

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



**Алван Хуссам Лефта Алван**

Повышение кавитационной стойкости поверхностей деталей нанесением  
защитных покрытий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена на кафедре технологии сварочного производства Института новых материалов и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук,  
**Коробов Юрий Станиславович**

Официальные оппоненты: **Еремин Евгений Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО  
«Омский государственный технический  
университет», г. Омск, заведующий кафедрой  
«Машиностроение и материаловедение»;

**Ольшанская Татьяна Васильевна**,  
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет», г. Пермь, профессор  
кафедры «Сварочное производство, метрология и  
технология материалов»;

**Быкова Татьяна Михайловна**  
кандидат технических наук, ФГБУН Институт  
машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского  
отделения Российской академии наук, г.  
Екатеринбург, научный сотрудник лаборатории  
микромеханики материалов

Защита состоится «01» июля 2022 года в 14:30 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.5.06.15 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=3600>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Фивейский Андрей Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Некоторые компоненты оборудования, контактирующие с высокоскоростными жидкими средами (например, запорные клапаны, крыльчатки насосов, лопатки турбины гидростанций, корабельные винты, системы охлаждения различных агрегатов и т.п.), подвергаются одному из видов износа - кавитационной эрозии. Повреждения, вызванные кавитационным воздействием, приводит к экономическим потерям и снижению операционной работоспособности машин. На данный момент нет возможности полностью исключить этот вид износа, поэтому уменьшение кавитационной эрозии является важной задачей, так как позволяет достичь большого экономического эффекта.

Существует ряд металлических материалов, применяемых для защиты против кавитационной эрозии. Они включают мартенситные и аустенитные нержавеющие стали, композитные сплавы с никелевой и/или кобальтовой матрицей и карбидными включениями и др. Локализация кавитационного разрушения в поверхностном слое делает экономически целесообразным нанесение покрытий из таких материалов на основу из менее дорогостоящих сплавов. Для конкретных условий эксплуатации необходим обоснованный выбор как материала, так и метода нанесения покрытия из него из-за возможных различий в стоимости получения и стойкости таких покрытий.

**Степень разработанности темы.** Значительный вклад в изучение проблемы кавитационной эрозии и поиск подходящих решений для уменьшения воздействия кавитации и повышения долговечности металлических деталей внесли такие российские и зарубежные учёные, как И.Н. Богачев, М.И. Разиков, Р.И. Минц, Л.С. Малинов, В.И. Шумяков, М.А. Филиппов, В.Л. Малинов, С.Я. Шипицин, М.Л. Линдеров, L. Rayleigh, C.F. Naude, A.T. Ellis, M.S. Plesset, J.F. Santa, R.J.K. Wood, A. Neville, A.G.M. Pukasiewicz, S.F. Brunatto.

**Целью работы** является выбор и научное обоснование вида покрытия для защиты деталей от кавитационной эрозии.

### **Задачи исследования:**

1. Разработка лабораторного комплекса и методики оценки кавитационной стойкости покрытий, полученных методами дуговой наплавки и газотермического напыления.

2. На основе испытаний на стойкость против кавитационной эрозии характерных материалов, которые используют для защиты от кавитации, выбрать наилучший материал.

3. Проанализировать причины различий результатов на основе исследований структуры, фазовых превращений, микротвердости, топографии поверхности.

4. Разработка технологических рекомендаций по упрочнению типовых компонентов оборудования, подверженных кавитационной эрозии применительно к выбранному, по результатам исследований, методу получения покрытия и его материалу.

### **Научная новизна работы:**

1. Установлено, что наплавленный металл из метастабильной аустенитной стали 60X8ТЮ (исходный материал – порошковая проволока ППМ-6) под действием кавитации подвержен интенсивному деформационному мартенситному

превращению ( $\gamma \rightarrow \alpha'$ ), аналогичному для сталей с метастабильным аустенитом при других видах внешних нагрузений высокого уровня (29,5% мартенсита охлаждения в исходном состоянии, 73,5% мартенсита деформации в процессе кавитационного воздействия), что приводит к более высокой стойкости против кавитационной эрозии этого покрытия по сравнению с E308L-17 и AISI 316L (в примерно 4 и 10 раз выше соответственно).

2. При сравнении кавитационной стойкости наплавленного слоя ППМ-6 и газотермических покрытий WC-CoCr, WC-CrC-Ni и NiCrBSi установлено, что износ не пропорционален твердости. У ППМ-6 твердость ниже, чем у газотермических покрытий на 100-300 HV, а его стойкость против кавитационной эрозии выше ~ в 20 раз. Показано, что это обусловлено различием в механизмах изнашивания поверхностей. В случае ППМ-6 имеет место износ в границах зерен в сочетании с  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращением, в случае газотермических покрытий происходит выкрашивание твердых фаз.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработан лабораторный комплекс для испытаний на кавитационную стойкость металлических материалов. Устройство отличается от аналогов взаимным расположением образца и кавитационной струи, а также приложением напряжения к образцу, что позволяет ускорить испытания, повысить достоверность и стабильность результатов.

2. Установлена и обоснована сильная корреляция между деформационным мартенситным превращением в метастабильной аустенитной стали и высокой стойкостью против кавитационной эрозии.

3. Результаты кавитационных испытаний, проведенных применительно к лопаткам насоса подачи технологической воды для охлаждения агрегатов электростанции, позволили рекомендовать наплавленное покрытие из метастабильной аустенитной стали 60X8ТЮ (исходный материал – порошковая проволока ППМ-6) и технологию его получения для реализации на электростанции Дора (Багдад, Ирак).

**Методология и методы диссертационного исследования.** Для достижения цели работы использованы покрытия, полученные разными способами: напыление (сверхзвуковое газоздушное напыление, активированная дуговая металлизация) и дуговой наплавкой (ручная и неплавящимся электродом в аргоне). При проведении экспериментов по измерению кавитационного износа применяли оригинальную методику испытаний на кавитацию в слабощелочной среде.

Экспериментальные исследования, связанные с анализом кавитационного разрушения изношенных поверхностей выполнены по стандартным методикам, на сертифицированном оборудовании, и включали в себя: оптическую и сканирующую электронную микроскопию, рентгенофазовый анализ, энергодисперсионный микрорентгеноспектральный анализ, измерение микротвердости, профилометрию поверхности.

Эксперименты и металлографические исследования были выполнены в УрФУ, Институт физики металлов УрО РАН, Институт машиноведения УрО РАН, и Институт металлургии УрО РАН.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты кавитационных испытаний стали AISI 316L в качестве основного материала, покрытий, полученных методами сверхзвукового газоздушного напыления (HVOF: WC-10Co4Cr, WC-20CrC-7Ni, NiCrMoNb, NiCrBSi), ручной дуговой сварки (РДС: E308L-17), и дуговой сварки неплавящимся электродом в аргоне (TIG: ППМ-6), проведенные на оригинальной установке.

2. Оценка и анализ структурных изменений, происходящих в поверхностных слоях, подверженных кавитационной эрозии.

3. Механизм повышения кавитационной стойкости покрытия из материала вида 60X8ТЮ, со структурой метастабильного аустенита, полученного дуговой наплавкой в аргоне, под воздействием высокоскоростных жидких сред.

**Степень достоверности результатов** проведенных исследований обеспечена большим объемом экспериментальных данных и использованием корректных методов статистической обработки, повторяемостью результатов экспериментальных исследований. Использовано современное сертифицированное исследовательское оборудование. Результаты работы не противоречат общепринятым мировым представлениям о предмете исследования.

**Личный вклад автора** заключается в разработке плана исследования, установки и методики изготовления опытных образцов покрытий и испытания на кавитационную эрозию, проведении экспериментов по оценке кавитационной эрозии исследованных материалов, осуществлении аналитической оценки результатов исследований структуры и фазового анализа, микротвердости материалов, топографии поверхности. Является соавтором патента, 17 публикаций, представлял результаты диссертационной работы на 9 конференциях.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: RusMetalCon-2018, 2019, Челябинск; МНТК «Сварка и контроль – 2018», Пермь; ICIEAM, Сочи, 2019; IX Уральская НТК «Сварка. Реновация. Триботехника», Нижний Тагил, 2019; Int. Conf. "Welding in Russia 2019: State-of-the-Art and Perspectives", Томск, 2019; XXV Уральская школа металлургов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», Екатеринбург, 2020; XVI межд. конгресс сталеплавильщиков и производителей металла – ISCON, Екатеринбург, 2021; International Thermal Spray Conference and Exposition - ITSC, Canada, Quebec, 2021.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 10 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 8 статей индексируются в базе данных Scopus, WOS, получен 1 патент РФ на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа изложена на 139 страницах, состоит из введения, 5 глав, общих выводов, библиографического списка из 187 наименований российских и зарубежных источников, содержит 18 таблиц и 63 рисунков.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, апробация

результатов работы, описан личный вклад соискателя, количество публикаций и объем работы.

**В первой главе** представлен аналитический обзор существующих методик кавитационных испытаний и методов защиты металлических деталей от кавитационной эрозии. Проведен анализ материалов, применяемых в качестве кавитационно-стойких. Рассмотрено влияние мартенситного превращения на механические свойства, в частности кавитационно-эрозионную стойкость, сталей со структурой метастабильного аустенита. На основании анализа литературных данных представлены основные задачи работы.

**В второй главе** приведены, исследуемые материалы, методы испытания, а также подготовки образцов и методы исследований. Для нанесения покрытий использовали: ручную дуговую сварку (РДС), дуговую металлизацию (ДМ), сверхзвуковое газозвуковое напыление (HVOF), и дуговую сварку неплавящимся электродом в аргоне (TIG), таблица 1, с применением типовых технологических режимов. Химический состав материалов для получения покрытий и сталей подложек, использованных как базы для сравнения приведены в таблице 2.

Образцы для проведения кавитационных испытаний были подготовлены в соответствии со стандартом ASTM G32-10 с учетом особенностей формообразования при разных методах получения поверхностных слоев.

Микроструктуру поверхности образцов изучали с применением сканирующей электронной микроскопии, SEM Tescan VEGA II XMU (Tescan, Чешская Республика) с системой энергодисперсионного микроанализа (EDS). Рентгенофазовый анализ выполняли на дифрактометре Shimadzu XRD – 7000 (Shimadzu, Япония). Шероховатость и профиль поверхности образцов изучали с помощью оптического профилометра Wyko NT-1100 3D (Veeco, США). Микротвердость покрытий по Виккерсу HV определяли на микротвердомере Shimadzu HNV-G21DT (Shimadzu, Япония) по результатам 10 измерений.

Поскольку кавитация часто сопровождается абразивным воздействием, для наиболее стойких против кавитации образцов дополнительно проведена оценка стойкости против абразивного износа по методу Бринелля-Ховарта. Параметры испытаний: нагрузка 5 кг; скорость вращения диска 75 об/мин; диаметр диска 0,2 м; расход абразива 110 г/мин; фракция электрокорунда 125-180 мкм; полное время испытания: 10 минут.

**Во третьей главе** приведены результаты разработки лабораторного комплекса и методики для испытания стойкости материалов против кавитационной эрозии. На рисунке 1 представлен разработанный комплекс кавитационных испытаний.

Напор жидкости, истекающей из сопла 5, определяется высотой ( $H$ ) уровня жидкости в баке 13. Кавитация возникает при ультразвуковом ( $у/з$ ) воздействии на струю жидкости, возбуждаемом генератором 1 через волновод 3. Насос 11, управляемый по обратной связи контроллером 16, обеспечивает постоянство состава жидкости поступающей на поверхность образца 4 и ее уровня в контейнере 6. Возможность варьирования состава жидкости позволяет оценить изменение кавитационной стойкости в зависимости от агрессивности среды. Анодная поляризация, вызываемая приложением напряжения между соплом 5 и образцом 4,

инициирует электрохимическую коррозию испытуемого материала, что ускоряет кавитационное разрушение поверхности образца.

Таблица 1 – Материалы покрытий/подложек и методы нанесения покрытий

Материал			Методы нанесения				Ø/Размер
			Наплавка		Напыление		
			TIG	РДС	HVAF	ДМ	
1	Сплошной	AISI 316L, 20X13, сталь 40					
2	Электрод	E308L-17		+			Ø 2,5 мм
3	Сплошная проволока	06X19H9T	+			+	Ø 1,6 мм
4	Порошковые проволоки	ППМ-6*	+			+	Ø 1,6 мм
5	Порошки	WC-10Co4Cr				+	-25 + 10 мкм
6		WC-20CrC-7Ni				+	-38 + 10 мкм
7		NiCrBSi (Colmonoy 6)				+	-53 + 30 мкм
8		NiCrMoNb (Inconel 625)				+	-45 + 15 мкм

\* ППМ-6 предоставлены ООО «Уральский институт сварки»

Таблица 2 – Химический состав исследованных материалов покрытий

Материал	Химический состав напыляемых порошков, мас. % (по сертификату)									
	C	Cr	Ni	Co	B	Si	Nb	Mo	W	Fe
WC-10Co4Cr	5,34	3,94	-	9,91	-	-	-	-	осн	0,07
WC-20CrC-7Ni	6,24	21,30	7,02	-	-	-	-	-	осн	0,09
NiCrMoNb	≤ 0,1	20-23	осн	-	-	≤ 0,5	3,15-4,15	8-10	-	≤ 3,0
NiCrBSi	0,6-1,2	13-17	осн	-	3,0-3,9	3,9-4,9	-	-	-	3,0-6,0
	Химический состав наплавляемых материалов, мас. % (результаты химанализа)									
	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Fe
E308L-17 покрытие	0,07	16,5	8,16	0,62	0,46	0,03	0,01	0,17	0,01	осн
E308L-17* покрытие	0,06	17,7	10,00	0,91	0,61	0,03	0,01	0,04		осн
06X19H9T	0,06	18,7	9,3	0,6	1,1	0,03	0,015	-	0,31	осн
60X8ТЮ (ППМ-6)	C		Cr		Al		Ti		Fe	
	0,6		8,0		1,5		1,0		осн	
	Химический состав основных материалов, % (по сертификату)									
	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	Mo	Fe	
Сталь 40	0,404	-	-	0,283	0,60	0,0053	< 0,001	-	осн	
Сталь 20X13	0,16-0,25	12,0-14,0	≤ 0,60	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 0,03	≤ 0,025	-	осн	
AISI 316L	0,03	16,5-18,0	10,0-13,0	≤ 0,75	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,045	2,0-2,5	осн	

\* Покрытие, используемое на электростанции Дора (Багдад, Ирак)

Указанные конструктивные особенности обеспечили ряд отличий от существующих установок, стандартизованных по ASTM G32:

1. Возможность поддержания постоянной температуры образца без его принудительного охлаждения благодаря непрерывной циркуляции жидкости (увеличение температуры в ходе 300 мин. испытания не превышает 2 °С).

2. Добавление к кавитации электрохимического воздействия за счет приложения анодной поляризации к образцу, что дает возможность ускорить износ поверхности и уменьшить время кавитационных испытаний.

3. Не требуется высокая точность позиционирования испытуемого образца, что обеспечивает легкое управления и простую регулировку зазора ( $h$ ) между соплом и образцом.

4. Стабильность пятна распределения жидкости по образцу (рисунок 2, а), позволяет исключить краевой эффект (рисунок 2, б).

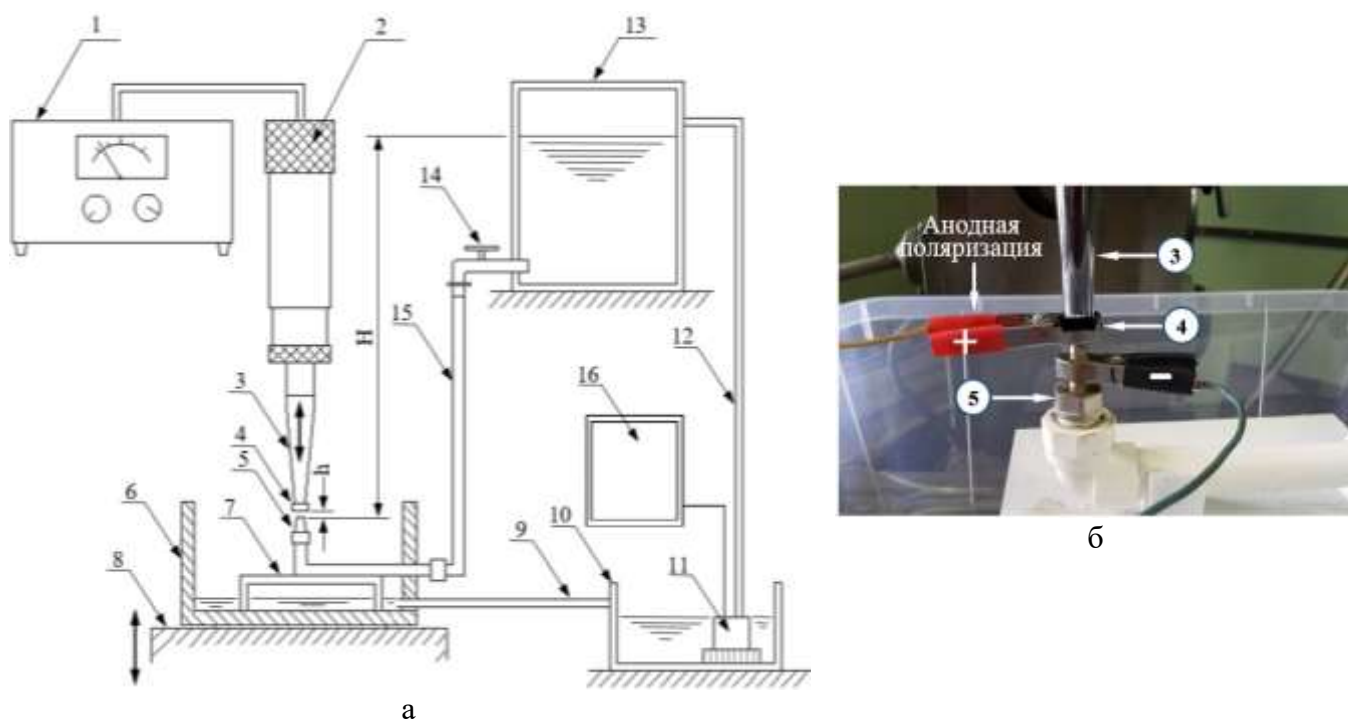


Рисунок 1 – Разработанный комплекс кавитационных испытаний: (а) – общая схема; (б) - вид сопла и волновода с приложенным напряжением. 1–у/з генератор; 3– волновод; 4–образец; 5–сопло ( $\varnothing$  6 мм); 6–контейнер; 10–накопительный контейнер для жидкости; 11–насос; 13–напорный бак рабочей жидкости; 16–контроллер;  $h$ –зазор между образцом и соплом ( $2 \pm 0,1$  мм);  $H$ –высота уровня жидкости ( $\sim 1$  м)



Рисунок 2 – Вид образцов: (а) – зона испытания; (б) – рабочая поверхность после кавитационных испытаний при у/з воздействия, 1 – зона кавитации, 2 – неповрежденная зона



Испытания проводили в водопроводной воде,  $pH = 7,5 \pm 0,20$ , с применением ультразвукового генератора мощностью 500 Вт при частоте колебаний  $20 \pm 0,1$  кГц и амплитуде  $55 \pm 3$  мкм. Для реализации анодной поляризации между образцом и соплом прикладывали напряжение 8,5 В. Общее время испытания на кавитационную стойкость каждого образца составило не менее 300 мин. Замеры показали, что ток уменьшается при расстоянии ( $h$ ) между образцом и соплом (рисунок 3), что обусловлено ростом электрического сопротивления в зазоре. Кроме того, при кавитации на поверхности образца образуется облако пузырьков, которое приводит к увеличению электрического сопротивления в зазоре. Поэтому кривая изменения тока при наличии  $u/z$  воздействия располагается ниже, чем без него.

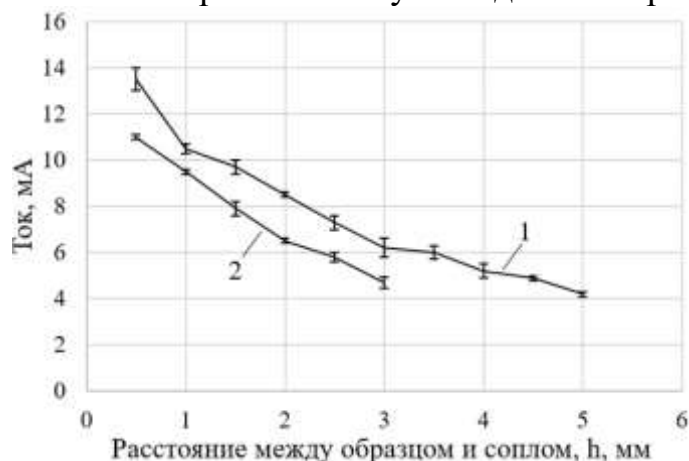


Рисунок 3 – Зависимость тока от расстояния между образцом и соплом ( $h$ ), 1 – без  $u/z$  воздействия, 2 – при  $u/z$  воздействии

Реализация методики на разработанной установке позволила устранить недостатки существующих схем испытаний, что обеспечивает ускорить испытания, повысить достоверность и стабильность результатов.

**В четвертой главе** представлены результаты испытаний стойкости исследованных материалов при кавитационного воздействия, а также анализ причин различной кавитационной стойкости на основе структуры и фазового анализа, микротвердости материалов, топографии поверхности. Наилучшая стойкость показало покрытие из порошковой проволоки ППМ-6 наплавленном методом TIG (рисунок 4). Кавитационная стойкость исследованных материалов оценивали по потере объема вследствие разной плотности материалов. Плотность материалов рассчитывали по изменению объема при погружении образцов в жидкость.

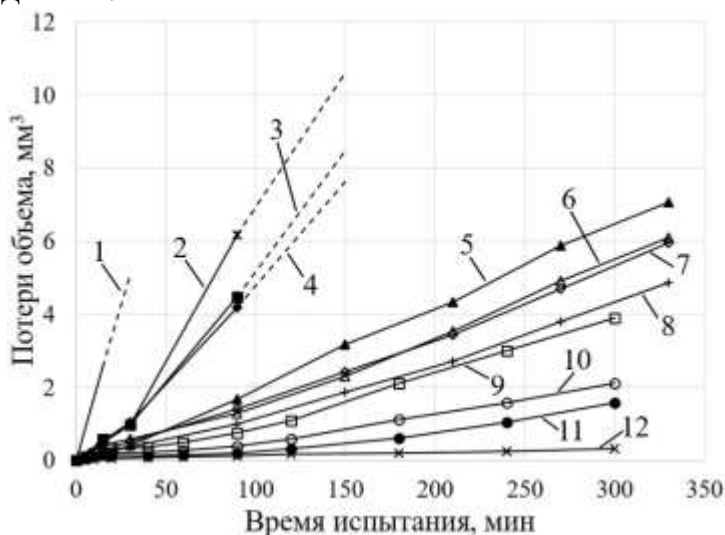


Рисунок 4 – Зависимость стойкость исследованных материалов против кавитационной эрозии от времени испытания: 1 – 06X19H9T (ДМ); 2 – ППМ-6 (ДМ); 3 – сталь 40; 4 – NiCrSiB (HVAF); 5 – WC-CoCr (HVAF); 6 – WC-CrC-Ni (HVAF); 7 – NiCrMoNb (HVAF); 8 – сталь 20X13; 9 – сталь AISI 316L; 10 – 06X19H9T (TIG); 11 – E308L-17 (РДС); 12 – ППМ-6 (TIG)

ППМ-6 также показал более высокую абразивную стойкость в сравнении с применяемыми вариантами (рисунок 5) для наплавки крыльчатки насосов (E308L-17), что подтверждает его высокую стойкость к механическим воздействиям. Критерий потери массы был принят для оценки износостойкости материалов, поскольку они имеют примерно одинаковую плотность.

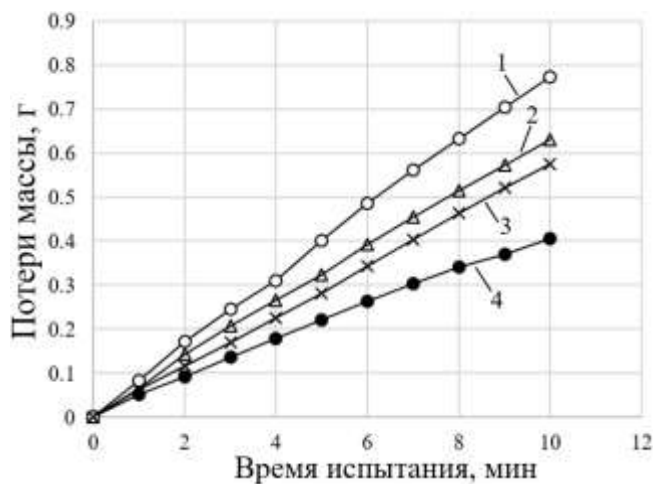


Рисунок 5 – Результаты испытаний абразивного износа: 1 – сталь 40; 2 – 06X19H9T (TIG); 3 – E308L-17 (РДС); 4 – ППМ-6 (TIG)

На рисунке 6 представлена исходная микроструктура исследованных материалов.

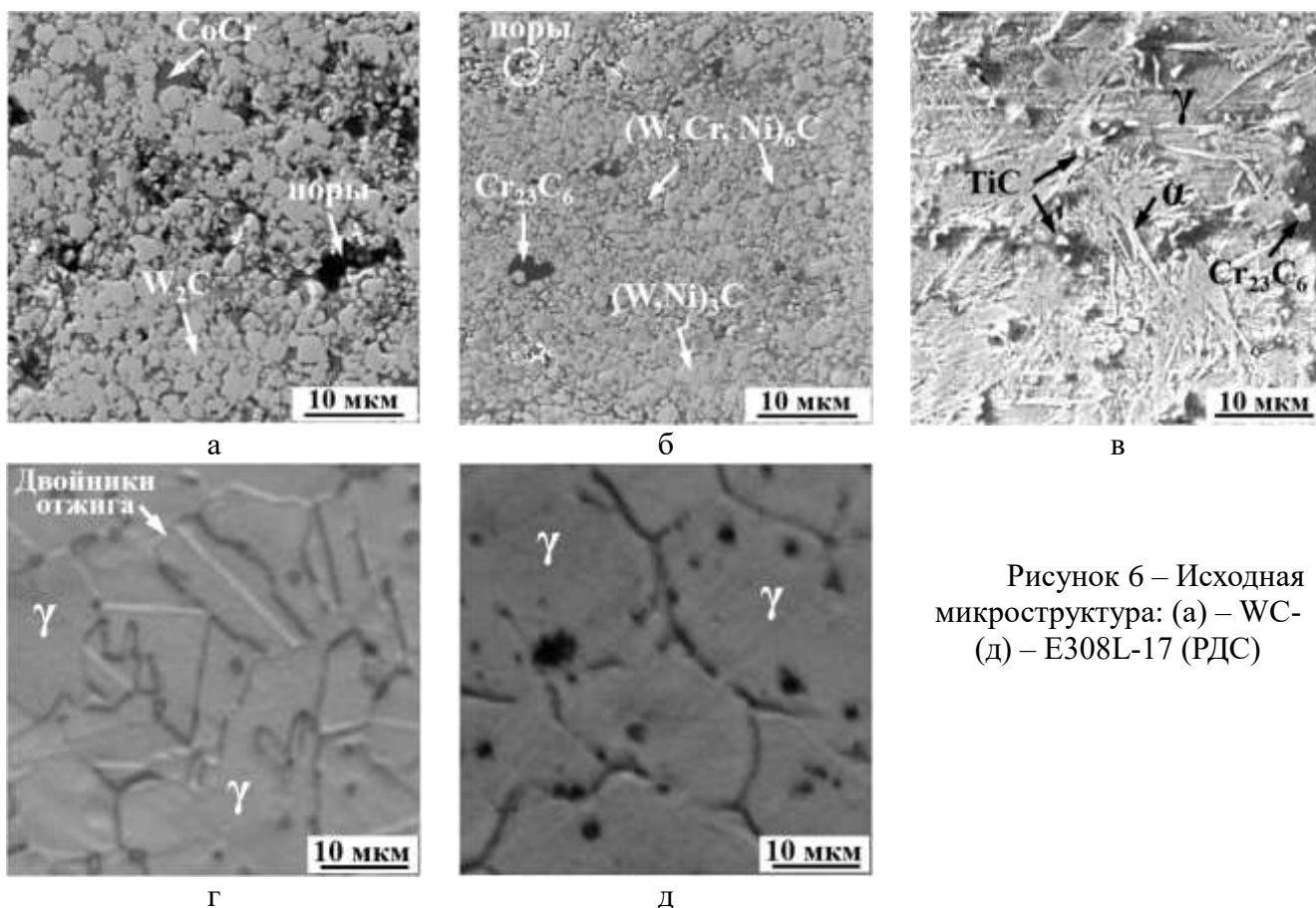


Рисунок 6 – Исходная микроструктура: (а) – WC-CoCr; (б) – WC-Cr-Ni; (в) – WC-Cr-Ni-Ti; (д) – E308L-17 (РДС)

Покрытия характеризуются плотной однородной структурой. Однако, в покрытии WC-CoCr наблюдаются крупные поры (рисунок 6, а), пористость достигает 0,8%. В покрытии WC-Cr-Ni крупные поры практически отсутствуют (рисунок 6, б),

а пористость не превышает 0,1%. Микротвердость HV покрытий WC-CoCr, WC-CrC-Ni NiCrMoNb, и NiCrBSi составляет  $950\pm60$ ,  $850\pm90$ ,  $460\pm40$ , и  $840\pm120$  соответственно. Небольшое преимущество в микротвердости у покрытия WC-CoCr обусловлено более высоким содержанием в его структуре карбидов вольфрама.

Микроструктура покрытия WC-CrC-Ni (рисунок 6, б) характеризуется мелким размером частиц WC (не более 3,4 мкм), а микроструктура покрытия WC-CoCr – более крупным (размер частиц до 4,7 мкм). В покрытии WC-CoCr блочные зерна карбида вольфрама с закругленными краями (рисунок 6, а) были обнаружены в матрице CoCr. Частицы карбида вольфрама распределены относительно равномерно, и трещин частиц карбида не наблюдалось.

На рисунке 6 (г, д) представлены оптические микрофотографии исходного состояния поверхности (до кавитационного воздействия) образцов стали AISI 316L и наплавленного слоя E308L-17. Поверхность образца AISI 316L характеризуется однородной структурой, состоящей из полиэдрических зерен аустенита с двойниками отжига, а структура поверхности образца E308L-17 характеризуется округлыми аустенитными зернами. Исходное состояние микроструктуры ППМ-6 (рисунок 6, в) состоит из аустенитной матрицы, содержащей карбиды титана, хрома и железа, 30% долей игольчатого мартенсита (мартенсит охлаждения) размером 5 – 10 мкм.

При кавитационном воздействии поверхности образцов подвергаются локальным ударным воздействиям, которые приводят к накоплению пластической деформации в приповерхностном слое и последующему усталостному разрушению. На рисунке 7 представлена микроструктура поверхностей покрытий, полученных методом HVOF и поперечные сечения изношенных WC-CoCr и WC-CrC-Ni покрытий после 330 мин кавитационного воздействия.

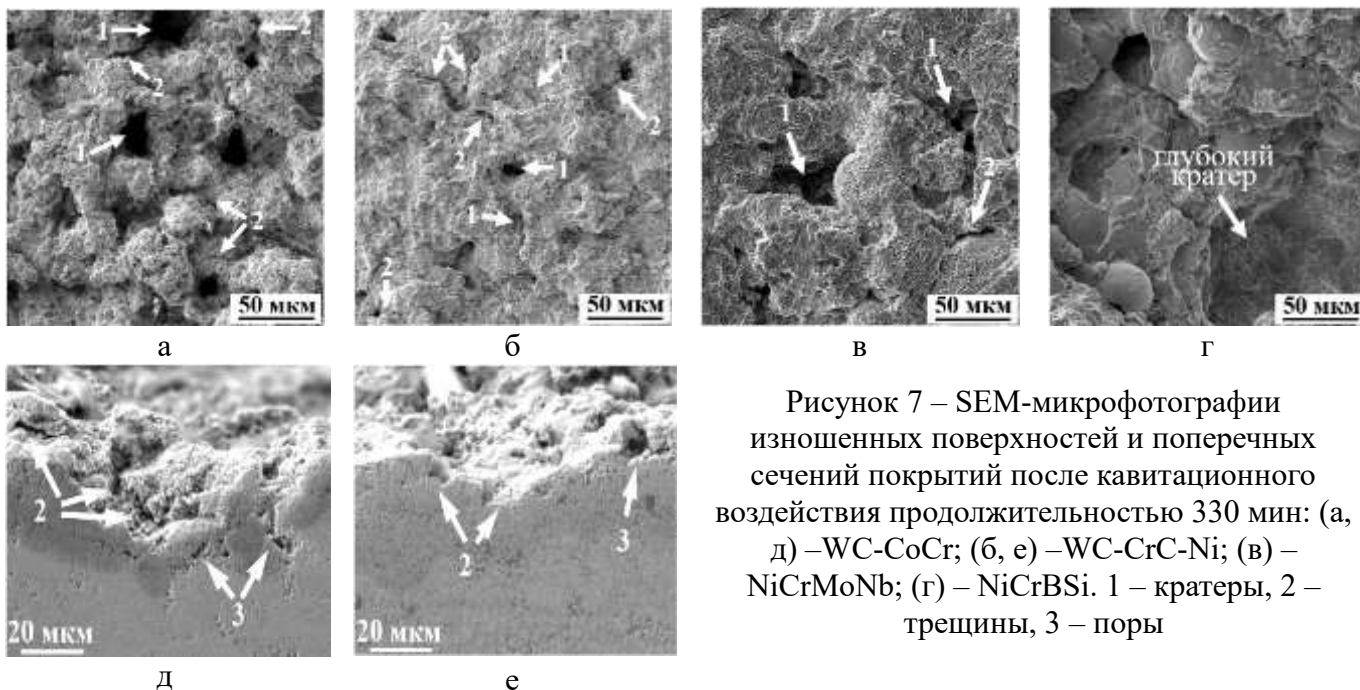


Рисунок 7 – SEM-микрофотографии изношенных поверхностей и поперечных сечений покрытий после кавитационного воздействия продолжительностью 330 мин: (а, д) – WC-CoCr; (б, е) – WC-CrC-Ni; (в) – NiCrMoNb; (г) – NiCrBSi. 1 – кратеры, 2 – трещины, 3 – поры

В целом, видно, что покрытия имеют разные механизмы разрушения. Для WC-CoCr покрытия механизм разрушения представляется как объединение дефектов сплошности (пор), уже существующих в покрытии, с последующим отрывом всей

частицы, под которой может находиться крупная пора. В результате на поверхности эрозионного разрушения формируется глубокий и широкий кратер (рисунок 7, а). Изучение поперечных шлифов покрытий после кавитационных испытаний, подтверждает, что, в покрытии WC-CoCr под действием кавитационного нагружения происходит разрушение перемычек между соседними дефектами и рост трещин как в направлении поверхности образца, так и параллельно поверхности (рисунок 7, д). Поверхность разрушения покрытия WC-CrC-Ni после кавитационного воздействия выглядит несколько иначе. Она в большей степени состоит из относительно плоских участков с менее глубокими кратерами (рисунок 7, б). Существенно (на порядок) меньшее количество дефектов сплошности в данном покрытии снижает вероятность развития трещин. В покрытии WC-CrC-Ni под поверхностью наблюдается существенно меньше повреждений, вызванных кавитационным нагружением (рисунок 7, е), чем в покрытии WC-CoCr. Пор и других дефектов сплошности в данном покрытии на порядок меньше. Это снижает вероятность зарождения трещин и последующего отделения части материала с поверхности покрытия при кавитационном воздействии.

По микрофотографиям покрытий NiCrMoNb и NiCrBSi после кавитационного воздействия, рисунок 7 (в, г), видно, что в первом случае кратеры меньше по размеру и количеству. Сопоставление с результатами, полученными при кавитационных испытаниях, показывает прямую зависимость между размерами, количеством кратеров и стойкостью против кавитации.

На рисунке 8 представлен вид кавитационного разрушения поверхностей образцов после 300 мин кавитационных испытаний: материал подложки AISI 316L (рисунок 8, а), а также РДС наплавленных слоев стали E308L-17 (рисунок 8, б) и TIG наплавки стали ППМ-6 (рисунок 8, в).

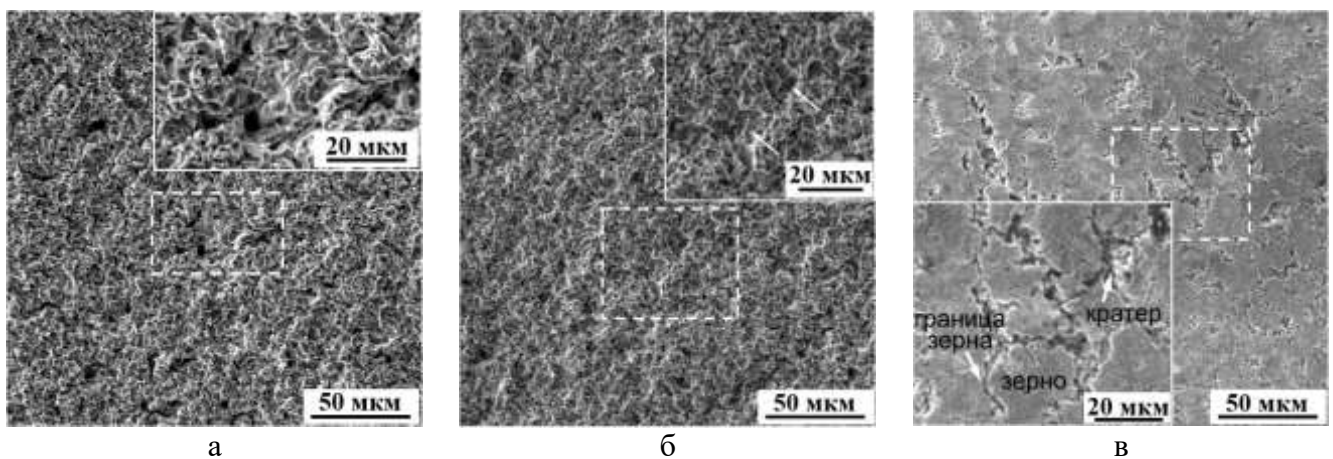


Рисунок 8 – SEM-микрофотографии изношенных поверхностей образцов после 300 мин кавитационного воздействия: (а) – сталь AISI 316L; (б) – E308L-17 (РДС); (в) – ППМ-6 (TIG)

Образцы AISI 316L и E308L-17 показывают близкий тип кавитационной эрозии с небольшими внешними различиями во внешнем виде и количестве полостей (кратеров), как показано на рисунке 8 (а, б). При кавитации поверхности образцов подвергаются локальной пластической деформации, которая накапливается в процессе кавитации, вызывая разрушение поверхностей. В процессе кавитации

начиналась эрозия на границах зерен, представляющих слабые места в структуре, и развивалась по ним. Появление разрушения на поздних стадиях кавитационной эрозии предполагает наличие усталостного разрушения и кумулятивной пластической деформации.

Поверхность образца ППМ-6 после 300 мин кавитационного воздействия все еще сохраняет значительные участки исходной поверхности (рисунок 8, в). Это позволяет утверждать, что на поверхности наплавленного слоя из ППМ-6 большое количество энергии, вложенной за счет кавитационного нагружения, было поглощено без интенсивной пластической деформации поверхности образца. Таким образом, разрушаются только небольшие участки поверхности образца из-за меньшего количества усталостных трещин, которые вызывают удаление массы материала. Большая часть кавитационно-эрозионных повреждений начинается на границах зерен и распространяется вдоль них. Однако на границах зерен на поверхности образца ППМ-6 зарождение кратеров наблюдается в малой степени даже после 300 мин кавитационного воздействия.

Для стали AISI 316L и наплавленных слоев E308L-17 (РДС) и ППМ-6 (TIG) после кавитационного воздействия данные профилометрии поверхности (рисунок 9), коррелируют с SEM-микрофотографиями (рисунок 8). На поверхности образцов AISI 316L и E308L-17 наблюдается развитый микрорельеф в результате коррозионно-эрозионного разрушения. Видно, что шероховатость поверхности образца ППМ-6 не существенно меняется после кавитационного воздействия ( $Ra=0,17$ ) и поверхность характеризуется регулярным мелким микрорельефом, глубина кратеров не более 5 мкм ( $Rt=4,2$  мкм). Для образцов стали AISI 316L и наплавленного слоя E308L-17 (РДС) видно, что поверхности разрушены в большей степени и имеют более глубокие и широкие кратеры.

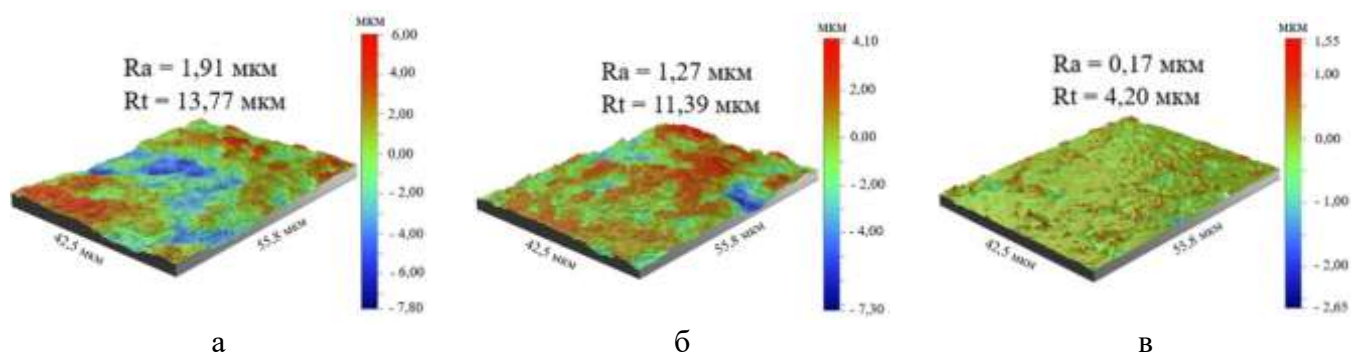


Рисунок 9 – Топографические изображения и параметры  $Ra$  и  $Rt$  шероховатости поверхности образцов после 300 мин кавитационного воздействия: (а) – AISI 316L; (б) – E308L-17 (РДС); (в) – ППМ-6 (TIG)

С целью изучения кинетики деформационного  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращения в процессе микроударного нагружения рабочей поверхности и установления взаимосвязи количества образовавшегося  $\alpha'$ -мартенсита со степенью упрочнения проведен рентгенофазовый анализ образцов через определенные нарастающие периоды времени кавитационного воздействия: AISI 316L и E308L-17: исходный, 10, 60, 300 мин; ППМ-6: исходный, 60, 180, 480 мин, рисунок 10.



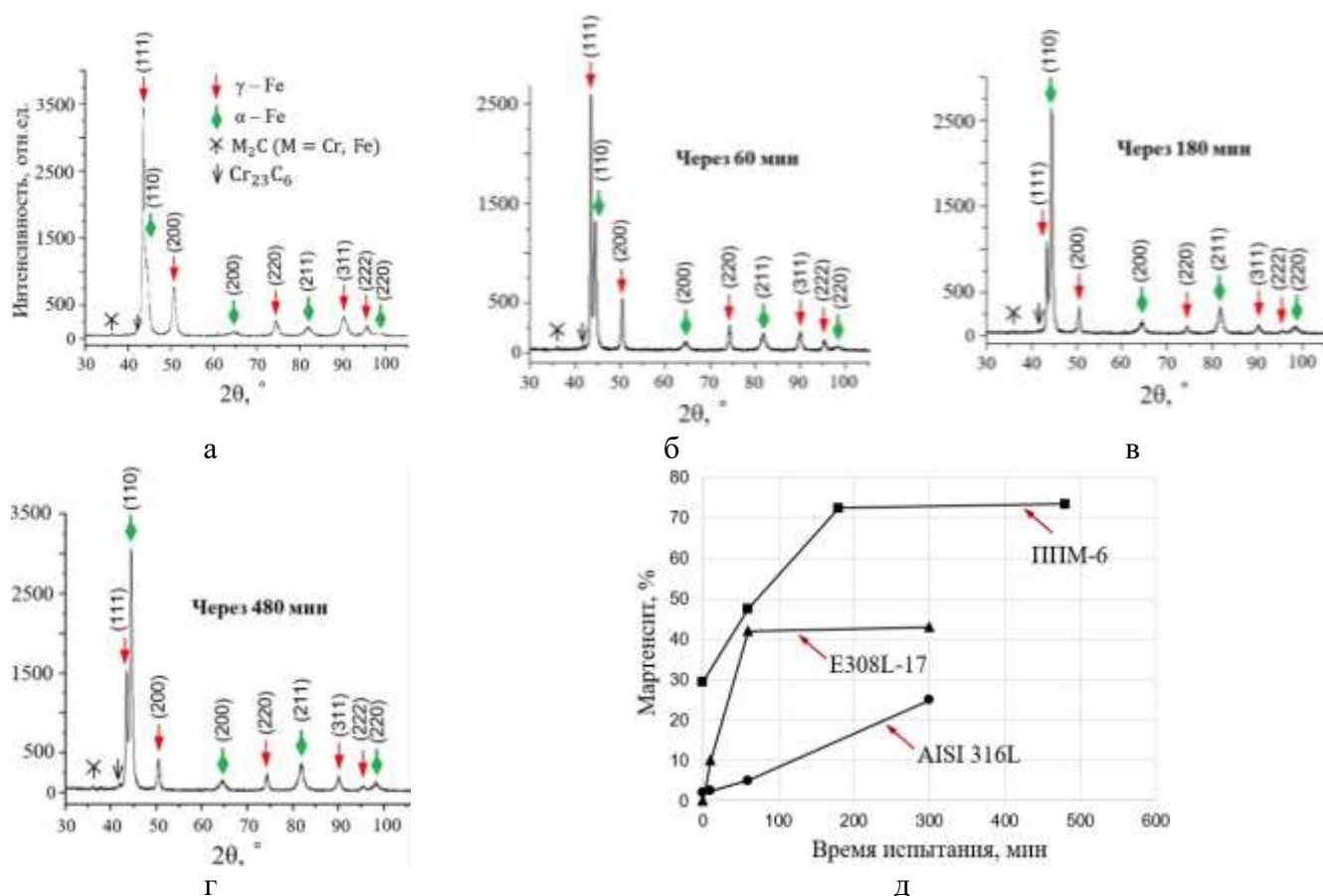


Рисунок 10 – Рентгеновские дифрактограммы наплавленного слоя ППМ-6 (TIG) до кавитационного воздействия (а) и после кавитационного воздействия длительностью, мин., 60 (б), 180 (в), 480 (г); (д) – объем трансформированного  $\alpha'$ -мартенсита при кавитационных испытаниях трех материалов

На дифрактограммах наплавленного слоя ППМ-6 явно видно увеличение объема трансформированного  $\alpha'$ -мартенсита в процессе кавитационного воздействия, рисунок 10 (а-г). Обобщение данных дифрактограмм трех материалов после разных интервалов испытаний показало следующее (рисунок 10 д). Наиболее стабильным материалом среди изученных проявила себя сталь AISI 316L. Только кавитационное воздействие в течение 300 минут показало в результате образование на поверхности 25%  $\alpha'$ -мартенсита, т.е. образование  $\alpha'$ -мартенсита происходило уже в наклепанном аустените этого образца. Меньшую стабильность аустенита по сравнению с сталью AISI 316L в процессе кавитационного воздействия показало покрытие E308L-17, где значительная трансформация произошла через 60 мин кавитации. Наплавленный слой E308L-17 имеет большую кавитационную стойкость, чем сталь AISI 316, несмотря на несколько меньшую твердость  $250 \pm 6$  HV<sub>0,3</sub> по сравнению с  $271 \pm 9$  HV<sub>0,3</sub> (измеренная после шлифовки поверхности образца). Это связано с мартенситным фазовым превращением, происходящим в поверхностном слое E308L-17 в процессе кавитации.

Наименее стабильный аустенит присутствует в покрытии ППМ-6 (TIG). Сравнение результатов рентгенофазового анализа до и после 480 мин кавитационного воздействия (рисунок 10 а, г) показало, что если в исходном состоянии образец имел

преимущественно аустенитную структуру (67,5% аустенита и 29,5% мартенсита охлаждения и небольшое количество карбидов ( $M_2C + M_{23}C_6$ ) ~ 3%, то в процессе кавитационного воздействия большая часть аустенита при микроударном нагружении на рабочей поверхности превратилась в мартенсит (в сумме количество мартенсита охлаждения и мартенсита деформации составило 73,5%, при сохранении 23,5% остаточного аустенита), что способствовало увеличению величины упрочнения рабочей поверхности образцов. По мере увеличения времени кавитационного воздействия до 60 и 180 минут общее количество мартенсита нарастает до 47 и 72 % соответственно (рисунок 10 б, в), а при дальнейшем возрастании времени до 480 минут стабилизируется на этом уровне. Вероятной причиной является то, что остаточный аустенит перешел в стабильное состояние и дальнейшее  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращение энергетически маловероятно. Образцы ППМ-6 (TIG) в исходном наплавленном состоянии поверхности перед испытанием имеют микротвердость  $612 \pm 50$  HV<sub>0,2</sub>, что обусловлено присутствием значительного количества углеродистого мартенсита охлаждения в структуре. Под действием кавитационного воздействия микротвердость рабочей поверхности образцов существенно возросла на величину около 40% - до величины  $870 \pm 150$  HV<sub>0,2</sub> после кавитационных испытаний, что дает основание утверждать, что основой причиной упрочнения поверхности является образование мартенсита деформации в микрообъемах рабочей поверхности при микроударном кавитационном нагружении.

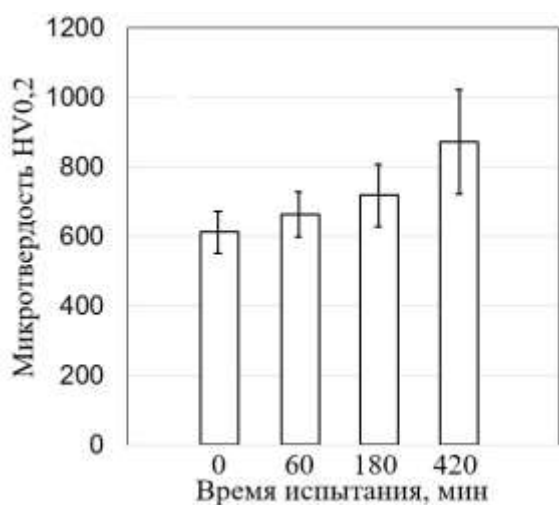


Рисунок 11 – Микротвердость рабочей поверхности образца ППМ-6 (TIG) при различной продолжительности кавитации

Несмотря на то, что количество  $\alpha'$ -мартенсита не увеличивается после 180 мин кавитационных испытаний покрытия ППМ-6 (TIG) (рисунок 10, д), твердость рабочей поверхности продолжает прогрессивно возрастать вплоть до максимального времени испытания 420 минут – от 718 HV после 180 минуткой выдержки до 870 HV (рисунок 11). Это говорит о том, что при дальнейшем кавитационном воздействии после насыщения интенсивности  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращения в покрытии ППМ-6 (TIG) на рабочей поверхности упрочнение происходит за счет наклепа ранее образовавшихся дисперсных кристаллов  $\alpha'$ -мартенсита.

**В пятой главе** приведены полученные результаты исследования применительно к изношенным крыльчаткам водяного насоса для перекачки воды в системе охлаждения различных агрегатов электростанции Дора (Багдад, Ирак). На рисунке 12 показана одна из этих изношенных крыльчаток, изготовленная из стали AISI 316L, скорость вращения 520 об/мин, объем проточной воды 13700 м<sup>3</sup>/час, диаметр ~ 800 мм, масса около 200 кг, среда- речная вода с песком, срок работы крыльчатки до

замены не менее 6 месяцев, типовой метод ремонта – наплавка (РДС) материалом E308L-17\* (Таблица 2).

Для оценки возможности повышения стойкости крыльчаток против кавитации были подготовлены и испытаны: основной материал крыльчатки, сталь AISI 316L; РДС-покрытия из типовых наплавочных материалов, E308L-17\*, применяемого на станции и E308L-17; TIG-покрытия из проволоки ППМ-6 (химический состав основного материала и наплавленного металла см. таблицу 2). На рисунке 13 представлена потеря массы исследуемых образцов после 300 мин кавитационного воздействия.



Рисунок 12 – Кавитационное разрушение на поверхности крыльчатки водяного насоса на электростанции Дора в Багдаде, Ирак

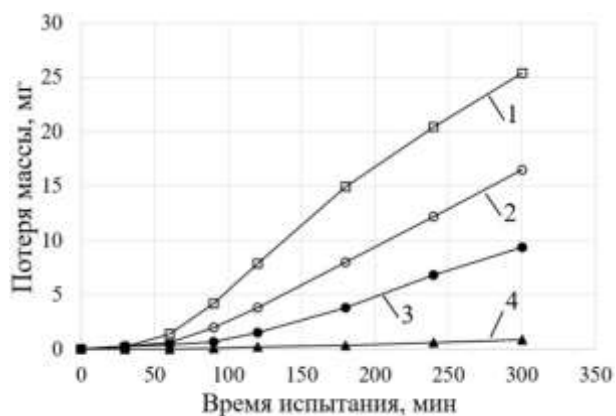


Рисунок 13 – Стойкость наплавленных слоев против кавитационной эрозии с использованием водопроводной воды, 300 мин испытания: 1 – сталь AISI 316L, 2 – E308L-17\* (РДС), 3 – E308L-17 (РДС), 4 – ППМ-6 (TIG)

Видно, что стойкость покрытия ППМ-6 против кавитации превышает в 10 и 16 раз стойкость покрытий E308L-17 и E308L-17\*, соответственно. Различие в кавитационной стойкости покрытий E308L-17 и E308L-17\* в основном связана с наличием неодинакового мас. % содержания элемента Ni (таблица 2), поскольку высокое содержание Ni приводит к повышению стабильности стали и снижает количество  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращение.

На основе результатов исследований разработаны рекомендации по повышению стойкости поверхности крыльчатки водяного насоса на электростанции против кавитационной эрозии за счет нанесения на нее покрытия из материала ППМ-6 методом TIG.

На основании испытаний на предприятии принято решение по использованию результатов для упрочнения крыльчаток насосов тепловой электростанции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны оригинальный лабораторный комплекс и методика испытаний на кавитационную стойкость, которые позволяют проводить испытания как однородных материалов, так и покрытий, полученных методами наплавки и газотермического напыления.



2. Установлено, что наплавленный металл из метастабильной аустенитной стали 60X8TЮ (исходный материал – порошковая проволока ППМ-6) под действием кавитации подвержен интенсивному деформационному мартенситному превращению ( $\gamma \rightarrow \alpha'$ ) в процессе кавитационного воздействия, аналогичному для сталей с метастабильным аустенитом при других видах внешних нагрузений высокого уровня (29,5% мартенсита охлаждения в исходном состоянии, суммарно 73,5% мартенсита охлаждения и мартенсита деформации после кавитационного испытания).

3. Установлена сильная корреляция между деформационным мартенситным превращением и свойствами покрытия после кавитации. Для наплавленного слоя из ППМ-6 после 480 мин кавитационного воздействия твердость увеличилась на ~ 40% при сохранении высокой стойкости против выкрашивания.

4. Наплавленное покрытие ППМ-6 показало повышенную стойкость против кавитационной эрозии по сравнению с образцами из аустенитных сталей E308L-17 и AISI 316L (в 4 и 10 раз выше, соответственно). Это объясняется значительно более развитым деформационным мартенситным превращением ( $\gamma \rightarrow \alpha'$ ), когда у ППМ-6 количество мартенсита после кавитационного воздействия увеличилось до 72,5 %, а у E308L-17 и AISI 316L до 40 и 25 %, соответственно.

5. Стойкость против кавитации покрытия, полученного из порошковой проволоки ППМ-6 наплавкой TIG, выше в 20 раз в сравнении с газотермическими покрытиями WC-CoCr, WC-CrC-Ni, и NiCrBSi, хотя его твердость ниже на 100-300 HV. Показано, что такое различие в стойкости обусловлено рядом факторов: превращением метастабильного аустенита в мартенсит деформации ( $\gamma \rightarrow \alpha'$ ) в процессе кавитационного воздействия у ППМ-6; изменением механизма изнашивания (выкрашивание у газотермических покрытий и износ в границах зерен у ППМ-6); сильной зависимости кавитационной стойкости от пористости покрытия.

6. Топография поверхности может служить критерием оценки стойкости против кавитационной эрозии. В частности, показано, что максимальная глубина впадин на поверхности образца ППМ-6 (TIG) <5 мкм после 300 мин испытаний, а для других образцов, где износ выше на порядок, была примерно в 3-5 раз выше.

7. Разработаны технологические рекомендации по упрочнению типовых крыльчаток водяного насоса для перекачки воды в системе охлаждения различных агрегатов, подверженных кавитационной эрозии, применительно к типовой электростанции Дора (Багдад, Ирак) наплавкой порошковой проволокой ППМ-6.

### **Основные публикации, в которых отражены результаты диссертации**

*Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и*

*Аттестационным советом УрФУ:*

1. Коробов Ю.С. Сопротивление эрозионно-коррозионному кавитационному воздействию WC-CoCr- и WC-NiCr-покрытий, полученных методом HVOF / Ю.С. Коробов, **Х.Л. Алван**, М. Барбоза, Н.В. Лежнин, Н.Н. Соболева, А.В. Макаров, М.С. Девятьяров, А.Ю. Давыдов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 20–27, 0,5 п.л./0,35 п.л.

2. Alwan H.L. Analysis of the external conditions affecting on the cavitation resistance of a steel / **H.L. Alwan**, N. Lezhnin, Yu. Korobov // Materials Science Forum. 2019. – Vol. 946. – P. 31–36, 0,38 п.л./0,29 п.л. (Scopus)
3. Alwan H.L. Behavior of a welded-deposited stainless steel tested at different cavitation test conditions / **H.L. Alwan**, Yu.S. Korobov, N.N. Soboleva, N.V. Lezhnin, A.V. Makarov, M.S. Deviatyarov, D.M. Elkind // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. – Vol. 681. – P. 012002, 0,5 п.л./0,35 п.л. (Scopus)
4. Alwan H.L. Comparison of the resistance to cavitation and abrasive wear of deposited layers prepared from steels 06X19H9T and Fe-Cr-Ti-Al / **H.L. Alwan**, Yu.S. Korobov, N.O. Bessonov, M.S. Smolentsev, N.V. Lezhnin, N.M. Razikov1, M.N. Razikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. – Vol. 681. – P. 012001, 0,44 п.л./0,31 п.л. (Scopus)
5. Alwan H.L. Cavitation erosion-corrosion resistance of deposited austenitic stainless steel/E308L-17 electrode / **H.L. Alwan**, Yu.S. Korobov, N.N. Soboleva, N.V. Lezhnin, A.V. Makarov, E.P. Nikolaeva, M.S. Deviatyarov // Solid State phenomena. 2020. – Vol. 299. – P. 908-913, 0,38 п.л./0,27 п.л. (Scopus)
6. Alwan H.L. Study of cavitation erosion–corrosion resistance of thermally sprayed Ni–based coatings prepared by HVOF process / **H.L. Alwan**, Yu.S. Korobov, N.N. Soboleva, N.V. Lezhnin, A.V. Makarov, M.S. Deviatyarov // Solid State phenomena. 2020. – Vol. 299. – P. 893-901, 0,57 п.л./0,4 п.л. (Scopus)
7. Коробов Ю.С. Сравнение кавитационной стойкости наплавленного металла со структурой метастабильного и стабильного аустенита / Ю.С. Коробов, **Х.Л. Алван**, М.А. Филиппов, В.И. Шумяков, Н.Н. Соболева, В.А. Сирош, С.Х. Эстемирова, А.В. Макаров // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 33–41, 0,57 п.л./0,33 п.л.
8. Alwan H.L. Cavitation erosion–corrosion behavior of Fe-Cr steel induced by ultrasonic vibration / **H.L. Alwan**, Yu.S. Korobov, N.N. Soboleva, D.A. Prokopyev // Materials Science Forum. 2020. – Vol. 989. – P. 312–317, 0,38 п.л./0,27 п.л. (Scopus)
9. Korobov Yu.S. The effect of martensitic transformation on the cavitation erosion resistance of a TIG-deposited Fe-Cr-C-Al-Ti layer / Yu.S. Korobov, **H.L. Alwan**, М.А. Filippov, N.N. Soboleva, I.A. Alani, S.H. Estemirova, A.V. Makarov, V.A. Sirosh // Surface and Coatings Technology. 2021. – Vol. 421. – P. 127391, 1,1 п.л./0,66 п.л. (WoS)
10. Korobov Yu. Cavitation Resistance of WC-10Co4Cr and WC-20CrC-7Ni HVOF Coatings / Yu. Korobov, **H. Alwan**, N. Soboleva, A. Makarov, N. Lezhnin, V. Shumyakov, M. Antonov and M. Deviatyarov // Journal of Thermal Spray Technology. 2022. – Vol. 31. – P. 234–246, 0,82 п.л./0,47 п.л. (WoS)

#### **Патент РФ на изобретение:**

11. Установка для испытаний на кавитационную эрозию: патент РФ № 2710480 / Шумяков В.И., Коробов Ю.С., **Алван Х.Л.**, Лежнин Н.В., Макаров А.В., Девятьяров М.С.; заявл. 20.08.2018; опубл. 26.12.2019, Бюл. № 36. 9 с. 0,62 п.л./0,36 п.л.

#### **Прочие научные публикации по теме диссертации:**

12. Алван Х.Л. Сравнение стойкости против кавитации и абразивного износа наплавленных слоев из сталей 06X19H9T и Fe-Cr-Ti-Al / **Х.Л. Алван**, Ю. С. Коробов // Материаловедение и Триботехника. 2019. – С. 117-122, 0,38 п.л./0,25 п.л.

13. Алван Х.Л. Кавитационная стойкость наплавленных слоев из стали 06Х19Н9Т / **Х.Л. Алван**, В.А. Сирош, С.Х. Эстемирова // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: сб. тез. докл. XXV Уральской школы металловедов-термистов, Екатеринбург, 2020 г. – С. 169–171, 0,19 п.л./0,15 п.л.

14. Алван Х.Л. Кавитационная эрозия сварочной наплавки нержавеющей стали E308L-17 в растворе 3,5 % NaCl, / **Х.Л. Алван**, Н.Н. Соболева, Д.А. Прокопьев // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: сб. тез. докл. XXV Уральской школы металловедов-термистов, Екатеринбург, 2020 г. – С. 172–174, 0,19 п.л./0,15 п.л.

15. Alwan H.L. Comparative analysis of cavitation resistance of deposited/sprayed layers of carbides, stainless steels and metastable austenite / **H.L. Alwan**, Yu.S. Korobov, D.M. Elkind, V.A. Sirosh, A.V. Makarov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. – Vol. 1079. – P. 052073, 0,38 п.л./0,29 п.л.

16. Korobov Yu.S. Cavitation Resistance of Coatings with a Metastable Austenite Structure / Yu.S. Korobov, **H.L. Alwan**, M.A. Filippov, N.N. Soboleva, V.A Sirosh, A.V. Makarov, S.H. Estemirova // Thermal Spray 2021: Proceedings from the International Thermal Spray Conference May 24–28, 2021. – P. 290-297, 0,54 п.л./0,32 п.л.

17. Korobov Yu.S. The Cavitation Resistance of WC-10Co4Cr and WC-20CrC-7Ni HVOF Coatings / Yu.S. Korobov, N.V. Lezhnin, A.V. Makarov, **H.L. Alwan**, V.I. Shumyakov, N.N. Soboleva, M. Antonov, M.S. Deviatarov // Thermal Spray 2021: Proceedings from the International Thermal Spray Conference May 24–28, 2021. – P. 722-731, 0,63 п.л./0,41 п.л.

Объём 1,0 печ.л. тираж 100 экз.  
Типография ..... им. ....