

**Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого  
Институт Машиностроения, материалов и транспорта**

На правах рукописи

**Сюндюков  
Ильнур Салаватович**

**Повышение эксплуатационных свойств коленчатых валов методом  
плазменного напыления ПН85Ю15 и ультразвуковой обработки**

Направление подготовки: 15.06.01 «Машиностроение»

---

*Код и наименование*

Направленность: 15.06.01\_02 «Трение и износ в машинах»

---

*Код и наименование*

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Сюндюков И.С.  
Научный руководитель: профессор,  
д.т.н., Скотникова М.А.

Санкт Петербург – 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ Машиностроения  
Института ИММиТ федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ Машиностроения: – *Любомудров Сергей  
Александрович – к.т.н.,  
доцент*

Научный руководитель: – *Скотникова Маргарита  
Александровна – д.т.н.,  
профессор*

Рецензент: – *Поздняков Алексей Олегович –  
к.т.н., доцент. ФГБУН Физико-  
технический институт им. А.Ф.  
Иоффе РАН, ст.н.с.*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Коленчатый вал автомобиля, являющийся важной деталью двигателя внутреннего сгорания, создает и передает крутящий момент механизмам трансмиссии. При эксплуатации коленчатых валов, основным дефектом, приводящим к потере их работоспособности, является износ коренных и шатунных шеек.

Анализ литературных данных показывает, что наиболее эффективным методом восстановления и повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей, работающих в узлах трения скольжения, выполненных из сталей, является метод плазменного распыления порошковых (проволочных) материалов.

Процесс плазменного напыления заключается в подаче порошка или проволоки в сжатую, с высокой энтальпией и скоростью струю, в которой происходит расплавление напыляемого материала. Расплавленные частицы порошка (проволоки) с большой энергией ударяются о поверхность детали, создавая покрытие.

Структура и свойства этого покрытия отличаются от структуры литых и компактных материалов. Они зависят от размера частиц порошка, плазмообразующего газа (воздух, азот, аргон), скорости и формы истекающей струи, определяемые конструкцией плазмотрона и параметрами источника питания плазменной дуги, возможности одновременного применения послойной ультразвуковой обработки (УЗО).

Сущность УЗО заключается в деформировании расплавленных частиц до их затвердевания - получения измельченной, вплоть до аморфизированной структуры. Акустическая система ультразвуковой установки состоит из магнестрикционного преобразователя, волноводных звеньев и рабочего органа – индентора

### Цель и задачи исследования

Цель данной работы заключается в повышении износостойкости коленчатых валов методом плазменного напыления ферромагнитного порошка ПН85Ю15 с одновременной послойной ультразвуковой обработкой разной мощности.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи: провести металлографические и профилометрические исследования структуры покрытий до и после УЗО мощностью 200 и 400 Вт; установить фазовый состав и концентрационное распределение элементов в покрытиях; оценить остаточные напряжения, провести триботехнические испытания без смазки трибопар «покрытие - чугун».

### Научная новизна

1. При плазменном напылении совмещенном с УЗО мощностью 200 Вт, в отличие от покрытия без УЗО, железо из стали 45, а алюминий из покрытия взаимно диффундируют навстречу друг другу, формируя переходный слой, в

котором алюминий растворяется в железе до образования ультрамелких частиц  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  (71 ат.% Al).

2. В покрытиях, полученных методом плазменного напыления ферромагнитного порошка ПН85Ю15, совмещенного с послойной ультразвуковой обработкой мощностью 200 Вт, обнаружены структурно - фазовые превращения с образованием частиц ультрамелких сверхтвердых интерметаллидных фаз  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  обладающих высокой твердостью 11,5 ГПа.

#### **Теоретическая и практическая значимость**

1. Разработанная технология плазменного напыления порошка на основе никеля на поверхность стального коленчатого вала с дополнительной послойной ультразвуковой обработкой будет использована на машиностроительных предприятиях.
2. Предлагаемый метод напыления имеет большую практическую значимость при создании новых и восстановлении изношенных коренных и шатунных шеек коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания автомобилей.
3. Полученные результаты исследования были использованы при написании учебного пособия и курса лекций в магистратуре 15.04.01\_14 по дисциплине «Физико-химические особенности технологических процессов в машиностроении».

#### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались на:

1. International Youth Scientific and Technical Conference “Nanotechnologies in modern industry of functional materials and perspectives for development” July 26-27, 2018 Congress center of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
2. International Scientific Conference “Material Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry” MS-CAMC-2019 November 20-12, 2019 Congress center of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
3. International Scientific Conference “New Materials and Technologies in Mechanical Engineering” NMTME-2019 March 12-14, 2019 Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
4. Международная конференция «Современное машиностроение. Наука и образование» (ММЕSE-2019), 20 июня 2019 г.

Дополнительная информация о научной деятельности:

1. Получен Сертификат за секционный доклад на конференции International Scientific Conference “New Materials and Technologies in Mechanical Engineering” NMTME-2019 March 12-14, 2019 Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
2. Получен Сертификат за секционный доклад на конференции International Youth Scientific and Technical Conference “Nanotechnologies in modern industry of functional materials and perspectives for development” July 26-27, 2018 Congress center of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
3. Проводил испытания в рамках хозяйственного договора СПбПУ № 143364101 с Торгово-промышленной компанией "СИНТЕЗ", г. Ростов на Дону «Сравнительное исследование трибологических свойств смазочных

материалов после добавления модификаторов с разной концентрацией и после разных технологических режимов изготовления».

### **Публикации**

Основные результаты исследований были опубликованы в 5 рецензируемых статьях, в том числе: в 3-х изданных в журналах, индексируемых в Scopus, Web of Science и в 2-х статьях в журналах, индексируемых в РИНЦ. Получено Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Представление научного доклада: основные положения**

1. Результаты металлографических и профилометрических исследований структуры покрытий.
2. Результаты микрорентгеноспектральных исследований распределения химических элементов в покрытиях.
3. Рентгеноструктурные исследования фаз и внутренних напряжений покрытий.
4. Результаты триботехнических испытаний покрытий.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**1. Объектом исследования** данной работы является коленчатый вал автомобиля. **Предмет исследования** - повышение износостойкости коленчатых валов методом плазменного напыления порошка ПН85Ю15 с одновременной послойной ультразвуковой обработкой разной мощности.

### **2. Результаты и их обсуждение**

#### **2.1. Методика и материалы**

В данной работе применяли метод плазменного напыления порошка, совмещенного с послойной ультразвуковой обработкой (УЗО) мощностью 200 и 400 Вт. На поверхность образцов из стали 45 напыляли порошок на основе никеля ПН85Ю15 (84%Ni, 15%Al, 0.2%Fe), обладающий хорошими магнитострикционными, механическими и антикоррозионными свойствами.

Схема процесса напыления покрытия представлена на рисунке 1.

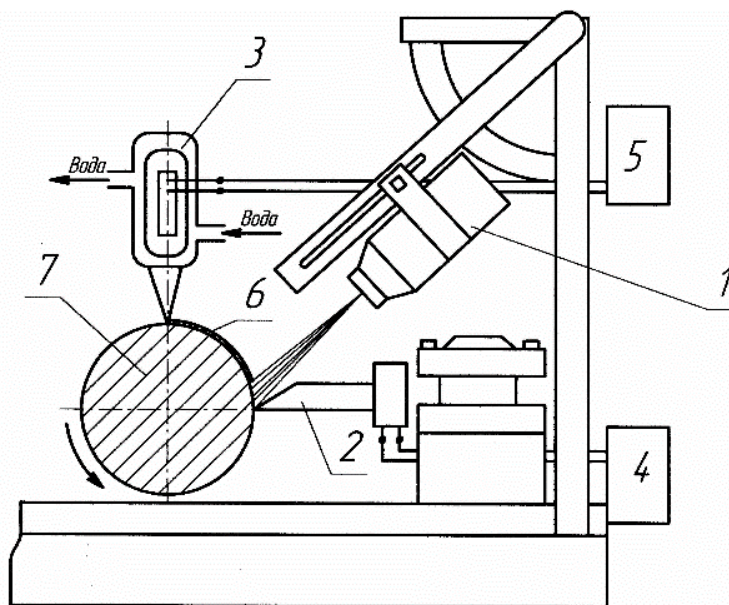
Рабочие характеристики плазматрона (1): напряжение 320 В; скорость струи 800 м/с; плазмообразующий газ – аргон; скорость вращения кольца 40 об/мин. Расплавленные в плазменной струе частицы, наносились на деталь (7), где они слой за слоем обрабатывались индентором (2) до их застывания. Прижим индентора изменялся от 5 до 10 кг. УЗО производилась на установке УЗГ-10 (мощность – 10 кВт, частота – 22 кГц, амплитуда – 10-20 А.

Триботехнические испытания без смазки трибопар «покрытие - чугун» проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме «Ролик – Ролик». Частота вращения нижнего ролика 300 об/мин, нагрузка на верхний ролик 25 кгс, время испытания 20 мин.

Триботехнические испытания в масле Лукойл Luxe 5W40 трибопар «покрытие – бронза БрАЖ9-4» проводили на машине трения СМЦ-2 по

схеме «Ролик – Ролик». Частота вращения нижнего ролика 300 об/мин, нагрузка на верхний ролик 10 и 30 кгс, время испытания 2 часа.

Результаты оценивали на основании трехкратных измерений. Определялись следующие характеристики: момент и коэффициент трения, линейный износ и параметры шероховатости образцов с помощью Профилограф-профилометра Mahr Surf PS-1.



**Рис. 1.** Схема процесса напыления с послойной ультразвуковой обработкой:  
1 – плазмотрон; 2 – индентор; 3 – ультразвуковая головка; 4,5 – ультразвуковой генератор;  
6 – напылённое покрытие; 7 – деталь

Рентгеноструктурный анализ фазового состава покрытий проводили на дифрактометре "Rotaflex" с использованием электронной картотеки JCPDS.

Микрорентгеноспектральный анализ (исследование концентрационного распределения элементов в покрытии) осуществляли на микроанализаторе «Самбах микро», оснащённом энергодисперсионным спектрометром «INCA ENERGY 350», при энергии электронов зонда 15 кэВ. Локальность определения 0,3 мкм.

Остаточные напряжения измеряли с помощью резистивного электроконтактного метода неразрушающего контроля на приборе СИТОН-ТЕСТ. Точность определения глубины залегания остаточных напряжений составляла  $\pm 1$  мкм, погрешность определения остаточных напряжений составляла 20 МПа.

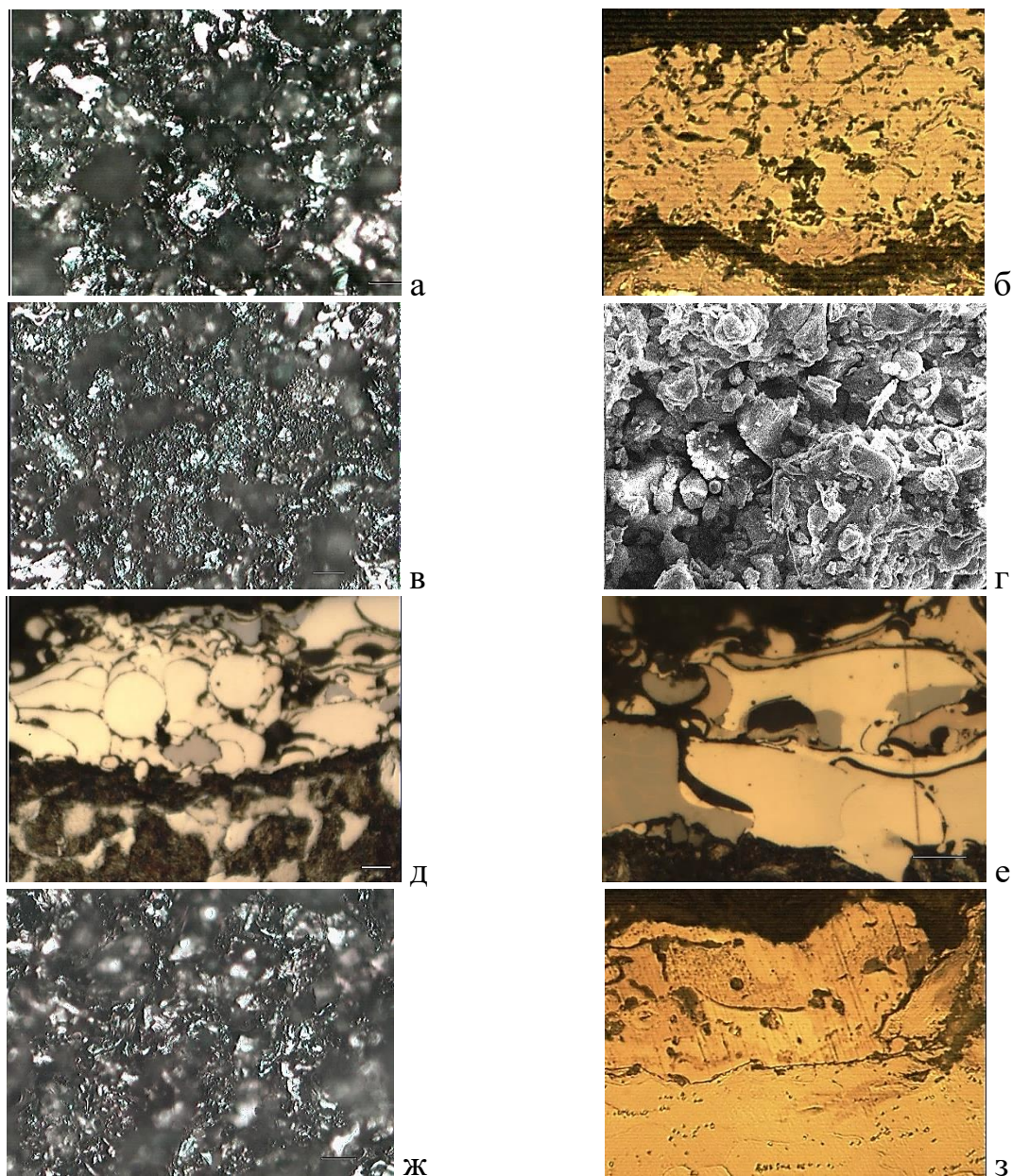
Металлографические исследования при увеличении от  $\times 100$  до  $\times 1000$  крат проводились при помощи микровизора отраженного света  $\mu$ Vizo-MET, микроскопа серии IM7000 MEIJИ TECHNO, со встроенным Анализатором изображений Thixomet.

Измерение микротвёрдости листового металла по методу Виккерса проводили на автоматическом твердомере FUTURE-TECH (Япония).

## 2.2. Металлографические и профилометрические исследования структуры покрытий.

Проводили металлографические и профилометрические исследования структуры покрытий, нанесенных на образцы из стали 45 методом плазменного напыления порошка ПН85Ю15, до и после совмещенной с послойной ультразвуковой обработкой (УЗО) мощностью 200 и 400 Вт.

Как видно из фотографий (рис. 2, а, б), близи пятна напыления без УЗО, формируется рыхлое и адгезионно нестойкое покрытие толщиной ~ 116 мкм из крупных расплавленных частицы размером от 190 до 1100 мкм.



**Рис. 2.** Металлографические изображения структуры покрытий ПН85Ю15 в поверхностном слое образцов из стали 45 (а, в, г, ж) и на их поперечных сечениях (б, д, е, з), без узо (а, б) и с узо мощностью 200 Вт (в, г, д, е), 400 Вт (ж, з).  
x 200 (а, в, ж); x 400 (б); x 500 (д); x 1010 (г, е, з)

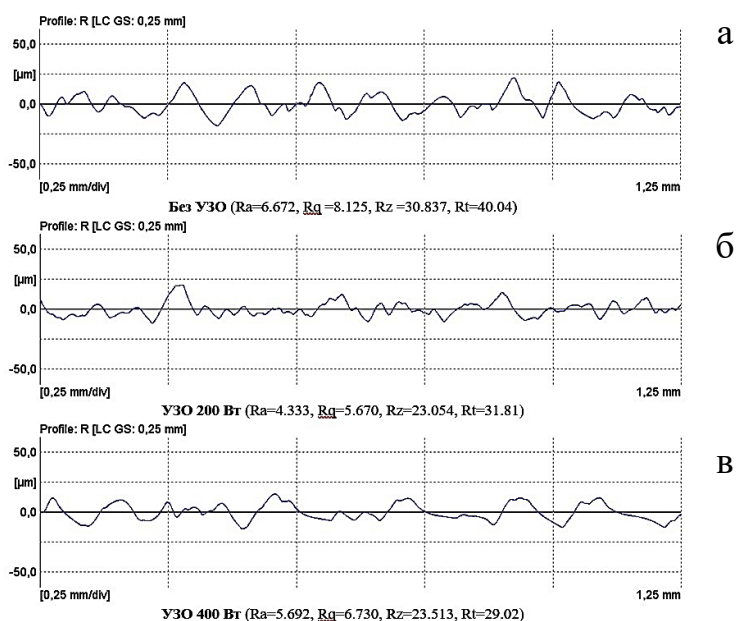
Покрытие из ферромагнитного порошка, совмещенное с послойной УЗО мощностью 200 Вт (рис. 2, в, г, д, е) толщиной  $\sim 82$  мкм имело хорошее сцепление с металлом основы, сталью 45 и было сформировано из двух видов частиц, вероятно, с разным температурным интервалом их формирования: крупных со средним размером 800 мкм и мелких частиц размером 0,5...10 мкм, которые заполняли неровные участки (рис. 2, в, г, д). При этом уменьшалась рыхлость поверхности.

С увеличением мощности послойной ультразвуковой обработкой до 400 Вт, крупные расплавленные частицы размером от 180 до 970 мкм формировали покрытие (рис. 2, ж, з) толщиной  $\sim 46$  мкм, которое имело хорошее сцепление с металлом основы.

Результаты, полученные с помощью оптической и электронной микроскопии, полностью согласовались с профилометрическими исследованиями структуры поверхностей покрытий (см. табл.1, рис. 3).

**Таблица 1.** Параметры шероховатости покрытий ПН85Ю15 в паре с чугуном после испытаний при нагрузке 25 кгс без масла

Марка покрытия	Режим напыления покрытия с УЗО	Ra	Rz	Rq
ПН85Ю15	Без УЗО	6.672	30.837	8.125
ПН85Ю15	УЗО 200 Вт	4.333	23.054	5.670
ПН85Ю15	УЗО 400 Вт	5.692	23.513	6.730



**Рис. 3.** Параметры шероховатости покрытий ПН85Ю15 в поверхностном слое образцов без УЗО (а) и с УЗО мощностью 200 Вт (б), 400 Вт (в).

Основные параметры шероховатости: среднее арифметическое отклонение профиля Ra; высота неровностей профиля по десяти точкам Rz; среднее квадратическое отклонение профиля Rq подтвердили относительное уменьшение шероховатость поверхности покрытия из ферромагнитного порошка, совмещенного с послойной УЗО мощностью 200 Вт.

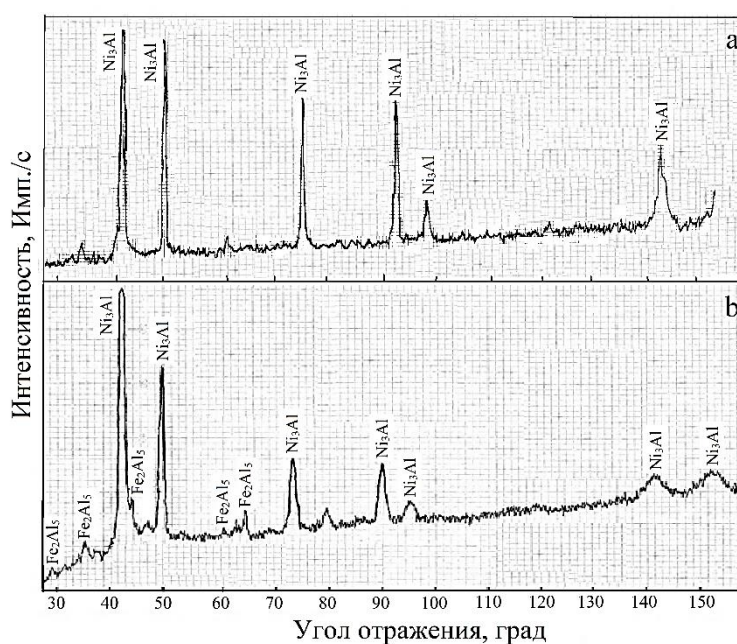
На основании полученных результатов, можно заключить, что покрытия, полученные методом плазменного напыления ферромагнитного порошка, совмещенного с послойной ультразвуковой обработкой, по сравнению с покрытием без УЗО, обладает более высоким сцеплением с металлом основы и достаточную пористость, которая при работе со смазкой, обеспечит коленчатому валу повышенную смазочную способность.

Кроме того, в покрытиях, полученных методом послойной УЗО мощностью 200 Вт, формируется двухкомпонентная структура из двух типов гранул – крупных (~800 мкм) и мелких (~4 мкм), которые заполняют несплошности поверхности и обеспечит коленчатому валу не только повышенную смазочную способность, но и адгезионную прочность.

### 2.3. Рентгеноструктурные исследования фаз и внутренних напряжений покрытий.

Проводили рентгеноструктурные исследования фазового состава покрытий, нанесенных на образцы из стали 45 методом плазменного напыления порошка ПН85Ю15, до и после совмещенной с послойной ультразвуковой обработкой (УЗО) мощностью 200 и 400 Вт.

В покрытие, сформированном без УЗО (рис. 4, а), подтвердили наличие на поверхности стали 45 соединения на основе никеля  $Ni_3Al$ .



**Рис. 4.** Результаты рентгеноструктурного анализа материала покрытия ПН85Ю15: а) до; б) после послойной ультразвуковой обработки мощностью 200 Вт.

После ультразвуковой обработки в покрытиях была обнаружена вторая фаза  $Fe_2Al_5$  (рис. 4, б). При этом, дифракционные линии соединения  $Ni_3Al$  на основе никеля были значительно уширены, что свидетельствует о появлении в покрытии значительных внутренних напряжений.

Остаточные напряжения покрытий до и после УЗО измеряли с помощью резистивного электроконтактного метода неразрушающего

контроля на приборе СИТОН-ТЕСТ (рис. 5). Как видно из полученных результатов, покрытия, полученные методом плазменного напыления, совмещенного с послойной ультразвуковой обработкой, по сравнению с покрытием без УЗО, обладали значительными благоприятными напряжениями сжатия. Это может способствовать не только к упрочнению поверхности, но и к повышению адгезионной прочности и износостойкости покрытия.

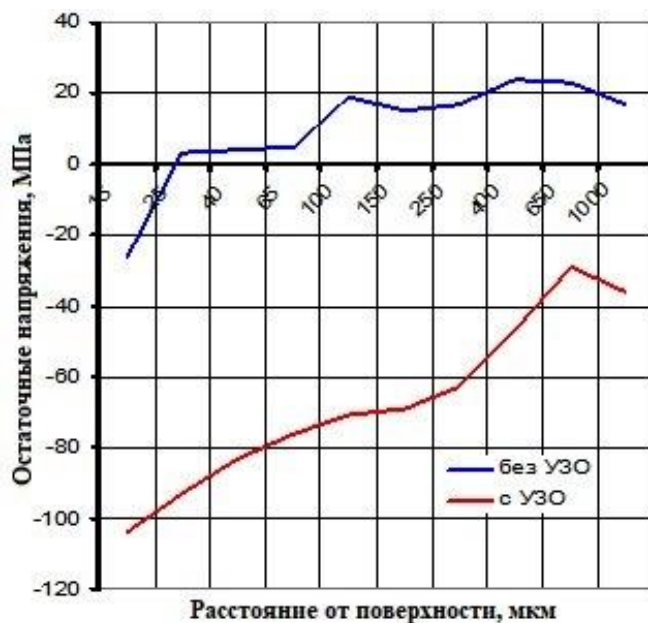


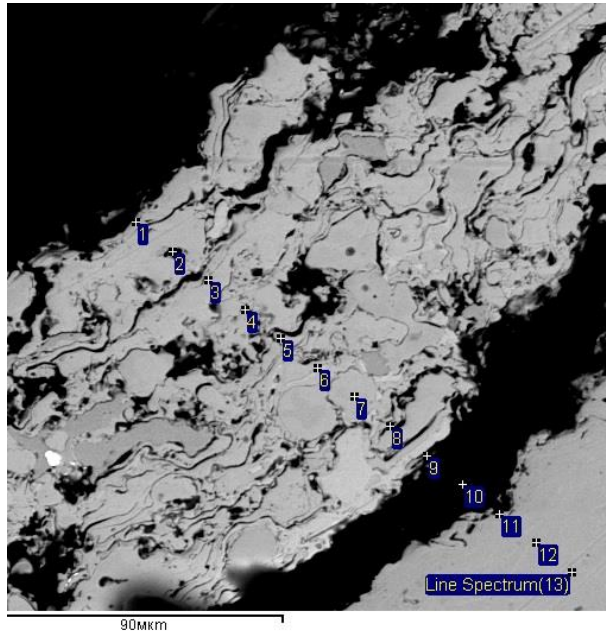
Рис. 5. Сравнительные диаграммы растягивающих и сжимающих остаточных напряжений покрытий, напыленных до и после УЗО

#### 2.4. Микрорентгеноспектральные исследования распределения химических элементов в покрытиях.

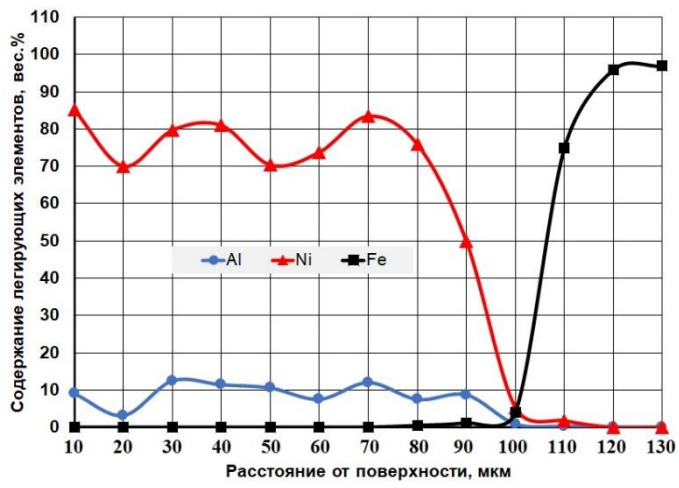
Проводили микрорентгеноспектральные исследования распределения химических элементов (Ni, Al, Fe) в покрытиях, нанесенных на образцы из стали 45 методом плазменного напыления порошка ПН85Ю15, до и после ультразвуковой обработкой (УЗО) мощностью 200 и 400 Вт.

Как видно из фотографий (рис. 6, а, б), близи пятна напыления без УЗО, формируется рыхлое и адгезионно нестойкое покрытие толщиной ~ 120 мкм.

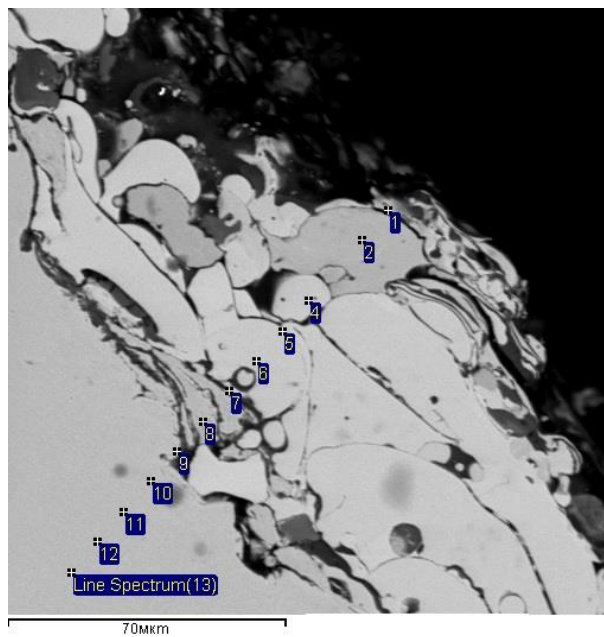
Железо из стали 45, а никель с алюминием из покрытия взаимно диффундируют навстречу друг другу, формируя переходный слой, который может отвечать за адгезионную прочность покрытия. Как видно из рисунка 5.б, на расстоянии от поверхности ~100 мкм, в покрытии происходит резкое снижение содержания всех элементов, что привело к падению прочности и формированию пограничной трещины.



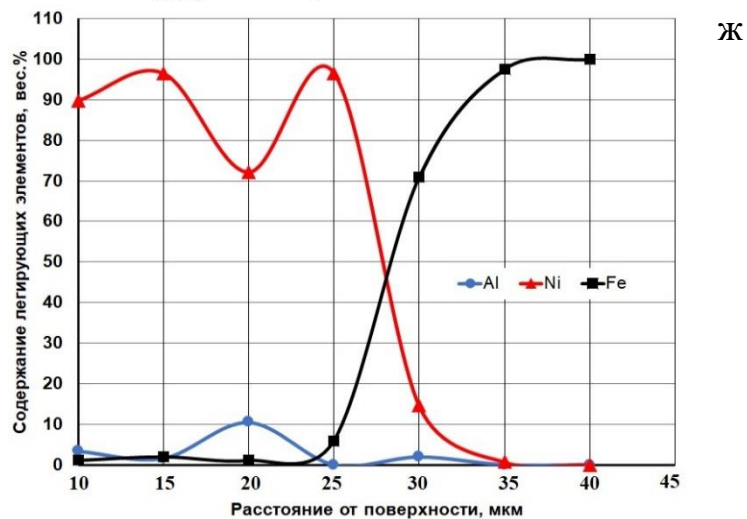
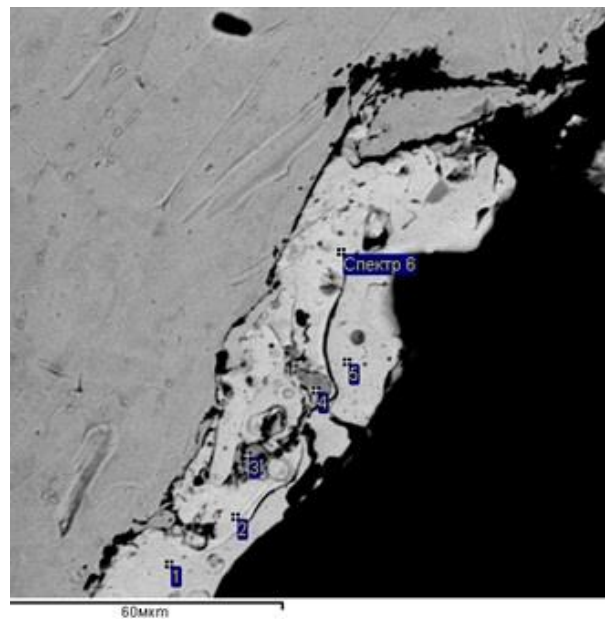
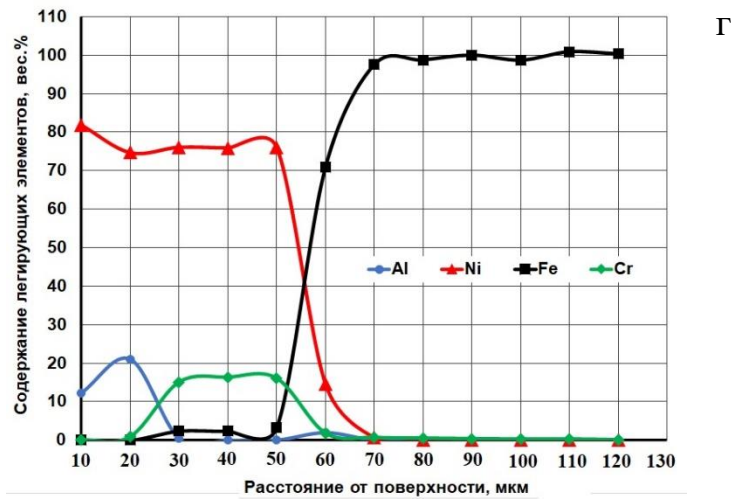
а



б



в



**Рис. 6.** Результаты микрорентгеноспектрального анализа материала покрытия ПН85Ю15: (а, б) до; и после послойной ультразвуковой обработки мощностью (в, г) 200 Вт; (д, ж) 400 Вт.

На рисунке б, в, г представлено покрытие из ферромагнитного порошка, полученное с применением УЗО мощностью 200 Вт. В приграничной зоне, на

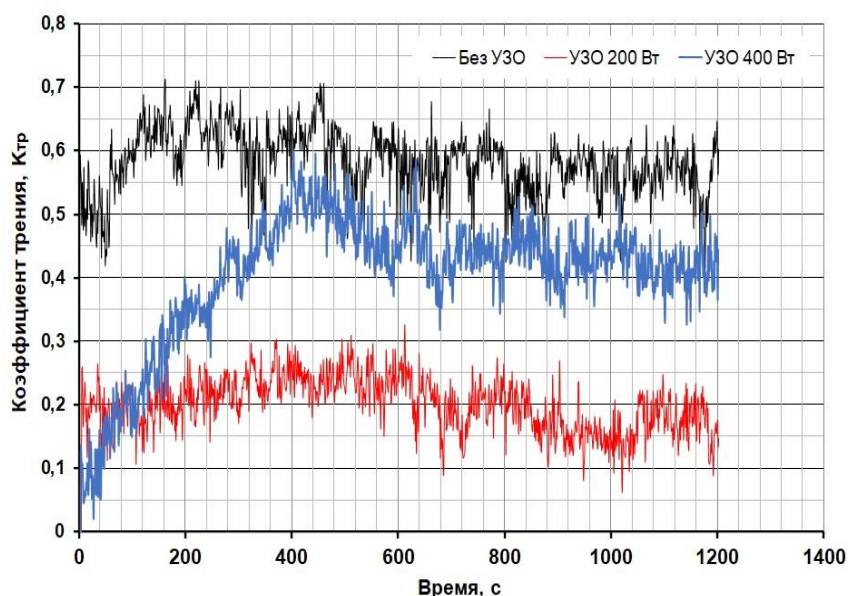
расстоянии от поверхности  $\sim 60$  мкм, в покрытии происходило резкое снижение содержания Ni, Al и одновременный переход из стали 45 элементов Fe и Cr, что обеспечивало покрытие хорошее сцепление с металлом основы.

На рисунке 6.д, ж представлено покрытие, полученное с применением УЗО мощностью 400 Вт. Граница резкого снижения содержания Ni, Al и одновременного перехода из стали 45 элемента Fe, оказалась на расстоянии от поверхности  $\sim 30$  мкм.

Следует отметить, что уменьшение содержания элемента Al в покрытиях, полученных с применением УЗО, согласуется с полученными результатами об изменении фазового состава и формировании мелких ( $\sim 7$  мкм) частиц  $Fe_2Al_5$ , которые заполняли неровные участки (рис. 6, в). При этом уменьшалась рыхлость поверхности.

## 2.5. Триботехнические исследования покрытий.

На рисунке 7 представлены сводные графики изменения во времени коэффициента трения при испытании на износ пары «покрытие – чугун» до и после послойной УЗО мощностью 200 Вт и 400 Вт.



**Рис. 7.** Триботехнические испытания на износ покрытий ПН85Ю15 в паре с чугуном без смазки при нагрузке 25 кгс: до и после послойной УЗО мощностью 200 Вт и 400 Вт

Нагрузку схватывания определяли по скачку момента трения, для чего через каждые 15 мин нагрузку увеличивали на 25 кг в диапазоне от 25-400 кг.

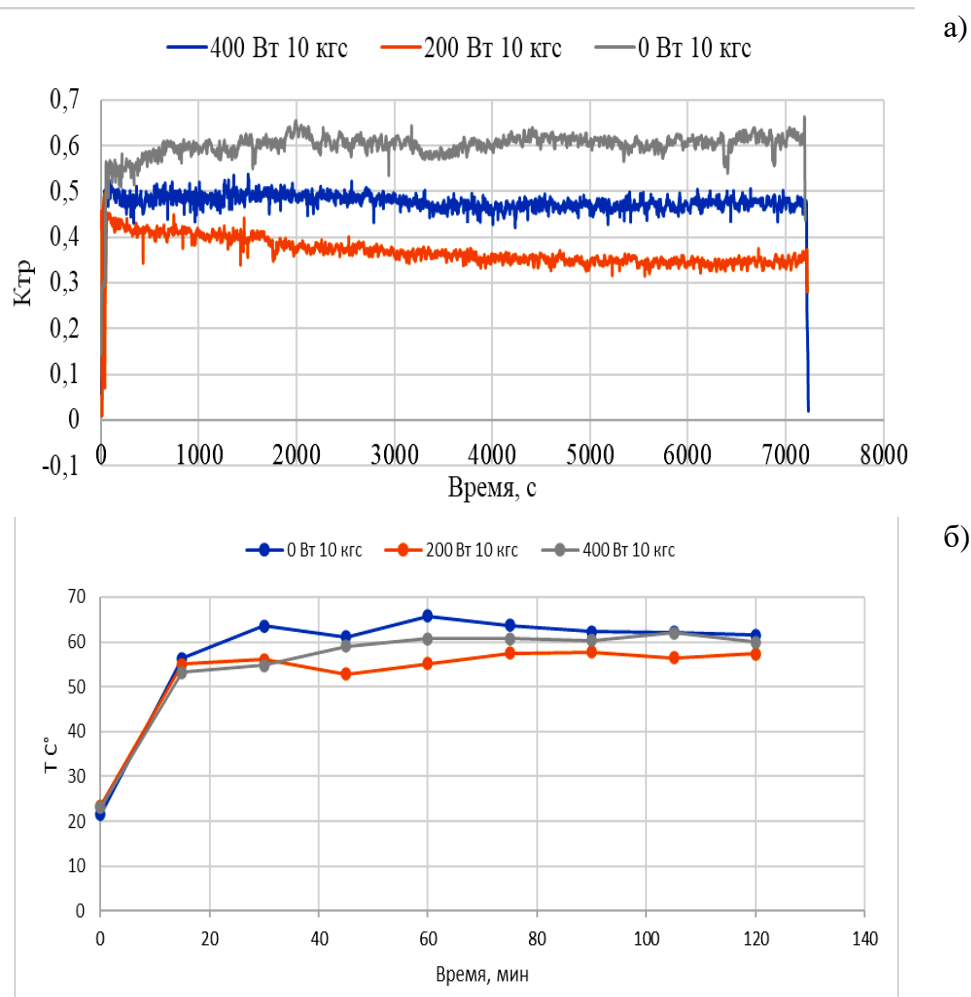
Результаты триботехнических испытаний без смазки на износостойкость и нагрузку схватывания позволили заключить, что послойная ультразвуковая обработка (УЗО) материала покрытия ПН85Ю15, по сравнению с без УЗО, привела к снижению в 3 раза коэффициента трения (с 0,55 до 0,16), в 2 раза линейного износа (с 4,2 до 1,8) мкм и к повышению в 2 раза нагрузки схватывания от 150 до 300 кгс (см. табл.2).

**Таблица 2.** Триботехнические свойства покрытия ПН85Ю15 в паре с чугуном без смазки при нагрузке 25 кгс: до и после послойной УЗО мощностью 200 Вт и 400 Вт.

Марка покрытия	Режим напыления покрытия с УЗО	Коэффициент трения, Ктр	Линейный износ, мкм	Нагрузка схватывания, кгс
ПН85Ю15	Без УЗО	0,55	4,2	150
ПН85Ю15	УЗО 200 Вт	0,16	1,8	300
ПН85Ю15	УЗО 400 Вт	0,41	2,8	300

В работе также были изучены триботехнические свойства покрытий ПН85Ю15 в паре с бронзой при испытании в синтетическом масле Лукойл Lухе 5W40 при нагрузке 10 кгс. Такие пары трения реально используются при эксплуатации двигателя внутреннего сгорания «Коренные/шатунные шейки с ПН85Ю15 покрытием – Вкладыш бронзовый».

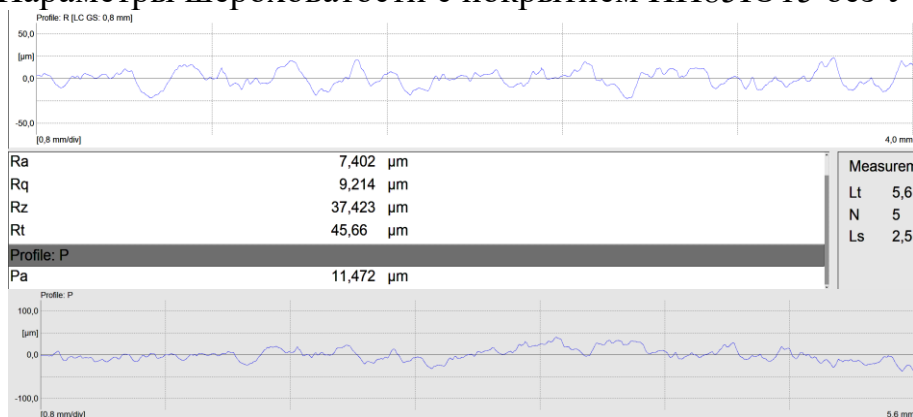
На рисунке 8 представлены графики изменения во времени коэффициента трения (рис. 8, а) и контактной температуры (рис. 8, б) при испытании на износ пары «Покрытие – Бронза» до и после послойной УЗО мощностью 200 Вт и 400 Вт при нагрузке 10 кгс.



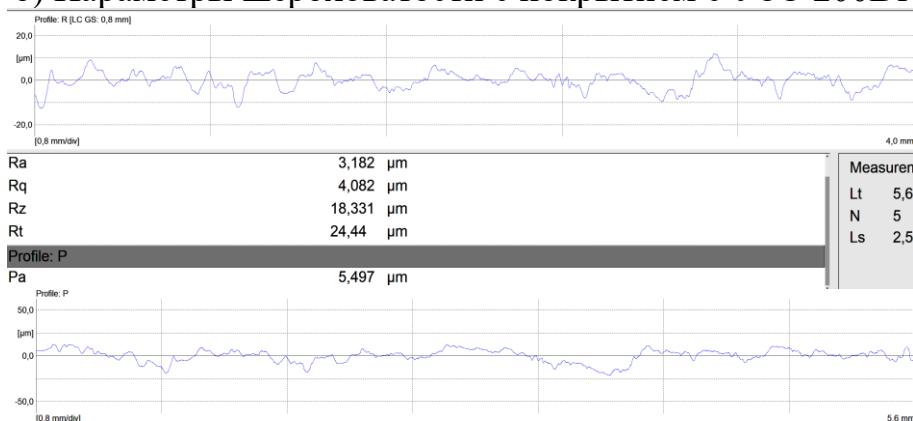
**Рис. 8.** Триботехнические свойства покрытия ПН85Ю15 в паре с бронзой в масле Лукойл Lухе 5W40 при нагрузке 25 кгс, до и после послойной УЗО мощностью 200 Вт и 400 Вт: коэффициента трения (а); контактной температуры (б).

На рисунке 9 и в таблице 3 представлены параметры шероховатости покрытий после испытаний.

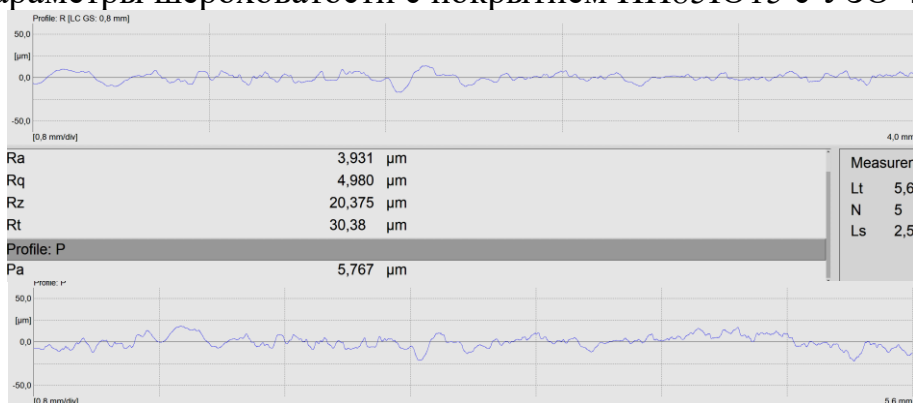
а) Параметры шероховатости с покрытием ПН85Ю15 без УЗО.



б) Параметры шероховатости с покрытием с УЗО 200Вт



в) Параметры шероховатости с покрытием ПН85Ю15 с УЗО 400Вт

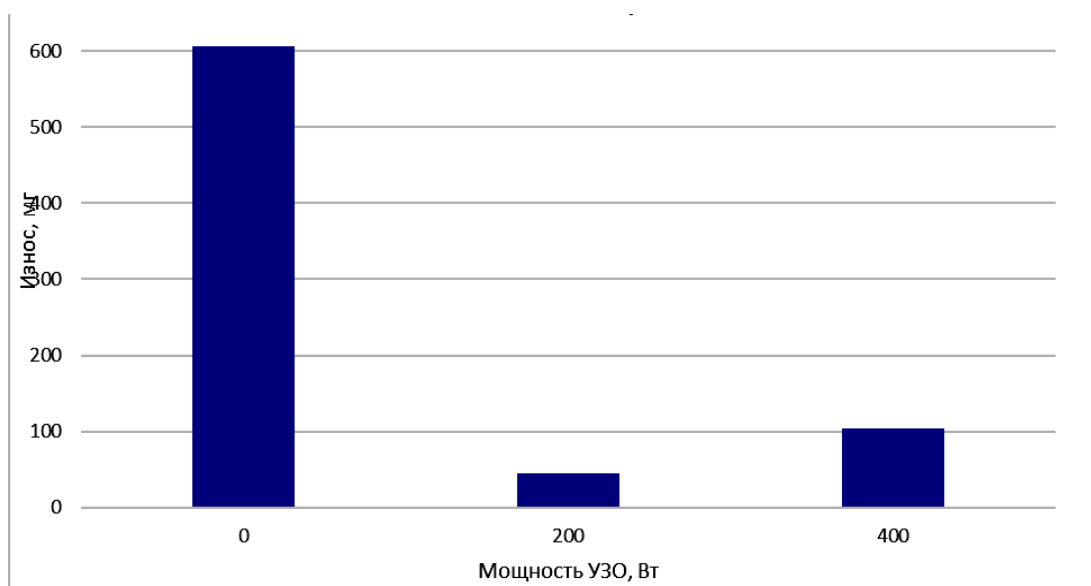


**Рис. 9.** Параметры шероховатости после испытаний на износ покрытий ПН85Ю15 в масле Лукойл Luxe 5W40 при нагрузке 10 кгс: до и после УЗО мощностью 200 Вт и 400 Вт

**Таблица 3.** Параметры шероховатости покрытий ПН85Ю15 в паре с бронзой после испытаний в масле Лукойл Luxe 5W40 при нагрузке 10 кгс: до и после послыной УЗО мощностью 200 Вт и 400 Вт.

Марка покрытия	Режим напыления покрытия с УЗО	Ra	Rz	Rq
ПН85Ю15	Без УЗО	7,402	37,423	9,214
ПН85Ю15	УЗО 200 Вт	3,182	18,331	4,082
ПН85Ю15	УЗО 400 Вт	3,931	29,375	4,96

На рисунке 10 и в таблице 4 представлены результаты массового износа ролика.



**Рис. 10.** Массовый износ ролика после испытаний при нагрузке 10 кгс: до и после послойной УЗО мощностью 200 Вт и 400 Вт

**Таблица 4.** Массовый износ ролика после испытаний пары «покрытие-бронза»

Марка покрытия	Режим напыления покрытия с УЗО	Весовой износ, мг	Коэффициент трения, Ктр
ПН85Ю15	Без УЗО	605,67	0,61
ПН85Ю15	УЗО 200 Вт	44,67	0,35
ПН85Ю15	УЗО 400 Вт	104,67	0,47

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно заключить, что плазменное напыление порошка ПН85Ю15 с послойной ультразвуковой обработкой, по сравнению с покрытием без УЗО, приводит к увеличению износостойкости поверхности в масле и без него.

## 2.6. Результаты и их обсуждение

В данной работе показано, что нанесение на относительно мягкую сталь 45 порошка ПН85Ю15 методом плазменного напыления с послойной ультразвуковой обработкой мощностью 200 Вт, обладает преимуществом по сравнению с покрытием без УЗО, заключающимся в повышенной смазочной способности поверхности, износостойкости и коррозионной стойкости, в протекании на поверхности структурно-фазовых превращений (образование ультрамелких частиц фаз  $Fe_2Al_5$ ), формировании благоприятных сжимающих остаточных напряжений.

Характерной особенностью ультразвука является то, что, в отличие от тепловой энергии, акустическая энергия влияет на плазмохимические реакции жидких химических реагентов, активизирует физико-химические

процессы и поглощаются границами зёрен, частиц и границами переходного слоя между покрытием и подложкой.

При намагничивании покрытий из сильно магнитных (ферромагнитных) материалов (например, никеля, железа) магнитные моменты доменов приобретают преимущественное ориентирование в направлении внешнего магнитного поля и материал покрытия еще до затвердевания (кристаллизации) деформируется (расширяется или сжимается). Возможно, магнитострикционная деформация частиц жидкой фазы снижает температуру кристаллизации ультрамелких частиц фаз  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ . Согласно равновесной диаграмме Fe-Al, при эвтектической температуре 654 °C растворимость железа в алюминии незначительна (0,03 ат. %), а растворимость алюминия в железе в 600 раз выше и составляет примерно 32%.

Как показано на рис. 6. г, ж после послойной УЗО мощностью 200 Вт и 400 Вт, в отличие от покрытия без УЗО, железо из стали 45, а алюминий из покрытия взаимно диффундируют навстречу друг другу, формируя переходный слой, в котором алюминий растворяется в железе до образования ультрамелких частиц  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  (71 ат.% Al). Как видно из рис. 6. г, ж после послойной УЗО мощностью 200 Вт, по сравнению с УЗО мощностью 400 Вт, растворимость алюминия была больше и дифракционные линии соединения  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  были более интенсивными.

Согласно литературным данным, при комнатной температуре частицы интерметаллидной фазы  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  обладают высокой твердостью 11,5 ГПа. Появление таких частиц в поверхностном слое, объясняет высокую износостойкость покрытия после послойной УЗО мощностью 200 Вт.

Следует отметить, что после послойной УЗО мощностью 200 Вт, в переходном слое покрытия, в котором алюминий растворяется в железе и формируются частицы  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ , из стали 45 туда диффундирует хром с максимальной концентрацией 16,35% (см. рис. 6. г), что потенциально должно повышать стойкость такого покрытия к коррозии.

### 3. Заключение

На основании полученных результатов, можно заключить, что покрытия, полученные методом плазменного напыления ферромагнитного порошка ПН85Ю15, совмещенного с послойной ультразвуковой обработкой мощностью 200 Вт, по сравнению с покрытием без УЗО, обладают:

- более высоким сцеплением с металлом основы и достаточной пористостью, которая при работе со смазкой, обеспечит коленчатому валу повышенную смазочную способность;

- двухкомпонентной структурой гранул – крупных (~800 мкм) и мелких (~4 мкм), которые заполняют несплошности поверхности и уменьшают шероховатость покрытия;
- структурно - фазовыми превращениями с образованием частиц ультрамелких сверхтвердых интерметаллидных фаз  $Fe_2Al_5$ ;
- формированием благоприятных сжимающих остаточных напряжений;
- улучшением триботехнических свойств пары трения «покрытие-чугун» без смазки при нагрузке 25 кгс – уменьшением линейного износа в 2 раза (с 4,2 до 1,8) мкм и коэффициента трения в 3 раза (с 0,55 до 0,16), повышением нагрузки схватывания в 2 раза (с 150 до 300) кгс.
- улучшение триботехнических свойств пары трения «покрытие-бронза» в масле Лукойл Lухе 5W40 при нагрузке 10 кгс – уменьшение массового износа в 12 раз (с 605,67 до 44,67 мг) и коэффициента трения в 2 раза (с 0,6 до 0,3), уменьшение рабочей температуры в среднем на 5 °С.

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно заключить, что плазменное напыление порошка ПН85Ю15 с послойной ультразвуковой обработкой мощностью 200 Вт, по сравнению с покрытием без УЗО, приводит к увеличению износостойкости металлических поверхностей. Поэтому покрытие рекомендуется для напыления на изношенные коренные и шатунные шейки коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания автомобилей.

### **Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)**

#### **Публикации в рецензируемых изданиях**

1. Inur Syundyukov, Margarita Skotnikova, Juozas Padgurskas, Galina Tsvetkova, Elena Tarasenko. Wearproof structural and phase status of the surface of preparation of steel 45 after plasma spraying of powder PN85Y15. February 2020. Material Today: Proceedings Volume 30, Part 3, 2020, Pages 650-655 DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.454 ISBN: 22147853. (**Scopus**)

2. I.S. Syundyukov, E.K. Ivanov, M.A. Skotnikova, Qian Jiangda, V.V. Medvedeva, N.A. Krylov. Tribotechnical Diagnostics of an Internal Combustion Engine According to the Condition of the Oil. Key Engineering Materials Submitted: 2019-03-08 ISSN: 1662-9795, Vol. 822, pp 649-655 Revised: 2019-06-04. © 2019 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland (978-3-0357-1611-5). (**Scopus**).

3. Skotnikova M.A., Strelnikova A.A., Ivanova G.V., Popov A.A., Syundyukov I.S. Localization of plastic deformation in austenitic steel at low-temperature cycling loading. Lecture Notes in Mechanical Engineering 2020 DOI: 10.1007/978-3-030-39500-1\_18 EID: 2-s2.0-85080963229. (**Scopus**)

4. Скотникова М.А., Стрельникова А.А., Иванова Г.В., Попов А.А., Сундюков И.С. Локализация пластической деформации в аустенитной стали при низкотемпературном циклирующем нагружении. Современное

машиностроение: Наука и образование: материалы 8-й Международной научно-практической конференции/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019.-с.444-464. (РИНЦ).

5. Снетков В.В., Иванов Е.К., Сюдюков И.С. «Программа для нормирования разработок конструкторской документации любой сложности, NormalizationDesign» Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ RU, № 2020610830, 20.01.2020. Заявка № 2019667711 от 30.12.2019. (РИНЦ).

Аспирант \_\_\_\_\_ **Сюдюков И.С.**  
(подпись)