

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора по науке,  
инновациям и цифровизации  
ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный университет»,  
доктор физико-математических

наук, доцент

Д.В. Костин

«01» декабря 2025 года



### Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу **Виноградовой Светланы Станиславовны** на тему «Научно-технологические основы повышения коррозионной стойкости изделий медико-инструментальной промышленности из хромоникелевых сталей с применением комбинированного метода обработки», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии

#### Актуальность темы исследования

Высокая коррозионная стойкость материалов для изготовления медицинского инструмента является одним из важнейших условий надежности его использования, определяющих возможность применения в течение гарантированного срока службы. Специфические условия использования, подразумевающие высокотемпературную стерилизацию, контакт с различными многокомпонентными агрессивными средами, а также специальная конструкция медицинского инструмента и особенности технологии его производства способствуют развитию коррозионных поражений, которые могут существенно снижать эффективность его применения и оказывать негативное влияние на организм человека. Особого внимания ввиду склонности их к локальной коррозии, приводящей к преждевременному выходу изделий из строя, заслуживают конструкционные материалы на основе железа с добавлением легирующих компонентов, таких как хром, никель, титан, молибден. В связи с этим поиск и разработка научно-обоснованных способов повышения коррозионной стойкости таких материалов в настоящее время являются актуальной задачей медико-

инструментальной промышленности, решение которой позволит расширить сферу их применения и решить проблему преждевременного выхода соответствующих изделий из строя. Наиболее опасным видом локальной коррозии для пассивирующихся металлов и сплавов, включая нержавеющие стали, является питтинговая коррозия (ПК), поскольку оценка коррозионной стойкости металлов и сплавов в условиях ПК существенно затруднена из-за сложностей мониторинга коррозионного состояния материала в процессе эксплуатации, установления закономерностей процесса и прогнозирования его результатов, в том числе, из-за сложной формы макроскопического питтинга. Остается нерешенным и ряд вопросов, связанных с выбором режима и параметров диагностирования питтингостойкости металлов в конкретных условиях эксплуатации. При этом с развитием методов электрохимической и плазмохимической модификации поверхности хромоникелевых сталей, повышающих их стойкость к питтинговой коррозии, открываются новые возможности для дальнейшего совершенствования технологий электрохимической защиты, ускоренных коррозионных испытаний и мониторинга пассивного состояния поверхности. Таким образом, актуальной проблемой является разработка эффективных технологических решений, предусматривающих комплексное использование методов мониторинга, прогнозирования и моделирования динамики локального растворения с целью повышения коррозионной стойкости нержавеющих сталей, применяемых в медицинской промышленности. Именно на решение этой проблемы направлено диссертационное исследование Виноградовой С.С., поскольку целью работы является, согласно тексту диссертации, «создание научно-технологических основ прогнозирования повышения коррозионной стойкости изделий медико-инструментальной промышленности на основе электрохимического мониторинга, базирующегося на введении понятия макропиттинг, моделировании процесса локальной коррозии и разработки комбинированной технологии модификации поверхности хромоникелевых сталей».

### **Общая характеристика работы**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованных источников, включающего 329 работ отечественных и зарубежных авторов, 14 приложений. Диссертация изложена на 329 страницах, содержит 53 таблицы и 79 рисунков.

Во введении обоснована актуальность темы, поставлены цель и задачи работы, описана структура диссертации, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. В первой главе представлен критический обзор литературных источников о требованиях, предъявляемых к коррозионной стойкости изделий медицинского назначения и медицинских инструментов в зависимости от материалов, из которых они изготовлены; дан анализ общих закономерностей, характеристик и факторов, влияющих на стойкость нержавеющей сталей к локальной коррозии. Особое внимание уделено моделированию процессов локальной коррозии, а также методам их исследования и мониторинга локальной коррозии. Проведена классификация методов модификации поверхностных слоев нержавеющей сталей. Во второй главе представлено обоснование выбора хромоникелевых аустенитных (12X18H10T, 10X17H13M2T) и аустенитно-ферритных (08X22H6T, 08X21H6M2T) сталей в качестве объектов исследования как наиболее распространенных в медико-инструментальной промышленности. Исследования проведены с применением широкого спектра современных методов, включая электрохимические (вольтамперометрия, хронопотенциометрия) и физические (рентгенофазовый, рентгенофлуоресцентный, рентгеноструктурный анализ, металлографическая микроскопия, оже-спектроскопия). Для модификации поверхности исследуемых материалов применялась высокочастотная плазменная установка. Моделирование питтинговой коррозии реализовано численным конечно-элементным методом в компьютерном пакете COMSOL Multiphysics и с использованием метода Монте Карло. В третьей главе для описания сложной интегральной характеристики развития питтинговой коррозии с формой, состоящей из основного питтинга и растущих внутри него вторичных питтингов, предлагается понятие «макропиттинг». Вводится набор основных параметров макропиттинга и описываются процедуры для его исследования. Разработан новый подход к мониторингу пассивного состояния нержавеющей сталей и предложены дополнительные критерии определения коррозионной опасности возникновения питтинговой коррозии. Построен алгоритм мониторинга коррозионного состояния высоколегированных хромоникелевых сталей с учетом варьирования внешних условий эксплуатации. В четвертой главе созданы модели, позволяющие прогнозировать развитие процессов образования макропиттинга. Разработана имитационная модель, позволяющая определить

время до начала стабильной точечной коррозии исследуемых сталей. Проведено численное моделирование роста стабильного питтинга с учетом образования осадков и солевой пленки, результаты которого согласуются с экспериментальными данными. Разработана трехмерная модель развития макропиттинга на основе метода Монте–Карло, позволяющая учесть формирование боковых отростков, сопровождающее развитие основного питтинга. В пятой главе описаны основы технологии комбинированной модификации поверхности, сочетающей электрохимическую обработку и низкотемпературное азотирование, которая обеспечивает значительное ускорение диффузии азота в приповерхностный слой материала, способствуя формированию высокопрочного защитного слоя, обладающего повышенной устойчивостью к механическому износу и коррозионным повреждениям. Предложены оптимальные режимы электрохимической модификации, обеспечивающие повышение коррозионной стойкости конструкционных материалов на основе исследованных легированных сталей. Экспериментально подтверждено, что применение технологии плазмохимического азотирования поверхностей нержавеющей сталей способствует одновременному улучшению износостойкости и коррозионной стойкости поверхности при максимальной температуре обработки 450 °С. В заключении отражены основные результаты, полученные при выполнении диссертационного исследования.

Диссертация и автореферат изложены научным языком и оформлены согласно требованиям, предъявляемым к диссертационным исследованиям на соискание ученой степени доктора технических наук. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов** обусловлены использованием современных аттестационных измерительных средств и апробированных методик физико-химических и электрохимических испытаний согласно ГОСТ: 9.908-85, 9.905-2007, 9.912-89; анализом точности измерений (ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002); анализом точности измерений; согласованностью теоретических расчетов с собственными экспериментальными данными и данными экспериментов и теоретических расчетов из литературных источников; использованием апробированных базовых методов математического моделирования и допущений, основанных на фундаментальных законах, а также современных

методов решения физических задач. Результаты измерений и исследований обрабатывались с применением методов математической статистики.

Основные результаты по теме диссертации, согласно списку литературы в диссертации, изложены в 71 печатной работе (47 из них указаны в автореферате), в том числе 40 статей в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 27 тезисов докладов, 1 монографии, 2 патентах, 1 свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Оценка новизны полученных результатов**

1. Разработаны научные основы прогнозирования коррозионной стойкости хромоникелевых сталей (12X18H10T, 10X17H13M2T, 08X22H6T, 08X21H6M2T) с использованием предложенного в работе понятия «макропиттинг» как интегральной характеристики развития метастабильного состояния, а также аналитической, численной и имитационной моделей развития макропиттинга и динамики локального растворения сталей. Разработан подход к мониторингу пассивного состояния поверхности хромоникелевых сталей, основанный на комбинации поляризации хромоникелевых сталей с последующей оценкой состояния коррозионных поражений в отсутствие поляризации.

2. Экспериментально определен новый эмпирический спектрально-частотный критерий опасности возникновения питтинговой коррозии  $k$ , равный тангенсу угла наклона кривой спектральной плотности, который позволяет четко разграничить области существования макропиттинга и активного растворения: активно-пассивное состояние определяется в диапазоне  $0,05 < k < 0,5$ ; локально-активное состояние – в диапазоне  $k > 0,5$ .

3. Установлены режимы процессов зарождения, развития и пассивации макропиттинга, характеризующиеся в появлении низкочастотных флуктуаций на хронопотенциограммах, которые определили необходимость учета состояния неустойчивой пассивации макропиттинга при определении времени развития коррозионного процесса до момента появления стабильного питтинга в рамках аналитической и имитационной моделей, в том числе, с учетом масштабирования бестоковых коррозионных и гальваностатических испытаний хромоникелевой стали в хлоридном растворе.

4. В рамках проведенного спектрально-частотного анализа на основе мониторинга, прогнозирования и моделирования коррозионной стойкости с учетом установленного коэффициента масштабирования впервые выбраны

оптимальные технологические параметры электрохимической обработки исследуемых сталей (плотность тока 0,05-0,15 А/м<sup>2</sup>, частота 0,04–0,6 Гц), а также определены длительность (60 мин) и мощность (1,1-2,8 кВт) высокочастотного индукционного разряда пониженного давления плазменного азотирования.

5. Разработана новая технология модификации стальных медицинских инструментов, представляющая собой сочетание электрохимической обработки поверхности сталей с применением частоты поляризующего тока в режиме пульсации и плазмохимического азотирования поверхностного слоя стальных образцов, комбинация которых способствует увеличению их коррозионной стойкости. Данная технология позволяет более чем в 2 раза повысить износостойкость и коррозионную стойкость поверхности хромоникелевой стали при одновременном существенном увеличении микротвердости (до 7,6 ГПа) на глубину до 2 мкм.

### **Значимость полученных результатов для науки и практики**

Теоретическая значимость работы состоит в том, что в ней на основе результатов теоретического моделирования и прогнозирования питтинговой коррозии, согласующихся с экспериментальными данными, разработаны научно-технологические основы модификации поверхностей стальных медицинских инструментов, позволяющие оценить момент инициации питтинговой коррозии и спрогнозировать время вызываемых этим процессом катастрофических разрушений.

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований, проведенных на этапах мониторинга, прогнозирования и моделирования, могут быть положены в основу формирования условий безопасной эксплуатации медицинских инструментов в течение гарантированного срока службы.

Практическая значимость работы заключается в разработке и внедрении в производство технологии комбинированной электрохимически-плазменной модификации стальной поверхности медицинских инструментов. Предложен паспорт макропиттинга, который может быть использован при выявлении и оценке глубины питтинговых поражений хромоникелевых сталей.

Получены значения параметров режима мониторинга пассивного состояния поверхности: пороговые смещения потенциалов, продолжительность периода длительности поляризации с целью

мониторинга поверхности в условиях начала питтинговой коррозии на исследуемых сталях, разработаны и запатентованы способы диагностирования аварийного состояния резервуаров.

Процессы плазмохимического азотирования в комбинации с электрохимической обработкой для повышения коррозионной стойкости медицинских инструментов, внедренные в производство на ООО «ПТО “Медтехника”» и ООО «Хелп», позволили получить суммарный экономический эффект в 7,89 млн руб. в год.

### **Рекомендации по использованию результатов работы**

Результаты диссертационной работы Виноградовой С.С. могут быть использованы для развития теоретических основ электрохимических процессов коррозии; при разработке электрохимических и комбинированных методов защиты конструкционных материалов от коррозии и обработки поверхности материалов.

Разработанная технология может быть внедрена и апробирована на изделиях медицинского назначения из мартенситных нержавеющей сталей 20Х13, 30Х13, 40Х13, 05Х18, 95Х18, 100Х13М, а также может быть использована на таких предприятиях как: ПК “Интермедсервис” (Москва), ГК “Омега Инновационные технологии” (Санкт-Петербург); АО “Микрохирургия глаза академика Святослава Федорова” (Москва); АО Можайский МИЗ (Можайск); ПАО “МИЗ им. М. Горького” (Нижний Новгород); АО “Нижнетагильский медико-инструментальный завод” (Нижний Тагил).

### **Замечания и вопросы по работе**

При чтении диссертации и автореферата возникают следующие замечания и вопросы:

1. Все работы, посвященные столь сложному явлению, как питтингообразование, учесть вряд ли возможно. Но автор не указывает большой цикл работ, выполненных в Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН под руководством проф. Кузнецова Ю.И. и посвященных способам экспериментального определения индукционного периода и скорости питтингообразования.

2. Понятие «макропиттинг» вводится автором, и это можно принять в качестве уточняющей терминологии, способствующей лучшему пониманию предложенной методики. Однако следует отметить, что питтинг всегда рассматривался как имеющий сложную структуру. В частности, в книге «Г.

Кеше. Коррозия металлов: физико-химические принципы и актуальные проблемы. Москва: Металлургия, 1984» на стр. 258, рис. 160 приведена фотография отдельных более мелких питтингов, возникших внутри крупного питтинга, при этом специального определения этому явлению не дано. Кроме того, следует дополнительно пояснить, в чем принципиальные отличия макропиттинга от уже известного понятия коррозионной язвы.

3. Стр. 98: «Мониторинг осуществляли в два этапа: первый этап – потенциостатическая поляризация, при этом величина смещения потенциала принимает значение *потенциодинамического потенциала коррозии...*». Что подразумевается под термином «потенциодинамический потенциал коррозии», который не является общепринятым?

4. На стр. 102 отмечается, что «Применение потенциостатического метода представляется обоснованным исключительно в тех случаях, когда имеется зависимость скорости электродного процесса от значения приложенного электрического потенциала, а не наоборот». Это звучит непонятно, так как зависимость потенциала от тока всегда взаимна: в потенциостатических условиях сила тока является функцией потенциала, в гальваностатических – потенциал является функцией силы тока.

5. Стр. 113: «...все исследуемые стали попадают в область растворения, характеризующуюся локально-активным состоянием, что связано с повышенной коррозионной активностью исследуемого раствора и *высокой концентрацией растворенного кислорода, способствующего процессу коррозии*». Здесь принципиальная неточность: коррозии не может быть в потенциостатических и потенциодинамических условиях, поскольку электрохимическое сопряжение между катодными и анодными процессами при поляризации нарушается, а кислород уже не является деполяризатором, в качестве последнего выступает внешняя цепь. Роль кислорода здесь может быть только в прямом, химическом взаимодействии с поверхностью металла, например, с образованием оксида. Но это стабилизирует пассивное состояние, а не разрушает его. При потенциостатической (или потенциодинамической) поляризации исследователь лишь моделирует парциальный анодный процесс, предполагая, что его закономерности сохранятся в бестоковых условиях. Поэтому для точного моделирования анодного процесса эксперименты нужно проводить в отсутствие окислителя, иначе катодный ток будет накладываться на анодный, и измеряется не парциальный анодный ток, а суммарный. Отсюда общий вопрос по всей методике: как контролировалось и контролировалось ли содержание

кислорода в электролите? Его концентрация и скорость катодного восстановления оказывают прямое воздействие на результаты электрохимических измерений. Дополнительно нужно отметить, что складывается впечатление, что в работе часто анодный ток отождествляется с током коррозии, и если это так, то это неверно: ток коррозии можно определить только в бестоковых условиях, или при гальваностатической поляризации, (если известен ток восстановления окислителя в этих же условиях), но не при поддержании потенциала электрода.

6. На стр. 96-97 утверждается: «Статистика вероятности экстремальных значений применена к данным о максимальной глубине МП для ее оценки на большой площади материала на основе исследования небольшой части этой области». Но питтингообразование является коллективным явлением, т.е. питтинги нельзя рассматривать независимо друг от друга; процесс характеризуется крайне неравномерным распределением электрического поля вдоль поверхности, особенно при наличии нескольких питтингов. При этом в практике борьбы с питтинговой коррозией принято считать, что вероятность обнаружения питтингов большой глубины возрастает с ростом площади обследованной конструкции. Это можно принять в качестве допущения, но тогда об этом следовало более четко заявить и доказать, что распределение питтингов по глубине не зависит от площади образцов. Ведь распределение электрического поля будет зависеть от геометрических размеров образца, краевых эффектов и т.д., а потому здесь просто экстраполяция от малых площадей образцов к большим не работает.

7. Диссертация и автореферат не лишены опечаток. Имеются неудачные выражения, к примеру, утверждение «Полученные данные послужили основанием для формулирования вывода о необходимости повышения коррозионной стойкости медицинских инструментов, изготовленных из нержавеющей стали, с целью обеспечения требуемого эксплуатационного ресурса и установленного нормативного периода гарантированной работоспособности изделий», заявленное в разделе «Теоретическая и практическая значимость», включает в себя очевидный, а не вытекающий из результатов работы вывод о необходимости противокоррозионной защиты стальных инструментов.

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой теоретической и практической значимости выполненных Виноградовой С.С. исследований, а вопросы и замечания могут быть использованы при развитии данного направления исследований.

## **Заключение**

Оценивая диссертационную работу Виноградовой С.С. в целом, следует отметить, что автором выполнена большая экспериментальная работа, позволяющая дополнить и расширить имеющиеся данные о повышении коррозионной стойкости изделий медико-инструментальной промышленности из хромоникелевых сталей с применением комбинированного плазменно-электрохимического метода обработки.

Тема и содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии в части пунктов:

- “Теоретические основы электрохимических и химических процессов коррозии, электроосаждения, электросинтеза, электролиза и процессов, протекающих в химических источниках электрической энергии” (п.1).

- “Электрохимические, химические, физические, биологические и комбинированные методы защиты конструкционных материалов от коррозии” (п.2).

- “Электрохимические, химические, физические и комбинированные методы обработки поверхности материалов и нанесения покрытий. Гальванопластика и гальваностегия” (п.3).

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, которая является завершённым научным исследованием и в которой получен большой объём новых данных, развиты научно-технологические основы прогнозирования повышения коррозионной стойкости изделий медико-инструментальной промышленности на основе электрохимического мониторинга, базирующегося на введении понятия макропиттинг, моделировании процесса локальной коррозии, а также разработана комбинированная плазменно-электрохимическая технология модификации поверхности хромоникелевых сталей.

Диссертационная работа Виноградовой Светланы Станиславовны на тему «Научно-технологические основы повышения коррозионной стойкости изделий медико-инструментальной промышленности из хромоникелевых сталей с применением комбинированного метода обработки» по совокупности актуальности, научной новизны, теоретической и практической значимости и достоверности полученных результатов удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842 (в текущей редакции), является законченной

научно-квалификационной работой, в которой содержится решение крупной научно-технологической проблемы, имеющей существенное значение для технологии электрохимических процессов и защиты от коррозии, а именно – создание и внедрение новых технологических процессов при производстве медицинских инструментов, которое основывается на развитых в работе научных основах мониторинга и прогнозирования коррозионной стойкости нержавеющей сталей, а также разработке новой комбинированной технологии модификации медицинских инструментов, позволяющей повысить их коррозионную стойкость.

На основании изложенного считаем, что Виноградова Светлана Станиславовна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии.

Диссертационная работа и автореферат Виноградовой Светланы Станиславовны обсуждены на заседании кафедры физической химии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет» (протокол № 13 от 13.11.2025).

Отзыв составил:

Заведующий кафедрой физической химии ФГБОУ ВО «ВГУ»,  
доктор химических наук (02.00.04 Физическая химия), доцент



Козадеров Олег Александрович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Воронежский государственный университет»

Сайт организации: <https://www.vsu.ru>

Электронная почта: [ok@chem.vsu.ru](mailto:ok@chem.vsu.ru)

Почтовый адрес: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, д. 1

Телефон: +7 (473) 220-85-46

Подпись Козадерова О.А. заверяю

Начальник отдела кадров

ФГБОУ ВО «ВГУ»



Зарудняя Татьяна Васильевна

Вход. № 05-8712

« 08 » 12 20 25 г.

подпись

