

Методические аспекты оценки степени деградации материалов при определении остаточного ресурса арматуры АЭС

Ю.Н. Рыкунич, генеральный директор, **Л.В. Ананьевская**, нач. центральной контрольной лаборатории, к.т.н., ст.н.с., ЗАО «Киевское Центральное конструкторское бюро арматуростроения»

Сложности экономического, научного и производственного характера, связанные с необходимостью продления ресурса безопасной эксплуатации большого числа действующих объектов высокого риска (атомная и тепловая энергетика, транспортный комплекс, авиация, нефтегазохимия, ракетно-космический комплекс и т. п.), а также вновь проектируемых с ресурсами 60-100 лет, поставили на повестку дня комплексные исследования состояния материалов и конструкций.

При обсуждении вопросов, связанных с ухудшением некоторых важных свойств материалов и изделий по мере увеличения срока их эксплуатации, употребляется термин «деградация свойств», который определяется как постепенное понижение какого-либо качества, процесс изменения чего-либо в сторону ухудшения, утрата ранее накопленных свойств.

Исследования состояния материалов и конструкций затрагивают концептуальную деградацию (без нарушения сплошности) и деструктивную деградацию (с образованием микро и макродефектов). В деградационных процессах имеют место изменения структурных состояний, старение (естественное, искусственное, деформационное, динамическое), образование и развитие механических повреждений в поверхностных слоях и в объеме, физико-химические повреждения (радиационные, коррозионные, эрозионные).

Широкий спектр используемых материалов, конструктивных элементов, режимов их эксплуатации, водно-химических режимов, рабочих сред и прочих параметров является



Фото с сайта: www.paxcam.com

причиной того, что механизмы старения элементов и их отдельных узлов могут отличаться, так же как и скорости протекания этих процессов. А, следовательно, и деградация физико-химических характеристик материалов будет протекать по-разному. При этом, несмотря на всю разнородность деградационных процессов, методологический подход к решению задачи оценки состояния материалов и изделий и определению их ресурсоспособности должен быть единым. Такой подход предусматривает:

- сбор и анализ данных по истории эксплуатации (эксплуатационные режимы нагружений, водно-химический режим, дефектность, физико-механические свойства, эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ);
- проведение расчетов с целью определения зон с максимальной эксплуатационной повреждаемостью;
- проведение комплексных научных исследований характера деградационных процессов в материалах и установление их основных механизмов;
- выбор методов и средств контроля для расчетных зон с учетом доминирующих механизмов эксплуатационного повреждения.

В связи с этим проводится анализ механизмов развития структурных изменений в металлах и кинетики изменения

The article deals with the research performed by the Kiev CKBA specialists in order to develop the methods of NPP valve operating conditions assessment. Degradation processes of materials used for valves manufacture were studied. Estimating of the reasons of material degradation and its rate makes possible to estimate with high accuracy the residual resource of the equipment. All this will reasonably assist to prolong service life of valves for NPP.

For our foreign readers

механических свойств, которые обусловлены исходными структурами, химическим составом, технологическими процессами создания материалов и изделий (термообработкой, пластическим формобразованием, сваркой, поверхностным и объемным упрочнением), а также режимами эксплуатации (временем, циклами напряжений, деформациями, коррозионными, эрозийными и радиационными воздействиями, диффузионными процессами, температурой, давлением и др. факторами). Прикладное значение указанных выше комплексных научных исследований состоит в обосновании методов расчетно-экспериментального определения степени истощения прочности и долговечности за предшествующий срок эксплуатации с учетом деградации материалов и конструкций.

К настоящему времени выполнены обширные экспериментальные исследования изменений механического поведения как основного металла, так и металла сварных соединений, установлены некоторые закономерности структурно-фазовых превращений и механизмы их влияния на физико-механические характеристики металлов.

Трансформация полученных результатов научных исследований в параметры ресурсоспособности материалов и изделий невозможна без новых методических разработок приборов и оборудования, которые являются одним из основных условий обеспечения прочности, надежности и высокого ресурса конструкции новой техники.



Помимо традиционных методов разрушающего и неразрушающего контроля, применяемых в соответствии с требованиями нормативно-технической документации (визуальный, ультразвуковой, радиографический, магнитопорошковый, капиллярный и др.), в настоящее время разработана целая серия диагностических приборов, с помощью которых можно установить корреляцию между структурно-фазовым состоянием материалов и их физико-механическими свойствами с последующим определением ресурсоспособности как материала, так и изделия в целом. Одним из таких методов является магнитный метод неразрушающего контроля. В основу подхода поло-

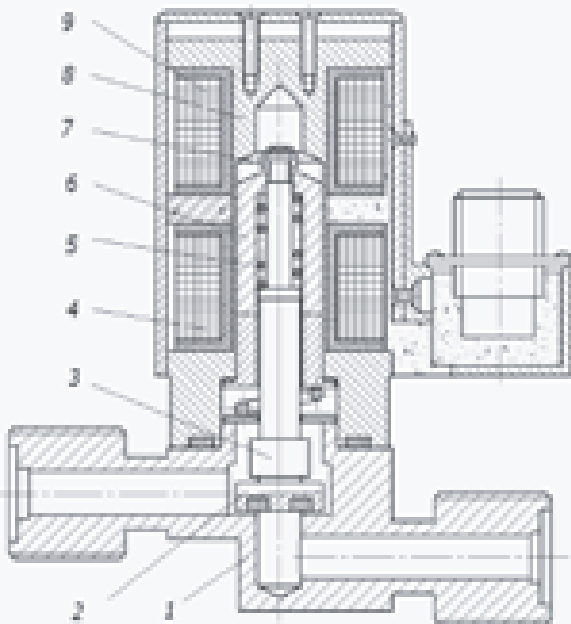
жен метод неразрушающего текущего контроля напряженно-деформированного состояния материала в целом и, особенно, состояния его рабочего слоя по измерениям такой магнитной характеристики металла, как коэрцитивная сила *H_c*. Подобный подход давно признан в металлургии и машиностроении, но лишь при сдаточном контроле готовой металлопродукции по механическим свойствам.

В СНГ с этой целью принят стандарт ГОСТ 30415-96 «Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом». Из-за отсутствия общей теории магнитной структуроскопии приходится устанавливать корреляционные зависимости между значениями коэрцитивной силы *H_c* и напряженно-деформированным состоянием для каждого типа стали индивидуально. В практике неразрушающего контроля такие зависимости в виде номограмм легко построить с помощью нового магнитного структуроскопа КРМ-ЦК-2М. По результатам механических испытаний при статическом и циклическом нагружении листов и изделий из традиционных низколегированных и малоуглеродистых сталей построены корреляционные зависимости, установлены критерии для магнитной диагностики перехода металла в пластическое состояние и достижения стадии разрушения. Доказана эффективность применения метода и прибора КРМ-ЦК-2М при проведении экспертизы промышленной безопасности объектов Госгортехнадзора России.

Примером нового подхода к неразрушающим методам контроля является такая разработка, как портативный рентгеновский дифрактометр ДРП-3.

Прогнозирование безаварийной службы изделий и конструкций при помощи рентгеновских дифрактометров основано на определении их преддефектного состояния по изменению уровня действующих или остаточных напряжений. Отношение полученных в результате измерений напряжений к предельному для известного материала напряжению дает возможность судить о запасе прочности изделия. Портативный малогабаритный рентгеновский дифрактометр обеспечивает оценку напряжений в материале деталей или объектов без их разрушения. Высокая радиационная безопасность ДРП-3 обеспечивается использованием миниатюрных рентгеновских трубок мощностью 5 Вт. На расстоянии 25 см от точки измерения уровень радиации не превышает природного фона. Контроль соответствия угловых положений пиков по истинному положению проводится по Государственному стандартному образцу, не имеющему остаточных напряжений. Юстировка гониометра производится с помощью лазерного юстировочного устройства. Точность определения значений остаточных напряжений составляет 5-10% в зависимости от материала изделия. Обслуживание и эксплуатация прибора осуществляется одним оператором. Зарубежный аналог – портативный рентгеновский дифрактометр XS3000 фирмы AST (США). Сравнение проводили с использованием программы «ПРИНН».

Рис. 1. Пневмоклапан с электромагнитным приводом



1 – корпус клапана; 2 – золотник; 3 – шток;
4, 9 – обмотки закрытия и открытия; 5 – пружина;
6 – ползун; 7 – шайба стопорная; 8 – верхний стоп

ДРП-3 рекомендуется использовать для реализации неразрушающего метода рентгеновского контроля остаточных и действующих напряжений в деталях и конструкциях взамен всех разрушающих методов.

Среди методов, позволяющих получать наиболее эффективную информацию о напряженно-деформированном состоянии материалов, следует отметить тензометрию, фотоупругость, методы сеток и муаровых полос, хрупких и фотоупругих покрытий и др., на основе которых созданы новые типы измерительной аппаратуры.

Одним из примеров методического подхода к изучению деградационных процессов в материалах является исследование характера структурно-напряженного состояния деталей электромагнитного клапана УФ 96239-006 (рис. 1), подвергавшихся воздействию импульсных динамических (ударных) нагрузок, проведенное специалистами Киевского ЦКБА. Исследованию подвергали следующие детали: шайба контровочная $\varnothing 4$ мм после 180000 циклов срабатывания; шайба контровочная $\varnothing 6$ мм после 320000 циклов срабатывания; шток после 200000 циклов и ползун после 300000 циклов срабатывания. Все детали были изготовлены из стали 16Х-ВИ после термической обработки в соответствии с ГОСТ 10160-75.

Для оценки структурно-напряженного состояния материала были использованы следующие исследования:

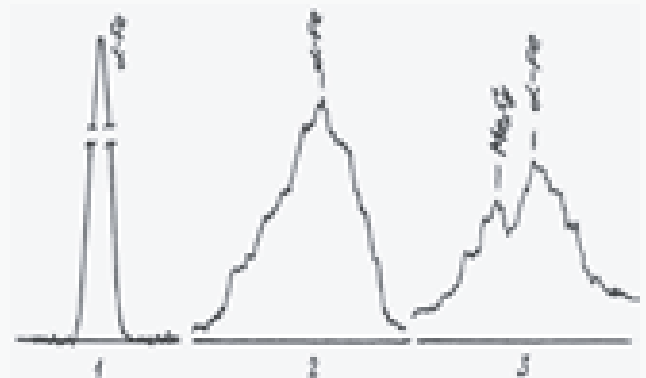
- рентгеноструктурный дифрактометрический анализ на установке ДРОН-3,0М;
- фрактографический электронномикроскопический анализ на растровом сканирующем микроскопе JSM-840 фирмы «Jeol»;

- металлографический анализ на микроскопе МИМ-8М и измерение микротвердости на приборе ПМТ-3.

Образцы для анализа были вырезаны из участков поверхности деталей, подвергавшихся контактному ударному нагружению. Измерение микротвердости проводили на поперечных шлифах в направлении, перпендикулярном поверхности контакта вглубь образцов. В качестве эталонного использовали исходный образец стали 16Х-ВИ в отожженном состоянии, не подвергавшийся контактному нагружению.

Результаты рентгеноспектрального анализа свидетельствуют о значительных пластических деформациях в зоне разрушения и остаточных напряжениях кристаллической решетки α -Fe, на что указывает размытие спектров линий [110] и [220] на рентгенограммах деформированных поверхностей по сравнению с таковыми для исходного образца (рис. 2).

Рис. 2. Рентгенограммы образцов после испытаний: линии α -Fe [110]



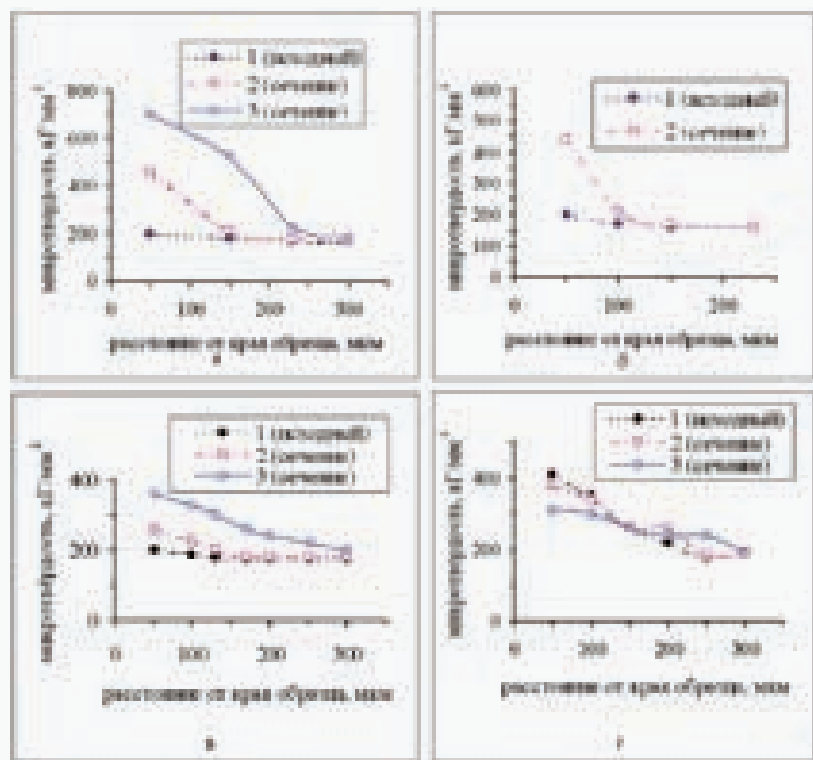
1 – исходный образец;
2 – шток после 200000 циклов испытаний;
3 – ползун после 300000 циклов испытаний

Кроме того, размытие рентгеновских спектров свидетельствует о заметных диффузионных процессах, происходящих в материале, формировании и последующем выделении новых фазовых составляющих в структуре (образец 3 на спектрограмме).

Результаты рентгеноспектрального анализа коррелируют с данными измерения микротвердости (рис. 3а-г). Упрочнение образцов ползуна и штока в результате наклепа распространяется на глубину 150÷300 мкм от поверхности вглубь шлифов. В образце «шайба контровочная» после 320000 циклов испытаний произошло разупрочнение подповерхностной зоны, о чем свидетельствует снижение значений микротвердости (рис. 3г).

Разупрочнение подповерхности контакта может свидетельствовать о процессе релаксации напряжений вследствие образования микротрещин, что подтверждается результатами электронно-микроскопического анализа. Изучение микрорельефа поверхности изломов свидетельствует об усталостном характере разрушения (рис. 4). В результате ударных нагрузок происходит образование и накопление дефектов с последующей сдвиговой деформацией (двухуровневый сдвиг), образованием экструзий

Рис. 3. Микротвёрдость поперечных образцов после циклических испытаний



а – ползун, $n = 300000$ ц.;
в – шток, $n = 200000$ ц.;

б – ползун, $n = 200000$ ц.;
г – шайба контрольная,
 $\varnothing = 6$ мм, $n = 320000$ ц.

(выступов) и интрузий (впадин), микропор, их слияние и образование микротрещин (рис. 4а,з), а затем и трещин. С каждым новым циклом нагружения трещина продвигается вперед на определенное расстояние (рис. 4б,в). При этом на поверхности излома остается последовательный ряд полосок – усталостных бороздок, которые

переходят в участок вязкого ямочного разрушения (рис. 4д).

На общем виде поверхности излома (рис. 4е) отчетливо прослеживаются участки сдвиговой деформации, усталостные бороздки, макротрещины, источник разрушения и зона долома.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие заключения.

1. Усталостному разрушению предшествует комплекс деградационных процессов, происходящих в материале в течение периода его эксплуатации и представляющих собой цепочку последовательных структурно-фазовых превращений: диффузионное перемещение атомов в кристаллической решетке материала, образование и накопление микродефектов, слияние микропор в микротрещины, сдвиговая деформация, образование магистральных трещин.

2. Применение тонких металлографических, электронномикроскопических и рентгеноструктурных методов исследования позволяет выявить кинетику и механизм деградационных изменений в структуре материала и установить причину его разрушения.

3. Расширение спектра исследуемых материалов, применяемых для изготовления деталей арматуры, на этапе проектирования, а также в процессе испытаний, моделирующих условия эксплуатации, систематизация и статистический анализ полученных экспериментальных данных позволяет прогнозировать поведение материала и его долговечность как для вновь разрабатываемых изделий, так и продлить срок службы уже эксплуатируемой арматуры.

переходят в участок вязкого ямочного разрушения (рис. 4д). На общем виде поверхности излома (рис. 4е) отчетливо прослеживаются участки сдвиговой деформации, усталостные бороздки, макротрещины, источник разрушения и зона долома. Проведенные исследования позволяют сделать следующие заключения. 1. Усталостному разрушению предшествует комплекс деградационных процессов, происходящих в материале в течение периода его эксплуатации и представляющих собой цепочку последовательных структурно-фазовых превращений: диффузионное перемещение атомов в кристаллической решетке материала, образование и накопление микродефектов, слияние микропор в микротрещины, сдвиговая деформация, образование магистральных трещин. 2. Применение тонких металлографических, электронномикроскопических и рентгеноструктурных методов исследования позволяет выявить кинетику и механизм деградационных изменений в структуре материала и установить причину его разрушения. 3. Расширение спектра исследуемых материалов, применяемых для изготовления деталей арматуры, на этапе проектирования, а также в процессе испытаний, моделирующих условия эксплуатации, систематизация и статистический анализ полученных экспериментальных данных позволяет прогнозировать поведение материала и его долговечность как для вновь разрабатываемых изделий, так и продлить срок службы уже эксплуатируемой арматуры.

Рис. 4. Микрорельеф поверхности излома ползуна после 300000 циклов испытаний

