

## МЕХАНИЗМ БИОПОВРЕЖДЕНИЙ И НАВОДОРОЖИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

**В.В. Кураш, канд.техн. наук, доцент, А.В. Кудина, канд. техн. наук,  
А.В. Лизун, ассистент (БГАТУ)**

### Аннотация

*Изучена роль биологического фактора в зарождении и развитии коррозионных процессов металла. Раскрыт механизм биоповреждений и наводороживания металлоповерхностей деталей машин и технологического оборудования сельскохозяйственного производства при воздействии биологического фактора. Результаты исследований показали, что процессы биокоррозии и наводороживания металла неразрывно связаны с микроорганизмами и взаимодействием продуктов их жизнедеятельности с металлом, что приводит к его биоповреждаемости и наводороживанию.*

*The role of the biological factor for initiation and development of metal corrosion processes is studied. The mechanism of biodamages and hydrogen charging of metal car details and technological equipment for agricultural production by the influence of biological factor is cleared up. The research results showed that the processes of biocorrosion and hydrogen charging of metal are tied to coupling of microorganisms and their waste products with metal, that leads to its biodamageability and hydrogen charging.*

### Введение

В последнее время при изучении процессов коррозии всё большее внимание уделяется роли биологического фактора, вызывающего биокоррозионные повреждения и разрушения. На поверхностях деталей машин сельскохозяйственного производства, работающих в условиях контакта с почвенной биотой, органическими и химическими веществами, растительными и биологическими субстратами, постоянно протекают коррозионные процессы в скрытых или явно выраженных формах, причём носят они комплексный характер, где инициирование и развитие этих процессов относят часто к жизнедеятельности микроорганизмов [1-3]. Взаимодействие микроорганизмов с окружающей средой и материалами позволяют сделать заключение о необычайно широком распространении биокоррозии в различных сферах деятельности человека. В основе биоповреждающего действия микроорганизмов (бактериальная коррозия) находятся, как правило, ферментативные реакции, результатом которых является появление в зоне контакта биогенных элементов и химически активных радикалов. Механизм и результаты воздействия микроорганизмов как биологического фактора на металл аналогичны другим видам коррозии: подобно локальной сосредоточенной коррозии, в результате биоповреждений образуются блестящие или шероховатые плоские малозаметные углубления, особенно под загрязнениями или тонкими окисными пленками, а также раковины различной глубины под слоем продуктов коррозии [1-3].

Известно, что в биокоррозии участвуют микроорганизмы, относящиеся к широкому кругу родов и видов. Это, как бактерии, образующие кислоты и химически активные радикалы, так и грибы, вызывающие деформацию материалов, ускорение коррозии металлов и пр. Исключительность микроорганизмов проявляется в их способности существовать в самых разнообразных условиях внешней среды и противостоять действию факторов, неблагоприятных для живой клетки. Микроорганизмы способны образовывать специальные формы защиты, предназначенные для сохранения в неблагоприятных условиях. Такие формы представляют собой образования, покрытые плотной оболочкой, защищающей клетку от высокой температуры, высушивания, радиации, воздействия биоцидов и т.п. [1,3].

Известна способность некоторых микроорганизмов выделять в процессе жизнедеятельности водород [1-4]. В одних случаях он является продуктом их жизнедеятельности, а в других – окисляется, давая энергию и обеспечивая возможность осуществления разных биосинтетических процессов. Водород является тем компонентом биосферы, при участии которого осуществляется взаимосвязь в природных условиях ряда микроорганизмов, что важно, а иногда и необходимо для их роста, а также имеет большое значение для общего круговорота веществ [4].

В результате жизнедеятельности микроорганизмов в зоне контакта с материалами растормаживаются наиболее затрудненные этапы коррозионного про-

цесса, резко увеличивается скорость роста усталостных трещин и снижается циклическая трещиностойкость и водородостойкость [1]. Изучение закономерностей превращения металлов под влиянием деятельности микроорганизмов имеет не только научное, но и большое практическое значение. Существует мнение, что более 70% коррозионных процессов связано с влиянием и участием микроорганизмов, причем, ведущая роль в зарождении коррозии принадлежит микробам различных родов и видов. Более 3/4 всех потерь от коррозии приписывают деятельности микроорганизмов. Так, ежегодный ущерб от биокоррозии в Австралии приближается к 25 млн. долларов в год, в США потери от биокоррозии, протекающей вследствие деятельности сульфатредуцирующих бактерий, оцениваются в 500-2000 млн. долларов в год [1]. Эти данные убедительно свидетельствуют о значительной роли микроорганизмов в коррозионных процессах повреждения и разрушения материалов, в то время как механизм воздействия биологического фактора на материалы изучен ещё недостаточно.

Следовательно, исследование и раскрытие механизма биоповреждений и наводороживания деталей машин, подвергающихся воздействию биологического фактора, представляет, как научный, так и практический интерес для понимания особенностей разрушения металла под влиянием микроорганизмов, что крайне необходимо для совершенствования и разработки технологий защиты материалов от разрушающего действия этих процессов.

#### Основная часть

При исследованиях биоповреждений и наводороживания металла возникает ряд методологических трудностей:

– на ранних стадиях биоповреждений сложно исследовать эти процессы без идентификации микроорганизмов, так как без привлечения специалистов они могут остаться нераспознанными;

– в своём развитии процессы биоповреждений трудно моделировать и прогнозировать из-за взаимного влияния микроорганизмов, входящих в биоценозы, синергических эффектов в отношении материалов, адаптации и влияния материалов, а также среды на микроорганизмы;

– при оценке степени биоповреждений материалов затруднено выделение вклада микроорганизмов, так как процессы биоповреждений и коррозии во многом схожи, поэтому в реальных условиях эти процессы желательно изучать совместно.

Механизм биоповреждений и наводороживания металлоповерхностей деталей машин и технологического оборудования весьма сложен и во многом зависит от биофакторов. Биофакторы воздействуют на материалы специфически, потребляя их в качестве

источников питания, или косвенно, когда продукты метаболизма микроорганизмов стимулируют процессы биокоррозии. Эти процессы по своему механизму различны и зависят также от особенностей подверженного биокоррозии объекта. В большинстве случаев биофакторы способствуют созданию агрессивных сред, которые ускоряют коррозионные процессы [1].

Коррозионностойкость металлов и других материалов зависит от ряда причин, в том числе и от взаимодействия их с окружающей средой и микроорганизмами. Причем, взаимодействие металлов с микроорганизмами следует рассматривать с двух позиций:

– токсическое влияние металлов на жизнедеятельность микроорганизмов;

– трансформация металлов под воздействием микроорганизмов и продуктов их метаболизма.

Наиболее распространёнными биофакторами коррозионных процессов являются сульфатредуцирующие, тионовые и нитрифицирующие бактерии, создающие кислые агрессивные среды, органические кислоты и активные метаболиты ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) [1]. Фотографии деталей, рабочие поверхности которых подверглись коррозионно-механическому изнашиванию при контакте с техногенной биологически активной средой, представлены на рис. 1.

Анализ и обобщение результатов исследований [1-3, 5-7] показывает, что в биокоррозии можно выделить два пути участия микроорганизмов в коррозионном процессе:

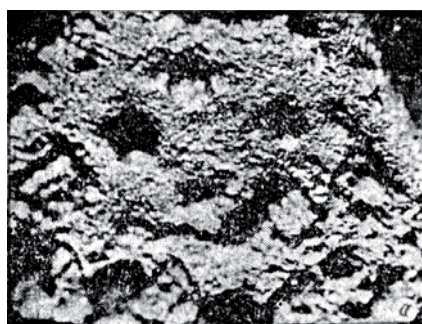
– создание агрессивных сред в результате накопления таких продуктов жизнедеятельности, как кислоты, щелочи, сульфиды и другие агрессивные ионы;

– непосредственное участие в одной или более электрохимических реакциях на поверхности корродируемого субстрата, что способствует началу или усилению электродных реакций.

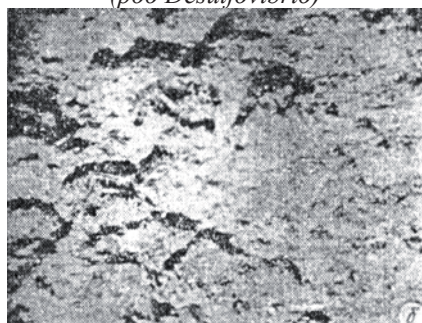
Основные механизмы участия бактерий в коррозионном процессе сводятся к продуцированию ими коррозионно активных метаболитов или непосредственному участию в электрохимических реакциях. Литотрофные бактерии окисляют неорганические соединения и, чаще всего, выступают в качестве коррозионных агентов в средах с повышенным содержанием железа, а гетеротрофы осуществляют окисление широкого круга органических соединений и способствуют накоплению коррозионно активных метаболитов. Воздействия биофактора на металлоповерхности деталей машин при их взаимодействии приводятся в работах [1-7]. Результаты экспериментальных работ – фотографии металлоповерхностей образцов, повреждённых биокоррозией, представлены на рисунке 2. Образцы готовились размером 30 x 30 x 6 мм из стали 20, ГОСТ 1050-74 и помещались в культуральную среду со штаммами микроорганизмов сроком на 30 суток.



Рис. 1. Рабочие поверхности деталей, подверженных коррозионно-механическому изнашиванию при воздействии биологического фактора



Сульфатредуцирующие бактерии  
(род *Desulfovibrio*)



Тионовые бактерии (род *Thiobacillus*)

Рис. 2. Образцы металлоповерхностей из углеродистой стали, повреждённые средой, содержащей штаммы бактерий, X 320

Из фотографий металлоповерхностей (рис. 2) видно, что на образцах, находившихся в культуральной жидкости, содержащей штаммы тионовых и сульфатредуцирующих бактерий, отчётливо видны питтинги, которые не наблюдались на образцах, выдержанных в обычной жидкости при тех же условиях. Это свидетельствует о результатах протекающей бактериальной коррозии, способствующей

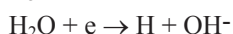
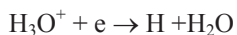
структурному разрыхлению поверхностного слоя и возникновению электрохимической гетерогенности. Структуру металлоповерхностей, поражённых биокоррозией, исследовали и анализировали методами оптической световой микроскопии (металлографии) и фрактографии. Металлографические исследования поверхностного слоя проводились в продольном и поперечном сечении на электронном световом микроскопе “Unimed” (Япония) при увеличении в 300...500 раз по методике [5]

Разрыхлённые биокоррозией металлоповерхности становятся зоной повышенной химической активности, где интенсивно зарождаются и протекают сорбционные процессы, приводящие к поглощению металлом химически активных элементов и радикалов, выделившихся при метаболизме микроорганизмов, в том числе и водорода. Установлено, что водород выделяют хемотрофные и фототрофные микроорганизмы, относящиеся более чем к восьмидесяти родам [4]. Адсорбция металлом водорода приводит к его накоплению, как в поверхностных слоях, так и в глубине структуры материалов, что приводит к развитию наводороживания и водородному растрескиванию [6]. Локальная концентрация водорода в дефектах структуры приводит к её разупрочнению и разрушению. Известно [1, 2, 6, 7], что наводороживание характеризуется более высокой диффузионной подвижностью водорода и резким отрицательным влиянием поглощённого водорода на механические свойства металла.

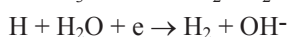
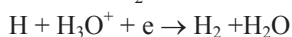
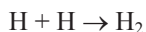
Адсорбция водорода, выделяющегося при биокоррозии на пятнах контакта биосреда-металл, происходит в большинстве случаев на дефектных участках поверхности металла (микровпадины, микротрещины, царапины, вмятины, вырывы и т.п.), в которых образуются колонии микроорганизмов и выделяются про-



дукты метаболизма и деструкции клеток. Особенно-стью процесса наводороживания при воздействии биологического фактора является то, что он протекает при участии микроорганизмов, которые способны выделять в окружающее пространство биогенный и атомарный водород. Выделяющийся водород, облада необычайно высокой активностью и проникающей способностью, концентрируется в дефектах структуры металла и образует молекулы газа. Образовавшийся газ стремится расширяться в ограниченном пространстве и, не имея возможности выйти из него, создаёт высокие внутренние напряжения, что формирует условия для зарождения и развития субмикро- и микротрещин. Кроме того, в очагах коррозионного поражения протекают также электрохимические процессы, и наводороживание металла может происходить путем диффузии в глубь металла атомов водорода, появляющихся на его поверхности в результате разряда ионов  $H_3O^+$  (в кислых растворах электролитов) или молекул  $H_2O$  (в нейтральных, щелочных и кислых растворах) при больших плотностях катодного тока.



Небольшая часть атомов проникает в поверхностные слои металла катода, но основная масса их превращается на поверхности по одному из следующих вариантов:



Водород в молекулярной форме не способен проникать в металл, он удаляется с его поверхности, диффундируя в окружающую среду.

При образовании  $H_2S$  на пятне контакта металла с коррозионной средой может выделяться водород и наводороживать металл по следующей схеме:



На наводороживание влияет также относительно тонкий поверхностный слой металла, имеющий специфическое напряженно-деформированное состояние. Он появляется в результате механической или термической обработки металла и значительно отличается от глубинных слоев по своей микроструктуре. Накопление дислокаций и формирование растягивающих внутренних напряжений благоприятствуют возникновению субмикро- и микроколлекторов, заполняющихся водородом. Кроме коллекторов, заполненных молекулярным водородом, атомарный (диф-

фузионно-подвижный) водород попадает в ловушки внутренней структуры металла (вакансии, дислокации, области объемного растяжения кристаллической решетки), обусловленные полями внутренних локальных напряжений. Структура поверхностного слоя металла, подвергшаяся биокоррозии и наводороживанию, представлена на рис. 3.

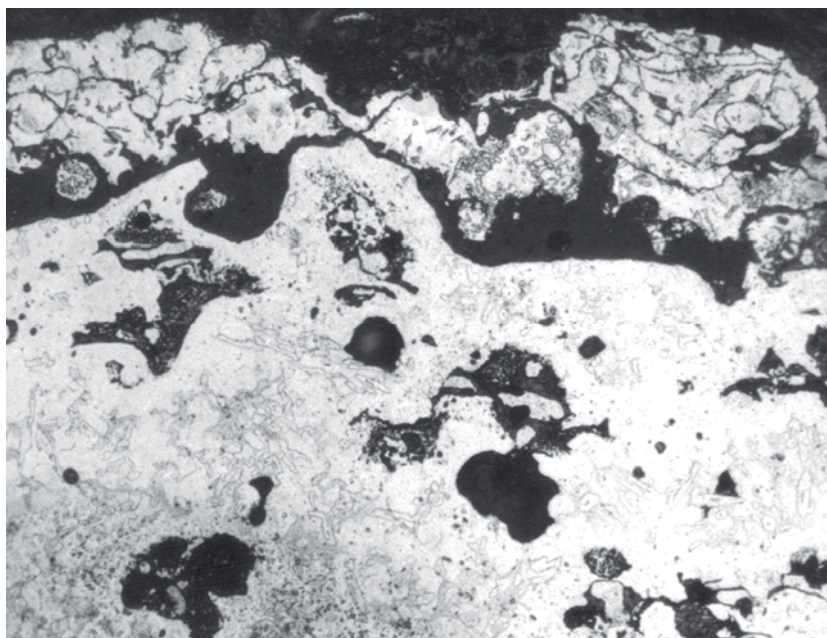


Рис. 3. Структура поверхностного слоя стального образца, подвергшегося биокоррозии и наводороживанию, X 500

На рис. 3, в верхней его части (толщ. 0,075...0,20 мм), отчетливо виден повреждённый биокоррозией тонкий поверхностный слой металла с характерными повреждениями и разрушениями структуры. Под биоповреждённым слоем структуры металлоповерхности формируются локальные очаги разрушения целостности структуры основного металла в виде внутренних микродефектов (трещины, пустоты, полости, коллекторы и пр.), в которых происходит накопление водорода. Трещины зарождаются в зоне максимальных растягивающих напряжений, в вершинах микродефектов, расположенных вблизи поверхности металла по границам зерен. Развитие трещины приводит к образованию микропустот и их соединению (слиянию) с другими внутренними микродефектами, находящимися под высоким давлением водорода. Водород получает доступ к новым внутренним поверхностям структуры металла и, при их резком увеличении, взаимодействует с ними, способствуя интеркристаллитному растрескиванию металла. Накопление повреждений структуры металла и аномально высокое насыщение его водородом приводит к сильному ухудшению таких механических характеристик металла, как выносливость при циклическом деформировании [1]. Основная причина этого явле-

ния – наводороживание металла с формированием поверхностного водородонасыщенного слоя. Знакопеременное деформирование наводороженного металла приводит к некоторому перераспределению водорода по глубине металла, толщина водородонасыщенного слоя увеличивается, максимум водородосодержания сглаживается. Происходит движение водорода вглубь объема материала.

Процесс наводороживания неразрывно связан с разрушением структуры, как поверхностного слоя, так и основного металла, поэтому его следует рассматривать применительно к механизмам водородного изнашивания и водородного растрескивания. Исходя из общей кинетики изнашивания поверхностей деталей машин и механизмов [2], механизм биоповреждений и наводороживания металла при воздействии биологического фактора представляется в следующем виде:

1. Размещение на металлоповерхностях деталей микроорганизмов, переносимых непосредственно из почвенной биоты и биосферы воздушными потоками, насекомыми и пр.; образование в дефектах поверхности металла микроколоний; адгезия микроорганизмов с поверхностью и налипание питательных сред в виде органохимических пленок и слоев.

2. Биоценоз и синтрофизм микроорганизмов, деструкция их под воздействием физических нагрузок и скоростей, образование химически активных элементов и радикалов, биогенного и атомарного водорода;

3. Адсорбция продуктов метаболизма микроорганизмов поверхностью металла и образование питтинговых центров бактериальной коррозии (биокоррозии), результатом которой становится разрыхление и разрушение поверхностного слоя.

4. Превращение биогенного и атомарного водорода внутри дефектов структуры металла в молекулы и образование в них накоплений газа, что приводит к созданию высоких внутренних напряжений;

5. Разрыв структурных связей и кристаллической решетки под действием высоких локальных напряжений с образованием субмикро- и микротрещин, в которые устремляется водород, приводит к усилению процессов разрушения структуры и наводороживанию металла.

Полученные результаты исследований позволяют расширить представления о механизмах потери работоспособности узлов и деталей машин при контакте с техногенными биокоррозионными средами сельскохозяйственного производства и переработки сельхозпродукции.

### **Заключение**

Результаты исследований причин интенсивного износа и наводороживания металлоповерхностей деталей сельскохозяйственных машин при воздействии биологического фактора показывают многогранный характер и сложность этих процессов. По своему механизму они различны и зависят не только от биофактора и продуктов метаболизма микроорганизмов,

но и от состояний водорода, образующегося в зоне контакта биосреда-металл, а также от особенностей подверженного их воздействию объекта. Биокоррозия и наводороживание металла характеризуются более высокой диффузионной подвижностью химически активных элементов, радикалов и образовавшихся атомов водорода, разупрочнением структуры металла и резким отрицательным влиянием поглощенного водорода на механические свойства материала.

Исходя из кинетики изнашивания металлоповерхностей деталей машин и технологического оборудования, а также с учётом полученных результатов исследований, разработан и предложен механизм биоповреждений и наводороживания деталей машин сельскохозяйственного производства.

Результаты исследований по биокоррозионному повреждению и наводороживанию металлоповерхностей деталей рабочих органов машин, агрегатов и сборочных единиц сельскохозяйственной техники при воздействии биологического фактора позволяют заключить, что процессы биокоррозии и наводороживания металла неразрывно связаны с жизнедеятельностью микроорганизмов, взаимодействием продуктов их метаболизма с окружающей средой и материалами.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Гвоздев, А.Е. Кинетические особенности биокоррозии для легированных сталей / А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Н.Б. Фомичева. – Тула: ТулГУ, 2004. – 600с.
2. Ивашко, В.С. Теоретические аспекты кинетики изнашивания поверхностей деталей машин и механизмов / В.С. Ивашко, В.В. Кураш, А.В. Кудина // Вестник Белорусск. национ. технич. ун-та. – Мн.: БНТУ. – 2005. – № 5. – С. 59-63.
3. Ивашко, В.С. Разрушение микроорганизмами материалов деталей машин и механизмов по производству и переработке сельхозпродукции / В.С. Ивашко, В.В. Кураш, А.В. Кудина // Агропанорама. – Мн.: БГАТУ. – 2007. – №2. – С. 36-40.
4. Кондратьева, Е.Н. Молекулярный водород в метаболизме микроорганизмов / Е.Н. Кондратьева, И.Н. Гоготов. – М.: Наука, 1981. – 344с.
5. Тушинский, Л.И. Методы исследования материалов. Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий: учеб. пособ. для студентов вузов/ Л.И. Тушинский. – М.: Мир, 2004. – 384с.
6. Кураш, В.В. Исследование наводороживания металлоповерхностей деталей рабочих органов машин, агрегатов и сборочных единиц сельскохозяйственной техники / В.В. Кураш, Ю.И. Титов, А.В. Кудина // Агропанорама. – Мн.: БГАТУ. – 2010. – №3. – С. 39-42.
7. Кураш, В.В. Технологическое обеспечение формирования эксплуатационных свойств машин производств микробиологического синтеза: автореф. дис. канд. технич. наук: 05.02.08; 05.02.04 / В.В. Кураш; БПИ. – Минск, 1991. – 15с.