

необходимости проведения дополнительных исследований, в том числе экспериментальных с определением напряжений в элементах балки.

ВЫВОДЫ

1. Проведены экспериментальные исследования составных балок следующего конструктивного решения: клефанерная балка с плоской стенкой вклеенной в паз осуществленный в полках из цельной древесины; клефанерная балка с плоской стенкой с поясами из деревянных брусков, приклеенных по бокам стенки; клефанерная балка с волнистой стенкой, вклеенной в паз осуществленный в полках из цельной древесины; составная балка с поясами из деревянных брусков соединенных со стенкой из OSB на шурупах. Построены графики деформирования балок под нагрузкой.

2. Разработана компьютерная модель составной балки с поясами из деревянных брусков соединенных со стенкой из OSB на основе МКЭ, позволяющая получать пространственное распределение напряжений в элементах составной балки при различных способах нагружения.

3. Проведен сопоставительный анализ результатов исследований. Полученные распределения продольных и касательных напряжений в элементах составной балки из деревянных брусков соединенных со стенкой из OSB подтверждаются положениями, заложенными в основу расчета составных балок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции. Нормы проектирования. М.: Стройиздат 1996.

2. Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80) / ЦНИИСК им. Кучеренко. - М.: Стройиздат, 1986.

3. Конструкции из дерева и пластмасс. Учебное пособие для вузов/ Под редакцией проф. Иванова В.А. –К: В. Школа,1981-392 с.

4. ДБН В.1.2-2:2006 Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. / Минстрой Украины.- К 2006.

5. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. Нормы проектирования. - М.: Стройиздат, 1990.

6. СНиП III-18-75. Металлические конструкции. Правила производства и приемки работ. -М.: Стройиздат, 1979.

7. Беленя Е.И., Балдин В.А., Ведеников Г.С. Металлические конструкции. – М.: Стройиздат, 1986. – 560 с.

8. Бондин В.Ф., Бойтемиров Ф.А. Расчет прочности на выдергивание стальных стержней, вклеенных в древесину // Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. – 1974. - №7. – С. 32-37.

9. Бондин В.Ф., Вылегжанин Ю.Б. О прочности на сдвиг клеевых соединений стальных стержней с древесиной //Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. – 1976. - №11. – С. 20-24.

10. Воронович А.П. Устойчивость обшивки с заполнителем при сжатии и сдвиге: Дис... канд.техн.наук: 01.02.03. - М., 1958. – 220 с.

УДК 669.017

ВНУТРЕННЕЕ РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛА НАГРУЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Стрижаков К.П., научный руководитель Корохов В.Г., к.т.н., профессор

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Прочностные расчеты не во всех случаях позволяют гарантировать долговременную прочностную надежность конструкций, предназначенных для сложных условий их эксплуатации.

Отсутствуют достаточно достоверные методики расчета, позволяющие предупредить развитие разрушающих трещин металла периодически или постоянно соприкасающегося с электропроводной жидкостью. Практически невозможно в эксплуатирующихся конструкциях определить факт образования и развития трещины, сроки и место вероятного разрушения конструкций вследствие таких опасных разновидностей коррозии стали, как межкристаллитная, интеркристаллитная, коррозионное растрескивание [1].

Цель настоящей работы состоит в систематизации и анализе изученного материала о межкристаллитном разрушении металлов и в составлении на этой основе для проектировщиков, изготовителей и эксплуатационников необходимых рекомендаций по предотвращению межкристаллитного коррозионного разрушения стальных несущих элементов конструкций. Представленные рекомендации разработаны на основе обобщения проведенных наблюдений, и исследований железобетонных конструкций и сварных конструкций из нержавеющей сталей, а также на основе анализа литературных источников о причинах и динамике межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания. Использование этих рекомендаций позволит в конструкциях из стали или со стальными элементами минимизировать и, по-возможности, исключить вероятность их внезапного разрушения вследствие образования и развития такого вида коррозии.

При межкристаллитной коррозии в нагруженных стальных элементах конструкций возникают трещины, которые предварительно никак не проявляют себя и не распознаются, в то же время, ослабляя поперечное сечение несущего элемента конструкции до того предела, когда металл уже не выдерживает больших удельных нагрузок и разрушается. В закрытых конструкциях, таких как железобетонные с множеством несущих арматурных стержней и большой их протяженностью, практически невозможно обнаружить образование и развитие очага разрушения. Оно всегда бывает непредсказуемым, как по факту образования, так и по продолжительности развития трещины в металле конструкции, вплоть до её разрушения. Практика показывает, что этот период бывает продолжительностью от нескольких недель до нескольких лет. Такие разрушения подобны усталостным разрушениям, например автомобильных рессор. Но в этих случаях на основе опыта эксплуатации с некоторым приближением удаётся прогнозировать срок службы устройства до вероятного возникновения усталостной трещины. По истечении этого срока элементы конструкции заменяются новым, а снятые – диагностируются. Существует одномоментный способ инструментального определения предвестников усталостного разрушения нагруженных стальных деталей. Он основан на ударном внедрении индентора в металл с фиксацией скорости перемещения индентора в металле, после чего интегрированием и дифференцированием диаграммы скорости получают, соответственно, диаграммы пути и ускорения, которые близко коррелируются с механическими свойствами металла. Но где находится опасное место, в которое нужно внедрить индентор прибора все-таки не известно.

Указанные способы не приемлемы для крупных несущих металлоконструкций, для железобетонных конструкций с множеством арматурных элементов вследствие непрогнозируемости самого места вероятного образования коррозионной трещины, скорости развития, степени воздействия среды на металл, влияния одновременно действующих нагрузок.

При проведении лабораторных испытаний на легконаблюдаемых образцах, возможно, выявить влияние концентрации среды, нагрузок, механических свойств стали на сроки образования и характер развития коррозионных трещин [2]. Но на реальных, недоступных для наблюдения элементах эксплуатируемых конструкций – это практически невозможно, в чём и состоит сложность решения поставленной задачи по предупреждению возникновения межкристаллитной коррозии и её разрушительных последствий. Вместе с тем, возможно предупредить возникновение указанного явления путём исключения сочетания провоцирующих факторов. В этом случае важен анализ сочетания факторов, вызывающих коррозионное разрушение конструкций и сравнение этих факторов с условиями

эксплуатации конструкции и физико-химическими свойствами стали этой конструкции. Это позволит с определённой вероятностью предвидеть, что в таких-то условиях и при таких-то обстоятельствах возможно или невозможно развитие коррозионного очага разрушения. При этом для надёжности сопоставления проектируемой конструкции с накопленными опытными данными целесообразна классификация конструкционных материалов и условий эксплуатации конструкции, как по химическим и механическим особенностям, так и по сочетанию их наиболее характерных признаков.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Указанным видам скрытого коррозионного разрушения металла подвергаются как нержавеющие, так и углеродистые стали.

Нержавеющие стали подвержены трём видам коррозионного разрушения: общей поверхностной коррозии, межкристаллитной и коррозионному растрескиванию.

Общая коррозия проявляется в равномерном её распространении по всей поверхности на некоторую глубину металла. Главным фактором, определяющим стойкость нержавеющей стали, является содержание в ней хрома, которое должно быть более 14%. Общая коррозия не представляет особой опасности по сравнению с межкристаллитной.

Межкристаллитная коррозия характеризуется разрушением металла в глубину по границам зёрен. Металл, поражённый этим видом коррозии, при простукивании не издаёт металлического звука и легко разрушается при небольшом усилии. Межкристаллитная коррозия возникает в нержавеющей стали аустенитного класса, находящейся в электропроводной среде при условии предварительного нагрева стали до температур $400^{\circ}\dots 800^{\circ}\text{C}$. Это происходит в зоне термического влияния сварного шва, где по границам зёрен выделяется избыток углерода в виде карбида Cr_{23}C_6 . В результате этого границы обедняются хромом, и образуется сетка таких карбидов. Карбиды и аустенит зёрен имеют разные электрохимические потенциалы. Так как потенциал пограничных участков аустенитного зерна понижается, то при наличии электропроводной жидкой среды границы зерен становятся анодами, и в месте контакта карбидов и аустенита возникает микрогальваническая пара и электрохимическая коррозия по всей поверхности зёрен. Это приводит к межкристаллитному разрушению металла. В нержавеющей стали это происходит в результате её нагрева при сварке, что ограничивает возможность сварки нержавеющих сталей, аустенитного класса. Нельзя нагревать и сваривать такие стали как 08X18HЮ, 12X18H9, 17X18H9. При малом содержании углерода и легировании титаном и никелем, возможно, сваривать и нагревать такие стали, как 008X18H10T, 08X18H10T, X18H12T, 12X18H10T, X14Г14H3, при этом возможно использовать конструкции в агрессивной электропроводной среде [4].

Коррозионное растрескивание нержавеющих сталей состоит в образовании тонких трещин, проходящих по телу зерна или между зёрнами. Оно происходит в сталях, находящихся в коррозионной жидкостной среде, и испытывающих растягивающие напряжения или остаточные внутренние напряжения после пластической деформации. Такому растрескиванию подвержена, например, аустенитно-ферритная сталь 12X21H5T и аустенитно-мартенситная сталь 09X15H8Ю.

Углеродистые и низколегированные стали, в отличие от нержавеющих, чаще подвергаются коррозионному растрескиванию. Механизм этого процесса отличается от разрушения нержавеющих сталей. Для углеродистых сталей не является провоцирующим фактором сочетание нагрева при сварке и коррозионной среды. Главным в этом случае будет сочетание электропроводной жидкостной среды, растягивающих напряжений, испытываемых металлом, и малая пластичность стали, или же снижение пластичности в результате остаточной деформации после растяжения стали.

Коррозионное растрескивание никогда не возникает в результате действия сжимающих напряжений. Наоборот, сжимающие остаточные поверхностные напряжения в ряде случаев используют для защиты металла от коррозионного растрескивания. Эффективно также применение катодной защиты. Однако, если катодная защита не была использована

изначально для данной конструкции, то в случае начавшегося развития электрохимической коррозионной трещины, применение катодной защиты не окажет требуемого влияния.

Нами изучен ряд случаев разрушения конструкций вследствие межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания в момент происходящего разрушения [3]. Установлены признаки, характерные для выше указанных видов коррозии.

1. Межкристаллитное коррозионное разрушение нержавеющей трубы запорного вентиля, приваренной к нержавеющей ёмкости, произошло в околосварной зоне (Нижегородский консервный завод, 1986г.). Ёмкость использовалась для кратковременного хранения виноградного и яблочного соков в течение четырёх предшествующих лет. Это время следует считать продолжительностью развития межкристаллитной коррозии. Излом произошёл при малой нагрузке, внезапно и по всему кольцевому поперечному сечению трубы диаметром 33мм, толщиной стенки 4мм, на расстоянии 7-10мм от границы сварного шва, где при сварке труба нагревалась до температуры $800^{\circ}\dots 1000^{\circ}\text{C}$. Излом хрупкий, мелкокристаллический, без блеска и без видимой деформации зёрен металла. Поверхность излома – крупнорельефная, звук при изломе без характерного металлического звучания – слабый, глухой, - так ломается мел. С обнажённой поверхности отверткой легко отделили крошкообразные кристаллы хрупкого металла.

Эти признаки характерны для межкристаллитного коррозионного разрушения нержавеющей стали, нагретой вблизи сварного шва и находящейся в электропроводной коррозионной среде.

2. Изучено массовое разрушение железобетонных опор электропередач вследствие коррозионного растрескивания стальных арматурных стержней класса А-IV диаметром 12мм. Это произошло в 1993г. более, чем в десяти железобетонных опорах, изготовленных Симферопольским заводом ЖБИ. Причины этих разрушений опор выяснялись в условиях полигона, где они были установлены, в заводских условиях – анализом технологического процесса изготовления опор, и постоянного наблюдения в течение 20 дней за специально заформованной опорой, не прогреваемой в пропарочной камере, а также изучением механических свойств и химсостава металла арматуры, металла в лабораторных условиях. Спектральный анализ химсостава арматурной стали показал соответствие этой стали требованиям стандарта. Металлографический анализ разрезанной арматуры, взятой из разрушенных железобетонных опор и новой – со склада, не показал наличия в стали каких-либо дефектов. Механические испытания на растяжение образцов арматуры из железобетонных опор и со склада показали, что во всех случаях предел прочности арматуры находится в соответствии с требованиями стандарта, однако, ряд образцов арматуры из разрушенных опор и со склада имел относительное удлинение значительно меньшее, чем регламентировано стандартом. И это явилось одним из признаков, сочетание которых спровоцировало возникновение межкристаллитной коррозии. Два других признака дополнили опасное сочетание. Это – недостаточно строгий контроль, создаваемого преднапряжения арматуры, переходящего в значительную пластику, и электропроводность жидкостной среды бетона или другой жидкости, попадающей на арматуру.

Коррозионные межкристаллитные трещины развивались быстро – опоры разрушались через две – пять недель после их изготовления. Причины разрушения – в сочетании нескольких факторов:

- чрезмерного преднапряжения арматурных стержней, сопровождающегося пластической деформацией;

- малой пластичности арматуры, поставляемой заводом, – относительное удлинение от 4,5% до 5%, при гарантируемом – не менее 6%. Арматура проверялась как из разрушенных изделий, так и новая, хранящаяся на складе;

- наличие электропроводной щелочной среды бетона, в которой находилась сталь.

Поскольку изделия обрабатывались в пропарочной камере, то был поставлен дополнительный опыт, при котором бетон заформованной опоры набирал прочность в естественных условиях цеха при температуре $16^{\circ}\dots 20^{\circ}\text{C}$. В этом случае коррозионное

разрушение одного из арматурных стержней произошло на двадцатые сутки после формования, что также указало на быстрое развитие коррозионных трещин и исключило влияние пропаривания, как катализатора, но подтвердило влияние сочетания выше указанных провоцирующих факторов.

Вид разрушенной поверхности в поперечном сечении арматуры из стали 20ХГ2С отличается от разрушенной нержавеющей стали тем, что в месте разрыва арматуры сталь имеет вид ржавого металла со слегка волнистой поверхностью и нетронутый коррозией – маленький участок поперечного сечения $5...7\text{мм}^2$ – участок кристаллического разрыва. Это место ещё «здорового» металла, который не выдержал большой удельной нагрузки. Такой же вид имело поперечное сечение арматуры, когда один из стержней внезапно разрушился под ударами молотка по бетону, от которого освобождалась арматура опоры, доставленной с полигона. В месте разрыва обнаружилось поверхности развившейся коррозионной трещины, также имеющие вид ржавой стали.

Описанные примеры указывают на быстрое развитие коррозионных трещин вследствие действия больших растягивающих напряжений, малой пластичности металла и электропроводной коррозионной среды.

3. Разрушение железобетонной опоры троллейбусной линии произошло в 2003г. на участке дороги вблизи Симферопольской ГРЭС. Опора переломилась буквой «Г» в сторону натянутых проводов на расстоянии около 1,5м от земли. На наружной стороне опоры, испытывающей растяжение, были обнаружены два разорванных арматурных стержня с уже указанными нами характерными признаками коррозионного растрескивания. Каждый из стержней был разорван на разной высоте от земли. Остальные стержни конструкции были только изогнуты без изломов. Проанализировав данный случай, сделаны следующие выводы:

- исходя из срока эксплуатации этой железобетонной конструкции, межкристаллитные коррозионные трещины развивались в ней значительно дольше, чем в выше рассматриваемом случае;

- разрушение арматуры произошло в растянутой зоне, дополнительным провоцирующим фактором к её первоначальному преднапряжению была нагрузка от натяжения проводов троллейбусной сети;

- для создания коррозионной среды оказалось достаточным небольшого количества атмосферной влаги, периодически проникающей к арматурным стержням вследствие капиллярного эффекта [5];

- отсутствие каких-либо заметных признаков, предвещающих разрушение конструкции и, как следствие, внезапность разрушения, исключает возможность предпринять в аналогичных случаях профилактические меры предупреждения разрушения конструкций и обеспечения безопасности. Возможна только замена опор с признаками частичного разрушения бетона.

Помимо вышеуказанных случаев коррозионного разрушения конструкций, известно внезапное разрушение железобетонных конструкций в Московском аквапарке в 2004г. Подробности разрушения, излагаемые в средствах массовой информации, в значительной мере сходны с признаками разрушения железобетонных конструкций в результате межкристаллитного растрескивания арматуры.

Имея опыт анализа разрушений конструкций, мы сочли целесообразным предоставить имеющуюся у нас информацию в Комиссию по выявлению причин разрушения конструкций аквапарка. От академии в адрес председателя Комиссии было направлено письмо №01/87 от 18.02.2004г., которое было приобщено к материалам следствия.

РЕКОМЕНДАЦИИ

По предупреждению возникновения межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания стальных элементов конструкций, эксплуатирующихся в электропроводной коррозионной среде, направленные на использование требуемых конструкционных материалов, на необходимость должного контроля за соблюдением технологических

операций при изготовлении элементов конструкций и на использование наиболее эффективных средств электрохимической защиты от указанного разрушительного вида коррозии.

1. В нержавеющих сталях сварных конструкций, контактирующих с жидкой электропроводной средой, во избежание межкристаллитной коррозии должно содержаться хрома более 14%, желательнее до 21%. Вместе с тем, для конструкций не рекомендуется использовать стали марок 08X18HЮ, 12X18H9, 17X18H9.

2. Возможно, сваривать и нагревать конструкции, изготавливаемые из нержавеющих сталей, в которых содержание титана должно превосходить более чем в пять раз содержание углерода. Рекомендуемые стали 008X18H10T, 0X18H10T, 0X18H12T, 12X18H10T, 12X21H5T, 09X15H8Ю.

3. После сварки указанных нержавеющих сталей для их коррозионной стойкости эффективно проводить стабилизирующий отжиг при температуре 1000⁰С, если этому не препятствуют значительные размеры конструкции.

4. Углеродистые и низколегированные стали, в отличие от нержавеющих, в основном подвергаются межкристаллитному растрескиванию. Это происходит именно при сочетании нескольких факторов:

- воздействие влажной электропроводной среды;
- растягивающие напряжения, приближающиеся к пределу текучести;
- малая пластичность стали (относительное удлинение менее 5%);
- уменьшение пластичности стали вследствие пластической деформации при растяжении.

Для предупреждения возникновения коррозионного растрескивания необходимо исключить воздействие на конструкцию первых двух факторов. Третий и четвертый факторы сами по себе не представляют угрозы для возникновения коррозионных трещин, а лишь усиливают воздействие первых двух.

5. Для углеродистых и низколегированных сталей сварка и сопутствующий ей нагрев, не является провоцирующими факторам, вызывающими межкристаллитное растрескивание. Особую опасность при наличии коррозионной среды вызывают именно растягивающие напряжения и, как возможное следствие этого, пластическая деформация, что ещё более увеличивает вероятность образования коррозионных трещин. В связи с этим, необходимо не превышать норму упругих преднапряжений арматуры, чтобы не допустить пластической деформации металла.

6. Сжимающее напряжение не вызывает коррозионного растрескивания металла в агрессивной среде. Для защиты металла от растрескивания, при возможности, рекомендуется создавать сжимающие остаточные поверхностные напряжения.

7. Мелкокристаллические металлы более устойчивы против коррозионного растрескивания, чем крупнокристаллические. Для снижения вероятности растрескивания рекомендуется измельчать структуру стали за счет её химического состава или термообработкой.

8. Эффективна защита металлов от электрохимической межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания применением катодной защиты. Эта защита должна быть использована изначально при эксплуатации конструкции, так как в случае начавшейся коррозии защита уже не окажет требуемого влияния.

ВЫВОДЫ

1. Прочностная надёжность металлических и железобетонных конструкций не во всех случаях может быть гарантирована выполнением расчётов даже по самым надёжным методикам с последующим соблюдением полученных результатов расчёта. В ряде случаев возникают непрогнозируемые внезапные разрушения конструкций, предпосылки которых лежат в сочетании нескольких факторов: влияния электропроводной влажной внешней среды, структуры и состава металлического сплава, технологии обработки и изготовления деталей, нагрева или сварки, а также направления действующих усилий.

2. Сочетанием опасных условий для конструкций из нержавеющей сталей является:

- контакт металла с электропроводной влажной агрессивной средой;
- нагрев сваркой околошовной зоны соединяемых заготовок;
- содержание в сталях повышенного количества углерода и малого количества хрома и титана.

3. Опасные условия для конструкций из углеродистых и легированных сталей состоят в совокупности следующих факторов:

- контакт металла с электропроводной влажной агрессивной средой;
- действие растягивающих напряжений;
- остаточные напряжения, вызванные пластической растягивающей деформацией, малая пластичность металла.

4. Использование приведенных рекомендаций при проектировании, изготовлении и эксплуатации стальных конструкций позволит предупредить в возникновение в электропроводной среде разрушительной межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания металлических элементов конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.П.Григорьев. Электрохимическая коррозия металлов. Ростовский госуниверситет. Образовательный журнал, том 6, №9, 2000г.

2. А.В.Казакевич. Коррозионная стойкость и долговечность металлоконструкций фасадных систем с вентилируемым зазором. «Эксперт-корр-МИСиС», 2002г.

3. В.Г.Корохов и др. Предпосылки непрогнозируемого внезапного разрушения конструкций. Выпуск 19-20. Симферополь, РИО. – НАПКС, 2007г. – 168с.

4. Материаловедение в схемах и конспектах. Учебное пособие. Ч.2./Под ред. И.Ю.Ульяниной; М., МГИУ, 2002г.

5. И.А.Попеско и др. Новый метод расчета несущей способности железобетонных конструкций, работающих в условиях газовой коррозии. 26 ЦНИИ Минобороны России, 2003г.

УДК 621.791.052:006.354; УДК 621.791.052.2

УСИЛЕНИЕ СВАРНЫХ УЗЛОВ АРМАТУРЫ ВЫПОЛНЕННЫХ ВАННО-ШОВНЫМ СПОСОБОМ

Удовиченко Т.М., Симоненко А.В., научные руководители: Ажермачев Г.А. к.т.н., профессор, Меннанов Эльмар Меджидович, ассистент

С введением в действие ДБН В1.1-12:2006 «Строительство в сейсмических районах Украины» [1] сейсмичность повсеместно возросла на 1 балл. Это заслуживает отдельного внимания на территории АР Крым, где сейсмическая активность, особенно на южном берегу Крыма, доходит до десяти. Для восприятия зданием сейсмической нагрузки применяют систему пространственных железобетонных каркасов. Которые в свою очередь армируются стержневой арматурой периодического профиля, выпускаемой согласно ДСТУ 3760-2006 ««Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Общие технические условия.» (ISO 6935-2:1991,NEQ) [5].

Согласно отдельных проектных решений высотных зданий, в уровнях нижних этажей, стержни достигают максимальных диаметров. Соединение этих стержней должно выполняться с использованием ванно-шовного способа на стальной скобе-накладке [1].

С появлением ДСТУ 3760-98 и ДСТУ 3760-2006 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Общие технические условия», созданным в соответствии с европейскими нормами EN 10080 в ISO/DIS 6935-2, появилась возможность экономить металл за счет улучшения физико-механических показателей.

Все европейские страны уже полностью перешли на применение в обычном железобетоне свариваемой арматуры класса B500 (A500C) с пределом текучести $\sigma_T > 500$