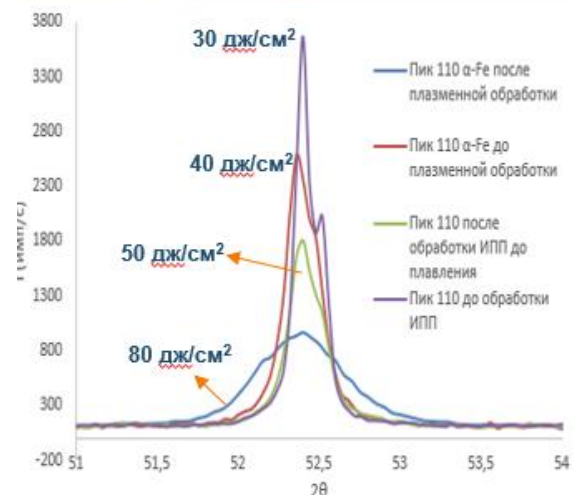


Рисунок – участок рентгенограммы марки Ст3 до и после обработки импульсной плазмой

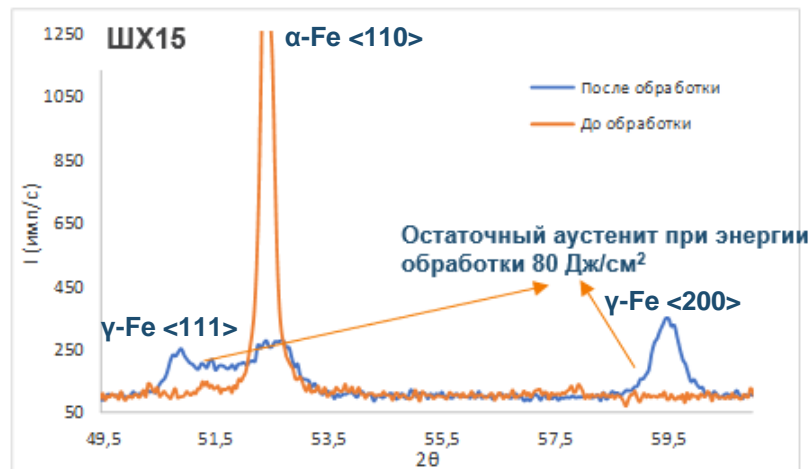


Рисунок – участок рентгенограммы марки Ст3 до и после обработки импульсной плазмой

# Создание установки для обработки изделий сложной формы импульсными плазменными потоками

Стенд КСПУ для обработки ИПП

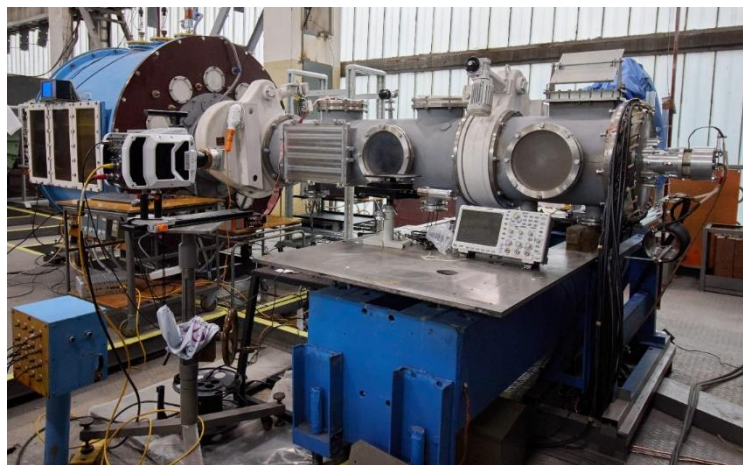


Рисунок – Импульсный плазменный ускоритель КСПУ

1. Образцы крепятся на рейтере
2. Отсутствует возможность вращать и двигать изделие
3. Длительность импульса до 1 мс

Будет сделано в рамках НИОКР до 2024 года

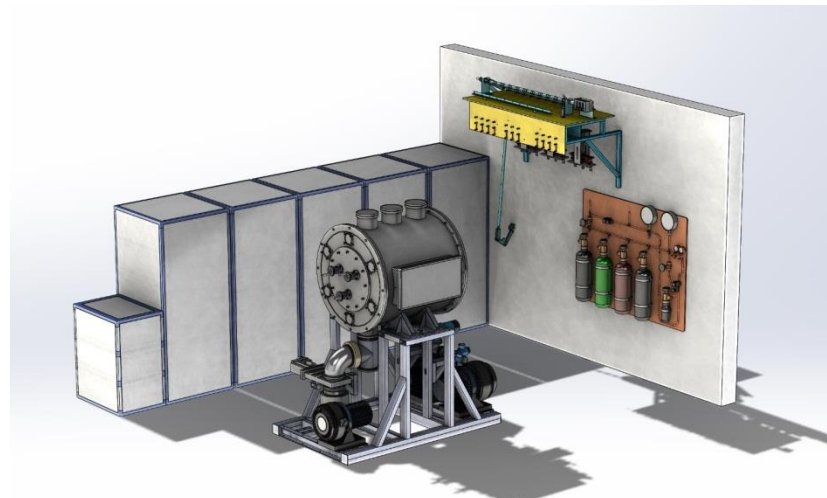


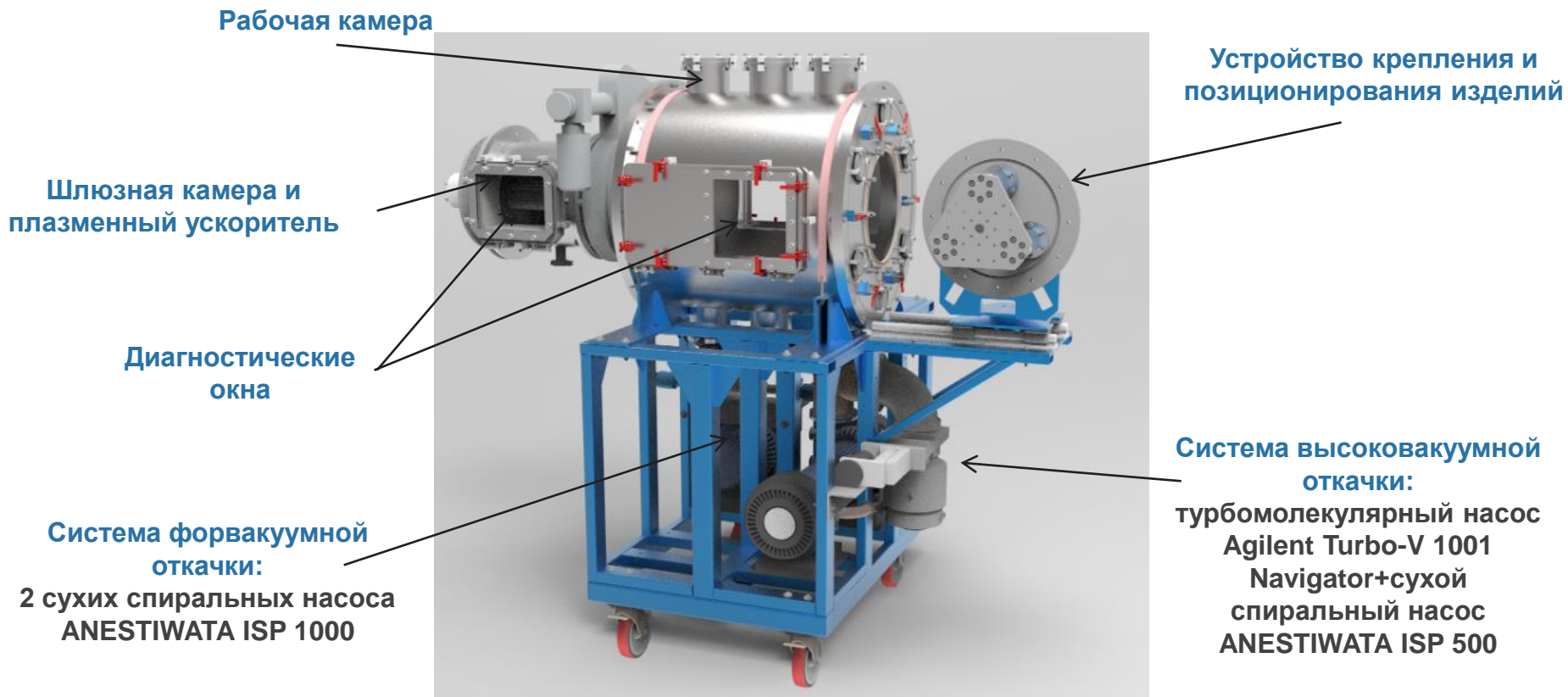
Рисунок – Импульсный плазменный ускоритель КСПУ-Б

1. Система позиционирования образцов
2. Возможность обрабатывать детали сложной формы без развакуумирования рабочей камеры
3. Длительность импульса до 5 мс

Цель создать установку адаптированную под обработку изделий



# Модуль плазменной обработки



3D модель модуля плазменной обработки

Расчетное время откачки между отдельными импульсами - < 3 минут

Расчетное время выхода на режим с атмосферного давления - < 10 минут

# Модификация поверхностных слоев материала воздействием мощных лазерных импульсов

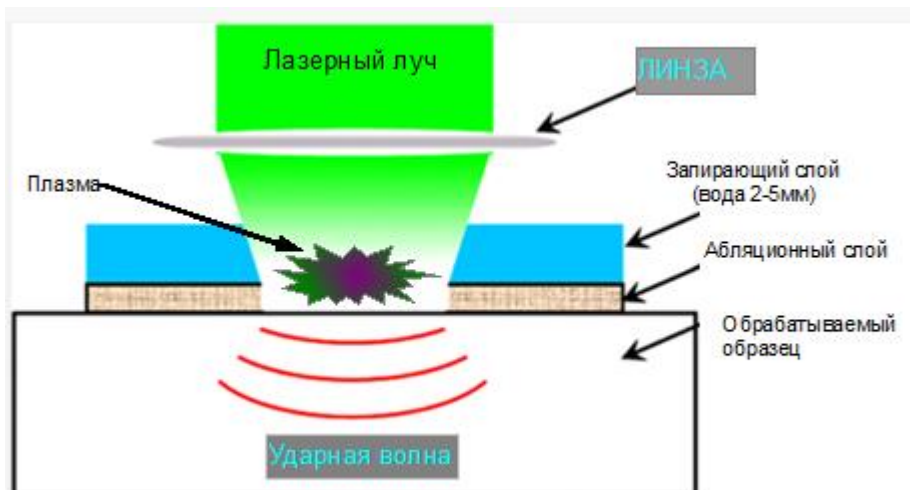
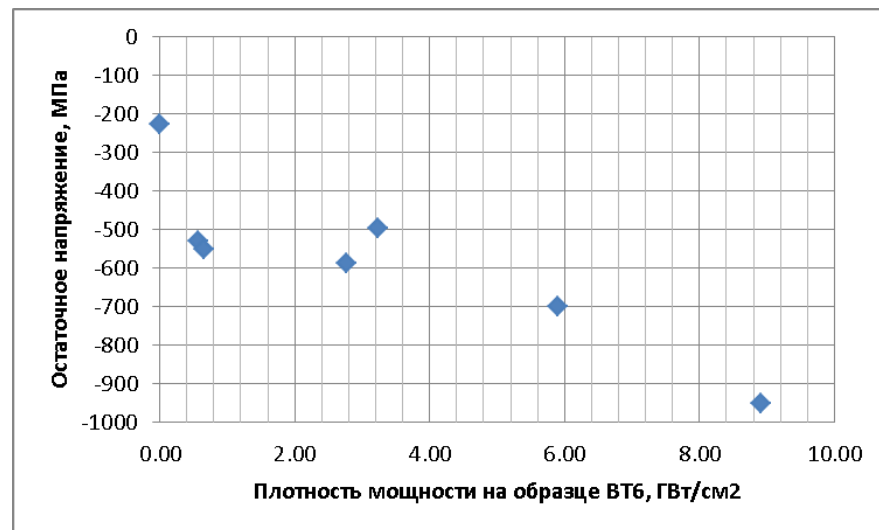


Схема обработки поверхности



Зависимость остаточных напряжений от плотности мощности лазерного импульса

## Физический процесс:

- возбуждение сильных ударных волн без повреждения поверхности детали импульсами лазерного излучения с плотностью мощности 2-10 ГВт/см<sup>2</sup>;
- формирование остаточных сжимающих напряжений до 900 МПа в поверхностном слое толщиной до 1 мм.

Технологический результат – существенное увеличение усталостной прочности деталей.



# Результаты увеличения стойкости изделий при обработке импульсным лазерным излучением



Установка	Примеры использования	Эксплуатационная характеристика	Результат обработки
Лазерный наклеп (лазерное ударное упрочнение)	Рабочие лопатки компрессора ГТД	Величина остаточных сжимающих внутренних макронапряжений [значение до обработки]	-800 МПа [-200 МПа] 4-х кратное увеличение
		Толщина слоя с напряжениями [значение для традиционных методов]	1-2 мм [100 мкм] увеличение более чем в 10 раз
	Модельные лопатки из сплава титана ВТ6. Испытания на электродинамическом вибростенде ВЭДС-400 (при 20 млн циклов)	Значение максимально допустимых нагрузок при [значение для необработанных лазером]	34 кгс/мм <sup>2</sup> [28 кгс/мм <sup>2</sup> ]. Увеличение на 20%.
		Увеличение количества лопаток прошедших испытания по сравнению с контрольной партией необработанных лазером	Более чем в 4 раза
Обработка сварных швов	Увеличение коррозионной стойкости (испытания в растворе 3.5% NaCl)	в 5 раз	

**Полученные результаты в мире (информация из литературных источников)**

**Усталостная прочность лопаток была увеличена в 20 раз**

**Глубина проникновения 3 мм**

**Актуальность дальнейшего исследования метода в России**

- Потребность авиастроительной отрасли в упрочнении деталей в связи с активным развитием гражданской авиации и большого плана по выпуску гражданских самолетов ТУ-214, ИЛ-96, МС-21 в России
- Наложение санкции и невозможность покупать иностранное оборудование для упрочнения деталей

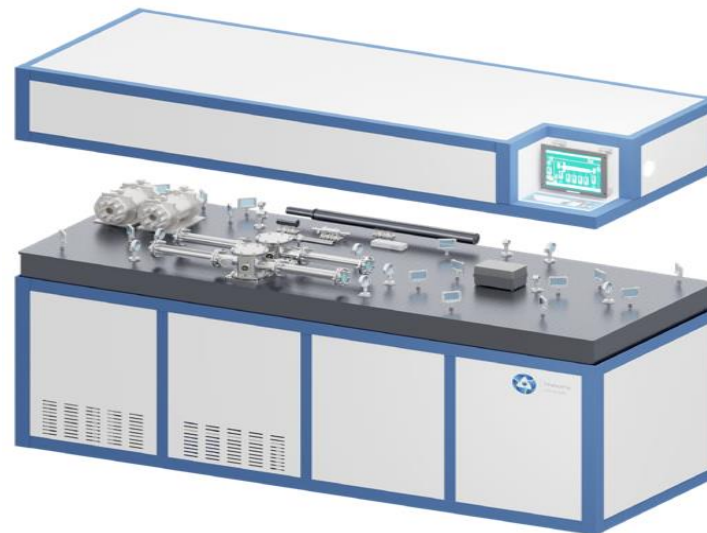
Существующий стенд для лазерного наклепа  
в АО «ГНЦ ТРИНИТИ»



Будет проводится обработка таких изделий как:

- Лопатки ГТД;
- Посадочные крюки;
- Буровые долота;
- Протезы суставов;
- Сварных швов.

Будет сделано в рамках НИОКР до 2024 года



- Улучшенная система оптической развязки лазерного излучателя от паразитного обратного излучения.
- Автоматизированная система перемещения образцов во время обработки
- Использование двух пространственных фильтров для развода пучков по осям чтобы избежать наложения
- Повышенная лазерная стойкость и качество оптического интерференционного покрытия



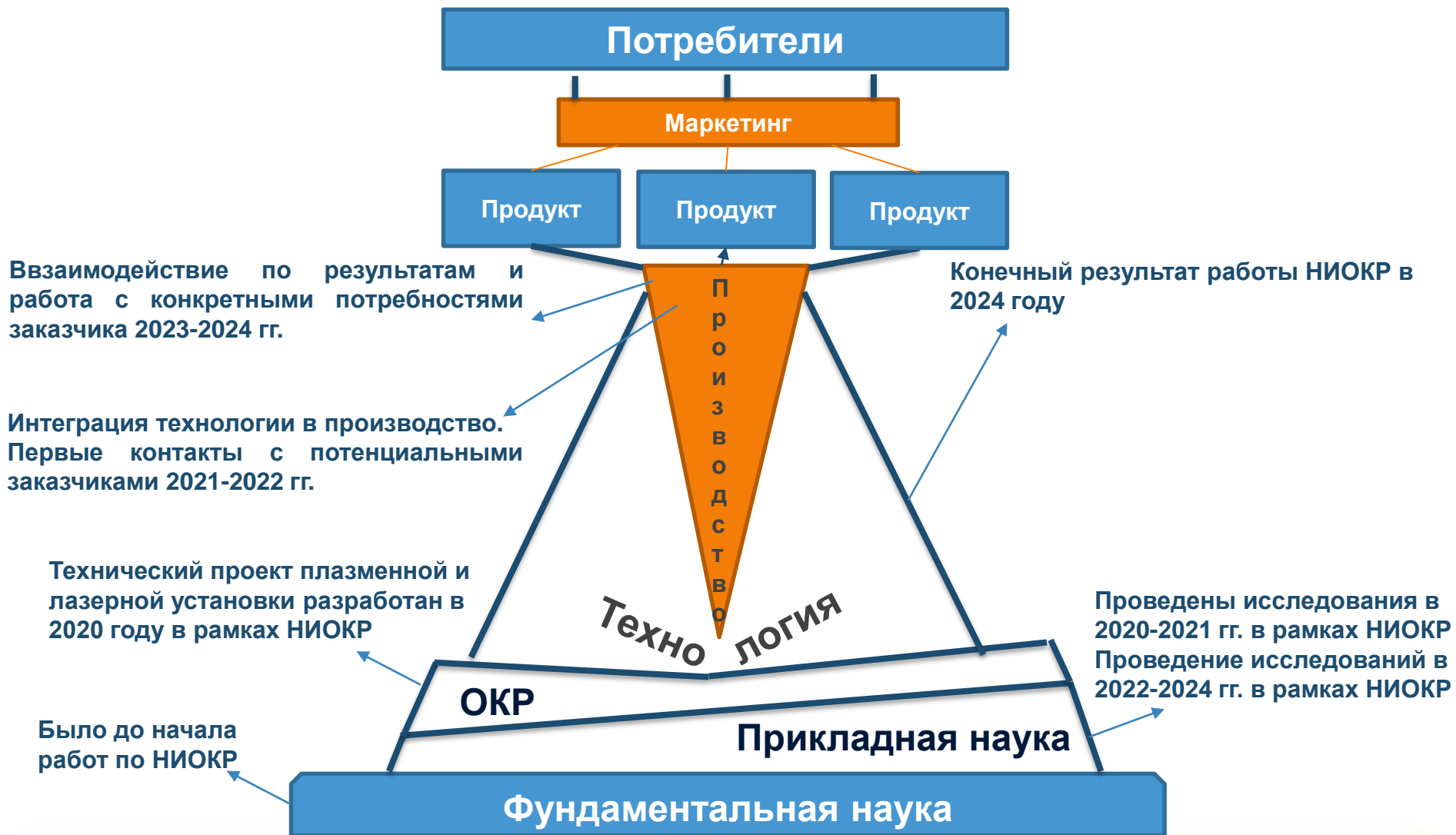
## Сравнение радиационно-пучковых технологий (1/2)

Метод обработки	Достоинства	Недостатки
Электронно-лучевое воздействие	Достаточно большая глубина обработки	Неоднородность обработки поверхности изделия из-за филаментации пучка
Ионная имплантация	Контролируемая глубина распределения и величина концентрации вводимых легирующих элементов	Обработка только той части которая находится под пучком Малая глубина проникновения ионного пучка
Низкотемпературная плазма	Возможность наносить покрытия на воздухе Возможность обработки больших площадей	Высокий уровень примесей в плазме Велика доля капельной фракции Требуется предварительное измельчение рабочего вещества
Лазерная обработка	Возможность упрочнения труднодоступных полостей и углублений Большие толщины модифицированных слоев по сравнению с ионным облучением	Неоднородность обработки (состава и структуры) Необходимость предварительного нанесения покрытий для увеличения поглотательной способности
Потоки высокотемпературной импульсной плазмы	Обработка относительно больших площадей поверхности за короткий промежуток времени Высокая однородность состава и структуры	Недостаточная изученность процесса по сравнению с другими методами

## Сравнение радиационно-пучковых технологий (2/2)

Характеристики метода	ВТИП	МИП	Ион импл	Лазер	МЭП
Экологическая чистота	+	+	+	+	+
Возможность обработки площади до 50 см <sup>2</sup> за импульс	+	+	+	-	±
Достижение микрооднородности поверхностной обработки	±	±	±	-	±
Возможность всесторонней обработки за один импульс	+	-	-	-	-
Отсутствие предварительной подготовки поверхности изделия	+	+	+	-	+
Необходимость вакуумирования изделия	-	-	-	±	+
Отсутствие образования микродуг и кратеров на поверхности	+	-	+	±	-

# Связь науки, технологии и производства



# Первые опыты по обработке реальных изделий



## Обработанные импульсной плазмой резьбовые соединения буровых труб

Сталь ХЮ850 (аналог 38ХМА) и DM950 (аналог 20ГС)



На основании проведенных исследований было установлено:

- геометрические параметры профиля резьбы после проведенной обработки не изменились и соответствуют требованиям СТП 00001-2013;
- наличие упрочненного слоя средней толщиной 8...10 мкм по всему профилю резьбы;
- твердость упрочненного слоя 54...56 HRC.

Полученные результаты удовлетворяют заданным требованиям

ОАО "Завод бурового оборудования"  
ИССЛЕДОВАНИЯ | РАЗРАБОТКИ | ПРОИЗВОДСТВО | СЕРВИС  
460026, Россия, г. Оренбург, пр. Победы, 118  
тел: +7 (3532) 756 814 | факс: +7 (3532) 756 819  
электронная почта: pochta@zbo.ru  
www.zbo.ru  
ОКПО 01423045 | ОГРН 1025601806944  
ИНН 5612002652 | КПП 561201001



OJSC "ZBO Drill Industries", Inc.  
RESEARCH | DEVELOPMENT | MANUFACTURING | SERVICE  
118, Pobedy Ave., Orenburg, 460026, Russia  
tel: +7 (3532) 756 896 | fax: +7 (3532) 756 819  
email: pochta@zbo.ru  
www.zbo.ru  
ОКПО 01423045 | ОГРН 1025601806944  
TIN 5612002652 | KPP 561201001

18.12.2014 № 0001/1010  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Генеральному директору  
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»  
Черковцу В.Е.  
108840, г. Москва, г. Троицк,  
ул. Пушкиных, владение 12

Уважаемый Владимир Евгеньевич!

Сообщаем Вам первые результаты исследования внешней поверхности ниппельной части замков из стали ХЮ850 и DM950 после обработки импульсным потоком плазмы.

На основании проведенных исследований было установлено:

- геометрические параметры профиля резьбы после проведенной обработки не изменились и соответствуют требованиям СТП 00001-2013;
- наличие упрочненного слоя средней толщиной 8...10 мкм по всему профилю резьбы;
- твердость упрочненного слоя 54...56 HRC.

Полученные результаты удовлетворяют заданным требованиям. В связи с чем, наша организация заинтересована в дальнейших экспериментах. Для полной оценки целесообразности применения данного метода обработки относительно резьбовых соединений буровых труб линейки Wireline необходимо провести дополнительные испытания на износостойкость и усталостную прочность. Кроме того, мы также заинтересованы в разработке метода обработки внутренней резьбы замковых соединений буровых труб. В связи с этим прошу Вас рассмотреть возможность продолжения совместных работ в этом направлении.

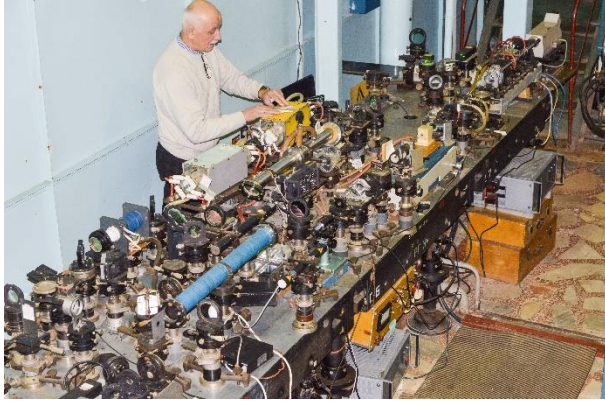
С уважением,  
И.О. Директора по исследованиям  
и разработке

А.Н. Кошкин

# Прогресс в развитии лазерно-плазменных технологических установок для увеличения усталостной прочности



Лабораторная установка «Астра» ГНЦ РФ ТРИНИТИ  
энергия импульса – 50 Дж, длительность – 16-20 нс



The Procudo 200 Laser Peening System's diode-pumped amplification setup

энергия импульса – 10 Дж; длительность – 10-15 нс;  
частота – 20 Гц; ресурс > 10<sup>9</sup> импульсов



В зарубежных странах технология доведена до серийного создания промышленных установок



MIC transportable laser system is on route to Palmdale, California for F-22 laser peening

# Дорожная карта создание технологии комплексного воздействия мощными импульсными потоками высокотемпературной плазмы и лазерного излучения



## Технология комплексного воздействия мощными импульсными потоками высокотемпературной плазмы и лазерного излучения

Установка **для лазерного наклепа**

2024

2023

**Комплексная обработка** импульсными плазменными потоками и лазерным излучением.

Исследование **коррозионной стойкости, износостойкости и усталостной прочности** после комплексной обработки

2022

Установка для **обработки изделий сложной формы** импульсными плазменными потоками

Обработка импульсными плазменными потоками и измерение **профилометрии, остаточных напряжений и микротвердости** в ШХ15, 40ХН2МА, **ВТ6, ЖС6У-ВИ**

Обработка методом **лазерного наклепа** и измерение микротвердости, профилометрии, остаточных напряжений в ШХ15, 40ХН2МА, ВТ6, ЖС6У-ВИ

2021

Исследование **коррозионной стойкости** конструкционных сталей после плазменной обработки

2020

Технический проект **установки для лазерного наклепа**

Технический проект **установки** для обработки изделий сложной формы **импульсными плазменными потоками**

Исследование **микротвердости** конструкционных сталей после плазменной обработки





**Спасибо за внимание**

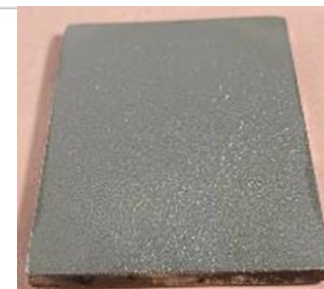
# Исследование коррозионной стойкости

## Метод потенциостатического травления



Выдержка образцов в электролите при потенциале  $-0,15\text{ В}$  в течении 5 минут, затем при  $0,1\text{ В}$  в течении 15 минут.

Рисунок 3.11 – Общий вид хронамперограмм потенциостатического травления



Исследуемый образец и стали марок: Ст45, 40Х, ШХ15, 40ХН2МА и 65Г

Электропроводящая среда: разбавленный водный раствор с NaCl и HClO4

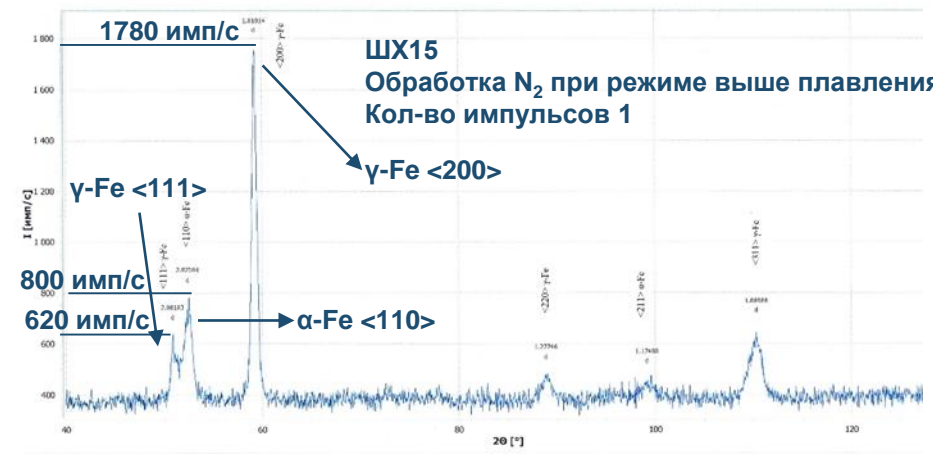
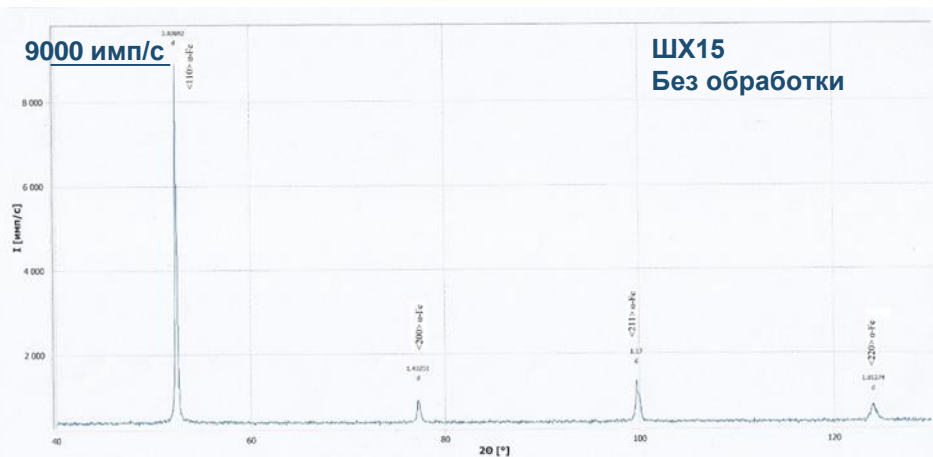
1 – подключение к рабочему электроду, 2- подключение вспомогательного электрода сравнения, 3 – подключение хлорсеребряного электрода, 4 – подключение графитового электрода, 5 – заземление, 6 – подключение к программе ES8, 7 – испытуемый образец, 8 – электролит, 9 колба

Рисунок – Схема эксперимента

# Рентгенофазовый анализ



POCATOM



# Элементный анализ модифицированного слоя в зависимости от плазмообразующего газа He и N<sub>2</sub>



El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	95.95	94.86	82.43	2.83
C	6	K-series	4.10	4.06	16.39	0.63
Mn	25	K-series	0.84	0.83	0.73	0.05
Si	14	K-series	0.26	0.26	0.44	0.04
Total:			101.15	100.00	100.00	

До обработки  
Ст45

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	96.48	94.12	82.45	2.85
C	6	K-series	3.88	3.79	15.43	0.61
Cr	24	K-series	0.96	0.94	0.88	0.06
Mn	25	K-series	0.93	0.90	0.80	0.06
Si	14	K-series	0.25	0.25	0.43	0.04
O	8	K-series	0.00	0.00	0.00	0.00
Total:			102.51	100.00	100.00	

До обработки  
40X

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	93.43	94.83	81.92	2.50
C	6	K-series	4.18	4.25	17.06	0.71
Mn	25	K-series	0.67	0.68	0.59	0.05
Si	14	K-series	0.24	0.25	0.42	0.04
Total:			98.52	100.00	100.00	

После обр-ки He  
Ст45

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	93.28	91.71	75.20	2.50
C	6	K-series	5.70	5.61	21.37	0.91
Cr	24	K-series	0.93	0.92	0.81	0.05
Mn	25	K-series	0.85	0.83	0.69	0.05
Al	13	K-series	0.38	0.38	0.64	0.05
O	8	K-series	0.32	0.31	0.90	0.10
Si	14	K-series	0.24	0.24	0.39	0.04
Total:			101.71	100.00	100.00	

После обр-ки He  
40X

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	88.34	89.70	68.83	2.37
<b>N</b>	7	K-series	<u>4.54</u>	4.61	14.12	0.72
C	6	K-series	4.37	4.44	15.84	0.73
Mn	25	K-series	0.89	0.91	0.71	0.05
Si	14	K-series	0.31	0.32	0.48	0.04
Cr	24	K-series	0.02	0.02	0.02	0.03
O	8	K-series	0.00	0.00	0.00	0.00
Total:			98.48	100.00	100.00	

После обр-ки N<sub>2</sub>  
Ст45

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	88.11	87.65	65.51	2.36
<b>N</b>	7	K-series	<u>6.61</u>	6.58	19.60	0.97
C	6	K-series	3.76	3.74	13.01	0.65
Cr	24	K-series	0.94	0.93	0.75	0.05
Mn	25	K-series	0.69	0.69	0.52	0.05
Si	14	K-series	0.32	0.32	0.47	0.04
Al	13	K-series	0.09	0.09	0.14	0.03
Total:			100.52	100.00	100.00	

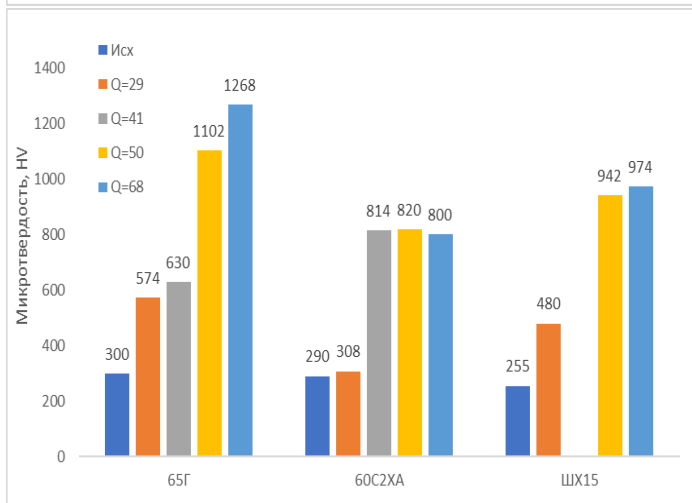
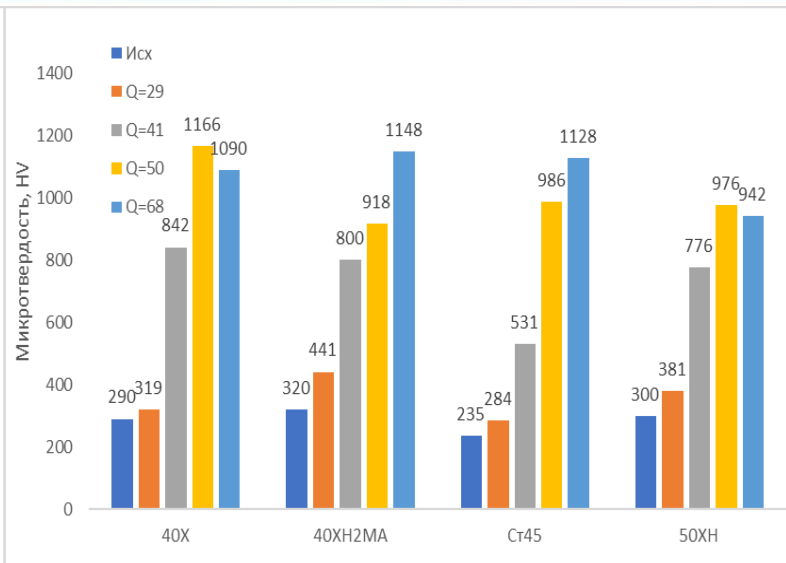
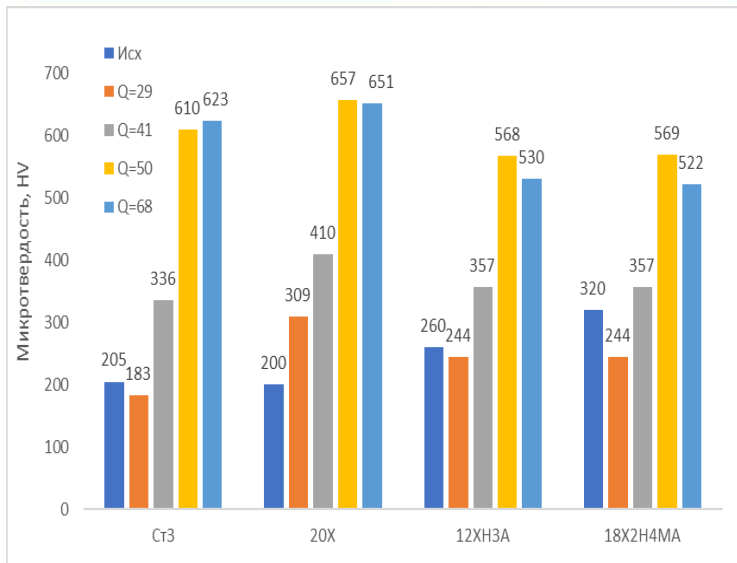
После обр-ки N<sub>2</sub>  
40X

После обработки ИПП с плазмообразующим газом N<sub>2</sub>, в поверхностном слое образуется раствор азота, формирующийся в α-Fe для Ст3 и твердый раствор Fe<sub>3</sub>N в низколегированных сталях 40X, 40XН2МА, ШХ15 и 65Г, азота в котором содержится 5.7-6.1%.

# Характеристика микротвердости модифицированного слоя



POCATOM



1. Резкий скачок увеличения микротвердости в 1.6 и более раз достигается при энергии падающего потока 50 Дж/см<sup>2</sup>;
2. Скачок увеличения микротвердости достигается путем сверхбыстрого нагрева и охлаждения поверхностного слоя с образованием структуры мартенсита закалки;
3. Максимальное увеличение микротвердости в 4.8 раз было получено у стали марки ст45, максимальное значение микротвердости было получено у марганцевой высокоуглеродистой стали 65Г;

Рисунок – Динамика изменения микротвердости при увеличении теплоты падающего потока для исследуемых конструкционных сталей

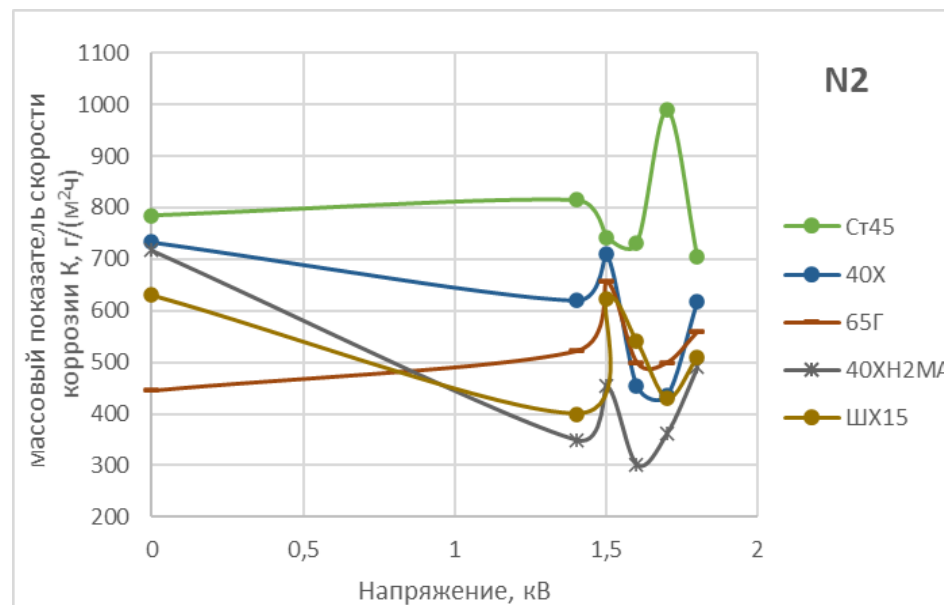
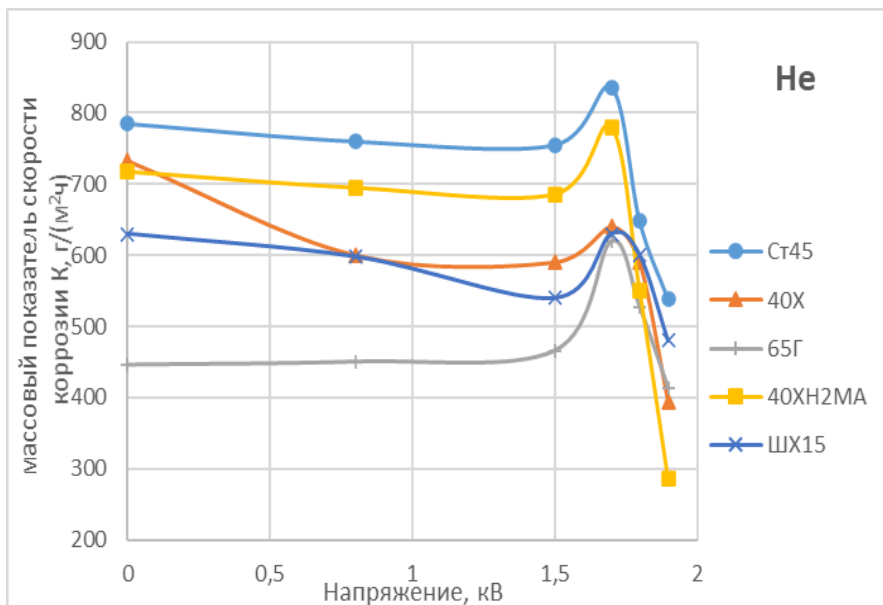


Рисунок – Зависимость массового показателя коррозии различных сталей от напряжения разряда при обработке в среде He и N<sub>2</sub> и в течении 1 мс. Нулевое напряжение соответствует интактному образцу

1. Зависимость показателя коррозии от напряжения разряда КСПУ описывается кривой с выраженным пиком ухудшения коррозионных свойств в области 1,5–1,75 кВ для гелия, причем положение пика практически не зависит от марки стали.
2. Скорость коррозии снижается при обработке гелием на высоких напряжениях для всех марок сталей 1.9 кВ.
3. Скорость коррозии снижается при обработке азотом при напряжении 1.6 кВ и увеличивается при 1.7, 1.8, 1.9 кВ для всех сталей кроме марки Ст45 для нее наилучший режим обработки при напряжении 1.7 кВ.





# Элементный анализ (продолжение)

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	90.24	93.07	82.87	2.42
C	6	K-series	3.22	3.33	13.77	0.58
Ni	28	K-series	1.36	1.40	1.18	0.07
Cr	24	K-series	0.94	0.97	0.93	0.05
Mn	25	K-series	0.83	0.85	0.77	0.05
Si	14	K-series	0.22	0.22	0.39	0.04
Mo	42	L-series	0.16	0.17	0.09	0.03
Total:			96.96	100.00	100.00	

До обработки  
40ХН2МА

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	85.28	89.40	73.92	2.29
C	6	K-series	3.72	3.90	15.01	0.67
N	7	K-series	2.08	2.18	7.17	0.41
Ni	28	K-series	1.33	1.39	1.10	0.07
Cr	24	K-series	1.05	1.10	0.98	0.06
Mn	25	K-series	0.86	0.90	0.76	0.06
Cu	29	K-series	0.51	0.53	0.39	0.05
Mo	42	L-series	0.24	0.25	0.12	0.04
Si	14	K-series	0.23	0.24	0.39	0.04
Al	13	K-series	0.09	0.09	0.16	0.03

После обр-ки N<sub>2</sub>  
режим с  
плавлением  
поверхности  
40ХН2МА  
1 импульс

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	80.73	83.34	59.27	2.16
N	7	K-series	7.26	7.49	21.25	1.05
C	6	K-series	4.76	4.92	16.26	0.77
Ni	28	K-series	1.23	1.27	0.86	0.06
Cr	24	K-series	1.01	1.04	0.80	0.06
Mn	25	K-series	0.83	0.85	0.62	0.06
Cu	29	K-series	0.43	0.44	0.28	0.04
Mo	42	L-series	0.23	0.24	0.10	0.04
Si	14	K-series	0.20	0.21	0.29	0.04
Al	13	K-series	0.18	0.19	0.28	0.04
Total:			96.87	100.00	100.00	

После обр-ки N<sub>2</sub>  
режим до  
плавления  
поверхности  
40ХН2МА  
1 импульс

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	88.14	87.13	71.66	2.36
C	6	K-series	4.43	4.37	16.73	0.74
Mn	25	K-series	2.05	2.03	1.70	0.09
Cu	29	L-series	2.03	2.01	1.45	1.20
N	7	K-series	1.92	1.90	6.22	0.38
Ni	28	K-series	1.11	1.10	0.86	0.06
Cr	24	K-series	1.09	1.08	0.95	0.07
Mo	42	L-series	0.19	0.18	0.09	0.03
Si	14	K-series	0.12	0.12	0.19	0.03
Al	13	K-series	0.09	0.09	0.15	0.03

После обр-ки N<sub>2</sub>  
режим с  
плавлением  
поверхности  
40ХН2МА  
10 импульсов

После обработки стали 40ХН2МА в режиме до плавления поверхности (до 1000 °С), в поверхностном слое концентрация N<sub>2</sub> составляет 7.26% а при увеличении температуры нагрева выше плавления поверхности снижается до 2.08%.

При увеличении количества импульсов с оплавлением поверхности увеличивается содержание Mn и Cu в поверхностном слое

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	93.85	94.05	80.42	2.51
C	6	K-series	4.56	4.57	18.18	0.76
Mn	25	K-series	0.96	0.96	0.83	0.05
Si	14	K-series	0.24	0.24	0.41	0.04
Cr	24	K-series	0.17	0.17	0.16	0.03
Total:			99.79	100.00	100.00	

После обр-ки  
воздухом,  
с плавлением  
поверхности  
Ст45  
1 импульс

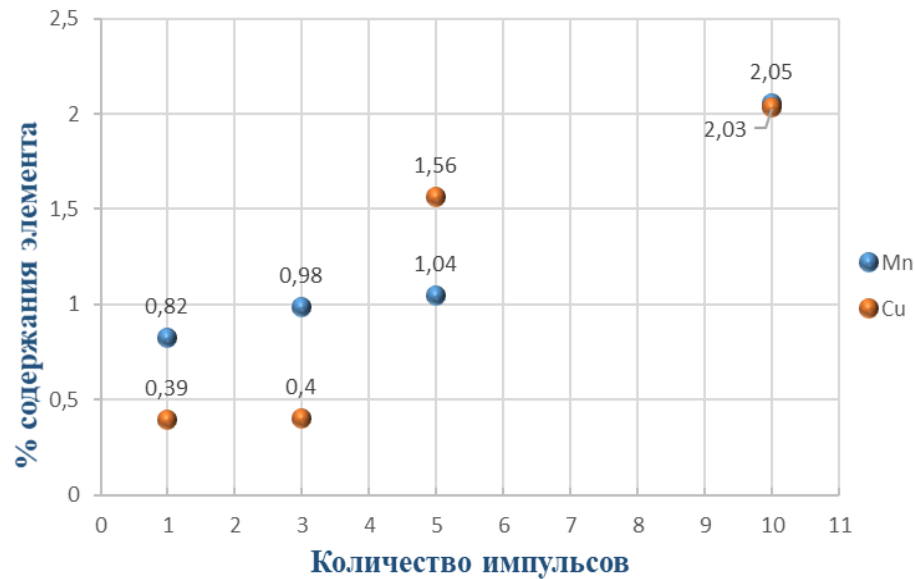


Рисунок 1 – содержание в поверхностном слое элементов Mn и Cu в зависимости от количества импульсов обработки стали 40XN2MA ИПП

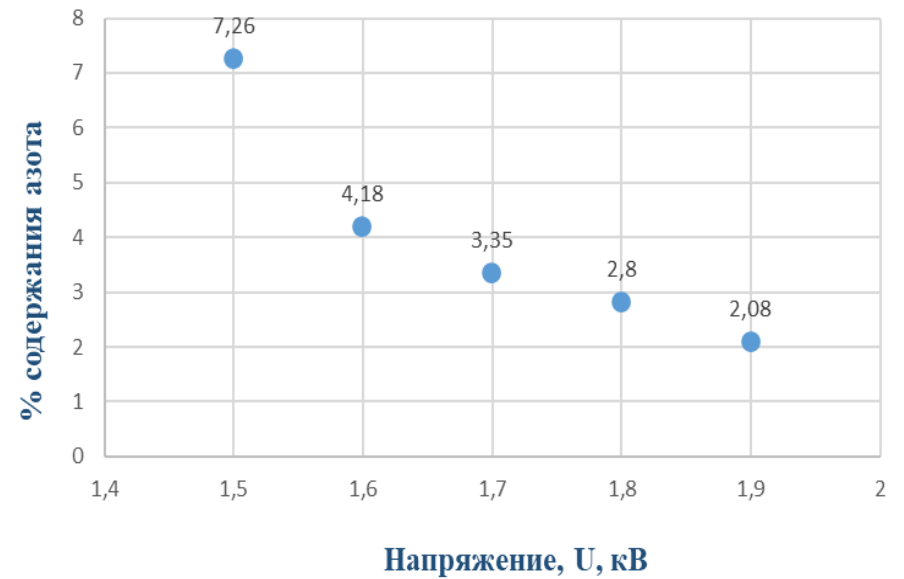


Рисунок 2 – содержание азота в стали 40XN2MA в зависимости от напряжения обработки поверхности ИПП

## Выводы

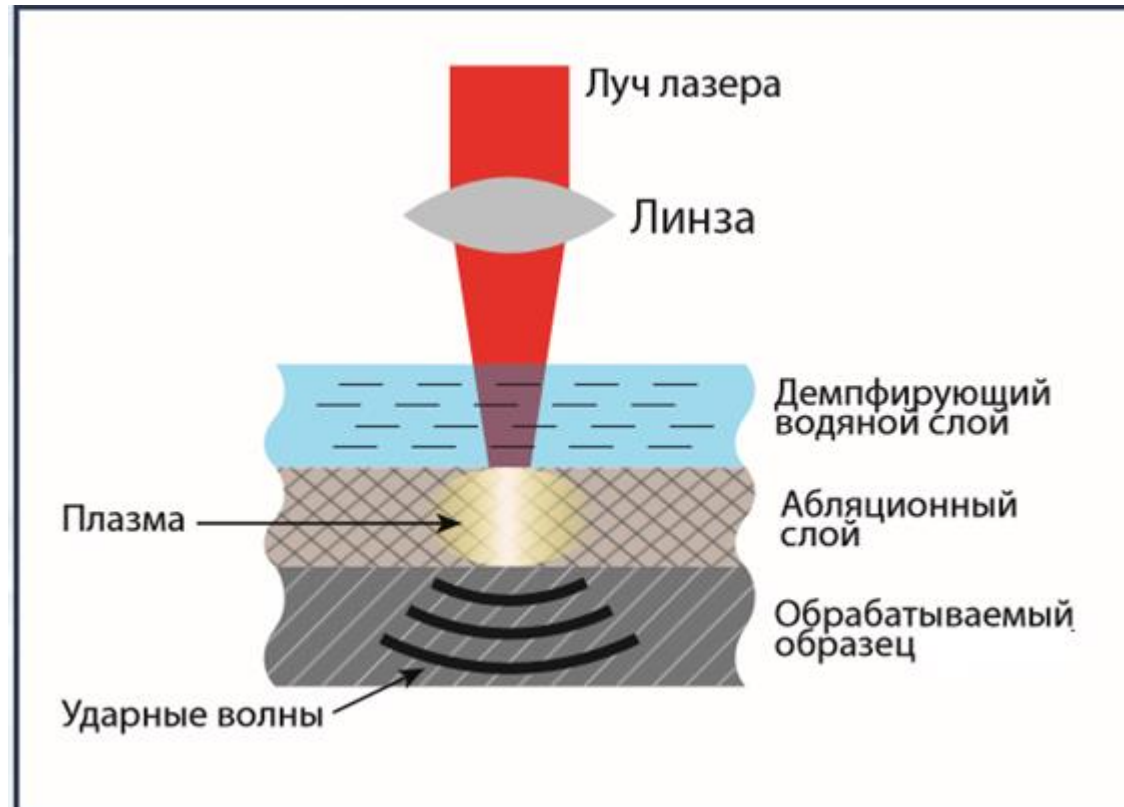
1. На элементный анализ не влияет обработка ИПП при использовании плазмообразующего газа гелий.
2. При обработке ИПП плазмообразующим газом азот, в поверхностном слое образуется раствор азота, формирующийся в  $\alpha$ -Fe и твердый раствор  $Fe_3N$
3. Содержание азота колеблется в диапазоне от 1 до 7.5 процента в зависимости от режима и марки стали.

## В планах

1. Определить глубину проникновения азота.
2. Исследовать элементный анализ в зависимости от длительности импульса от 0,1 до 5 мс.

## Достоинства

- повышение предела выносливости и увеличение износостойкости обработанных деталей,
- повышение ресурса деталей,
- сохранение свойств после нагрева в процессе эксплуатации,
- повышение микротвердости поверхности,
- отсутствие деформации деталей после обработки и исключение финишных операций,
- комнатная температура обработки, благодаря чему в металлах и сплавах не происходит структурных превращений,
- экологическая чистота,
- отсутствие рабочих газов,
- Отсутствие изотермических выдержек, а следовательно, снижение энергозатрат.



# Топография поверхности до и после обработки



РОСАТОМ

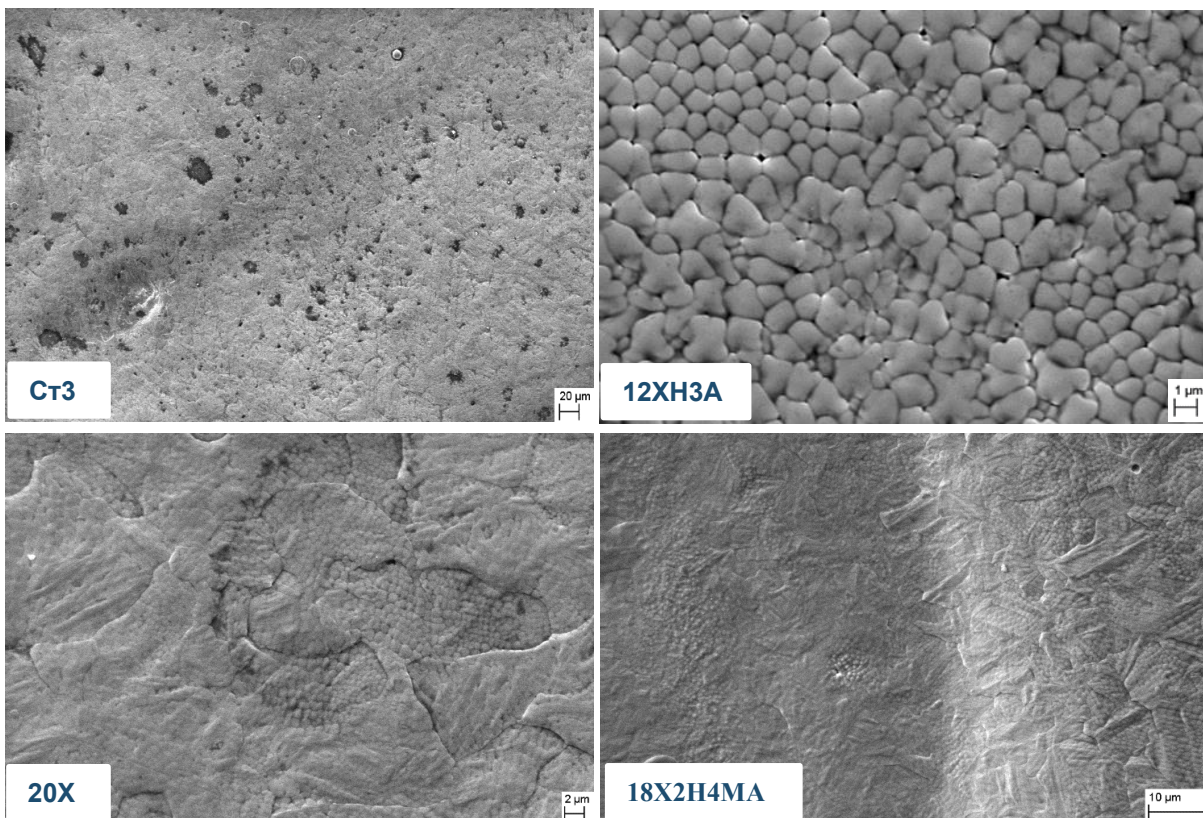


Рисунок – Фотографии с электронного микроскопа сталей после импульсной плазменной обработки

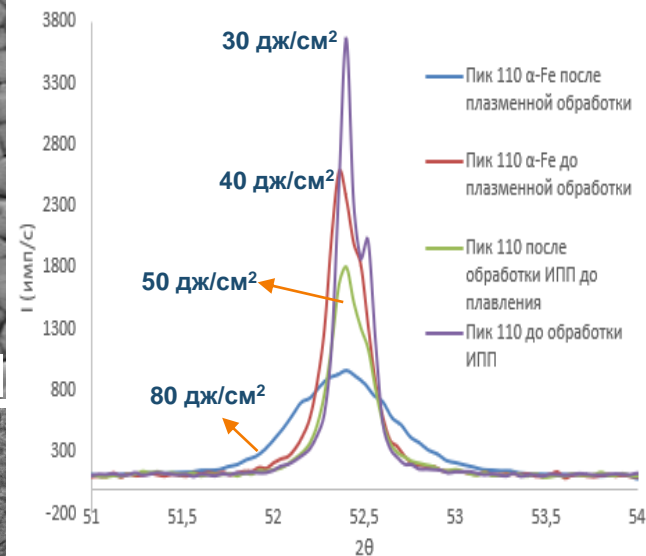


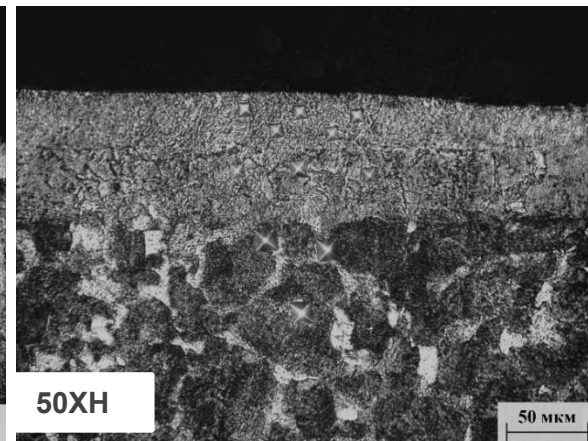
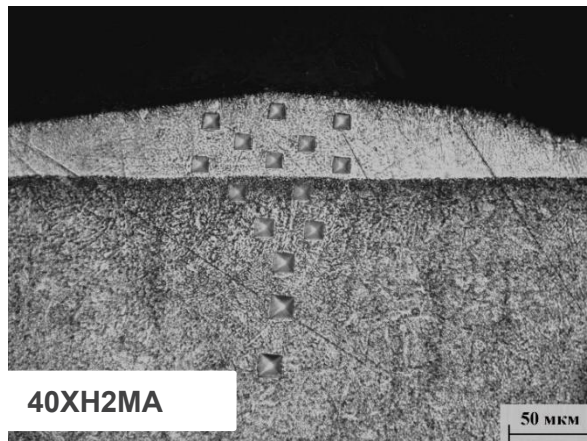
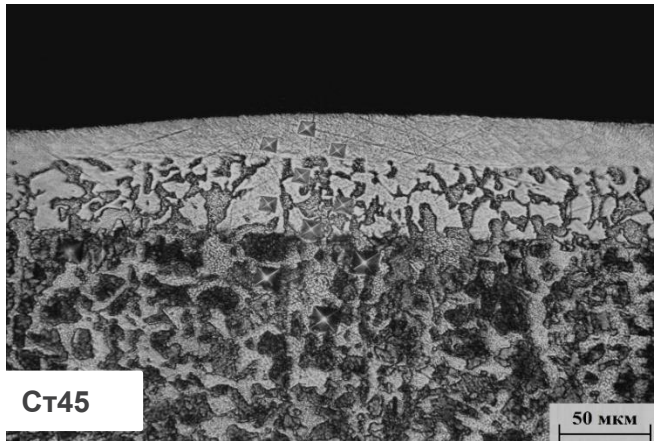
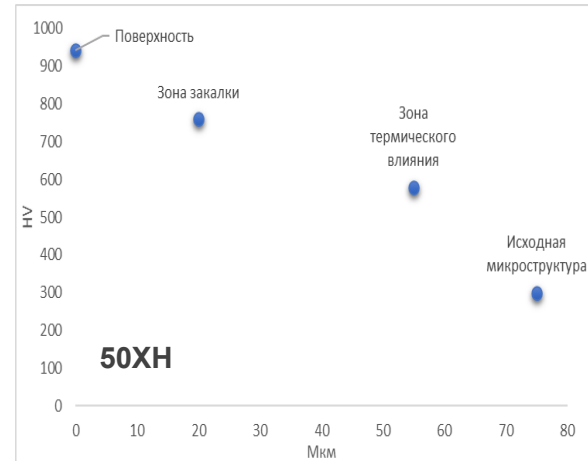
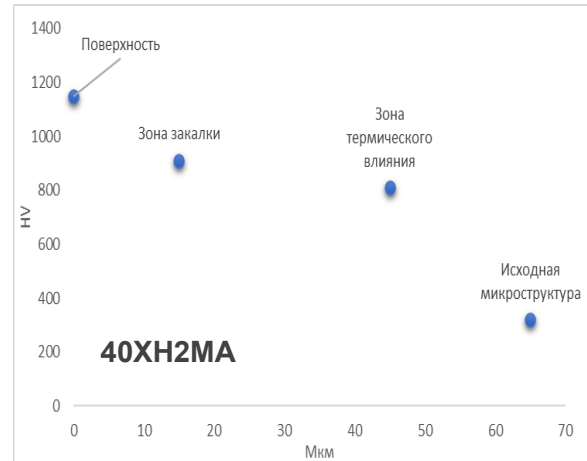
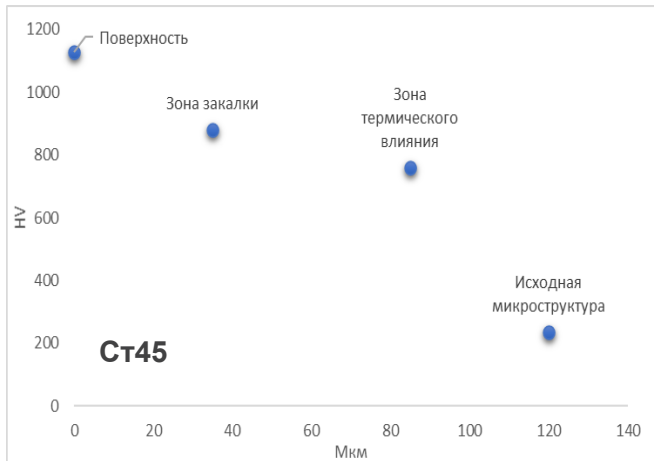
Рисунок – участок рентгенограммы марки Ст3 до и после обработки импульсной плазмой

При режимах, с увеличением энергии падающего потока на рентгенограмме видны изменения уменьшения высоты и уширения пика, что может указывать на уменьшение размеров зерна и увеличении напряжений в поверхностном слое исследуемых образцов.

Анализ полученных изображений показывает, что после обработки в режимах без оплавления значительных изменений поверхности не происходит. При обработке в режимах с оплавлением поверхности происходит сглаживание микронеровностей, и образуются столбчатые структуры. На некоторых фотографиях, к примеру в сталях Ст45 видны ямки размером от 2 до 6-8 мкм в диаметре



# Анализ поверхности углеродистых сталей после обработки ИПП



Зона закалки для углеродистых сталей по данным РФА является мелкоигльчатый мартенсит, образовавшийся в процессе высоких скоростей охлаждения с повышенной твердостью дефектов. Слабо травящийся слой затрудняет описание структуры поверхностного слоя закалки. Переходный слой в углеродистых сталях равномерный по всей длине образца.