

ОБ ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ

А. Ю. БОНДАРЕНКО

Рассмотрены проблемы прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений особо ответственных конструкций. Показана на основе проведенных статических и усталостных испытаний, а также разработанной методики принципиальная возможность прогнозирования остаточного ресурса сварных конструкций магнитным методом по значению коэрцитивной силы.

The paper deals with the problems of forecasting the residual life of welded joints of super critical structures. The basic capability of forecasting the residual life of welded structures by the magnetic method by assigning a coercive force is shown on the basis of the conducted static and fatigue tests, as well as the developed procedure.

Прогнозирование индивидуального остаточного ресурса относится к конкретному, находящемуся в эксплуатации техническому объекту. Оно основывается на информации, которую условно можно разделить на три части [1].

1. Данные текущего (оперативного) контроля в процессе эксплуатации. Контроль может быть непрерывным или дискретным (например, приуроченным к плановым профилактическим мероприятиям). Для поиска дефектов используют встроенные и внешние приборы, системы для хранения и переработки диагностической информации, алгоритмы и программы для принятия решений [2].

2. Данные о нагрузках и других условиях взаимодействия объекта с окружающей средой [3] (рис. 1).

Диагностическая информация ограничена по объему и носит лишь косвенный характер. Применение средства контроля не позволяет в полной мере обнаружить структурные изменения, а также повреждения и трещины, которые в дальнейшем могут стать причиной предельных состояний. Вероятность такого пропуска вследствие несовершенства аппаратуры, небрежности оператора или недоступного расположения дефектов довольно велика.

Ценным дополнительным источником информации служат данные о режимах нагружения. По известной истории нагружения с использованием расчетных схем можно оценить степень накопления повреждений в конструкции, а сопоставляя резуль-

таты расчета с диагностическими данными, — параметры объекта, которые на предыдущих стадиях еще не были идентифицированы с достаточной точностью.

Таким образом, все источники информации — диагностические данные о состоянии объекта, данные о старении материала и истории нагружения объекта — оказываются тесно связанными и взаимозависимыми.

3. Третьим видом информации для прогнозирования ресурса на стадии эксплуатации является весь объем априорных данных о материалах, элементах, узлах, нагрузках и пр., т. е. информация, которая лежит в основе прогнозирования ресурса и оценки показателей надежности на стадии проектирования.

Эта информация относится к генеральной совокупности объектов, в то время как предметом индивидуального прогнозирования служит вполне определенный представитель из этой совокупности. Однако информация об этом представителе остается неполной и неточной, а значительная ее часть имеет вероятностный характер. Например, если внешние воздействия имеют случайный характер, то их изменение на отрезке прогнозирования следует трактовать как случайный процесс. Применительно к металлу, применяемому в трубопроводах, впрочем, как и к материалу других конструкций, можно предложить классификацию, предусматривающую, как минимум, три группы состояния материала (рис. 2).

Следующая задача индивидуального прогнозирования — оценка риска по отношению к опасным аварийным ситуациям, установление предельно допустимых остаточных сроков эксплуатации при наличии возрастающего риска и выдача рекомендации о мерах по повышению безопасности. Например, для находящихся в эксплуатации трубо-



Рис. 1. Факторы, вызывающие старение сварных конструкций

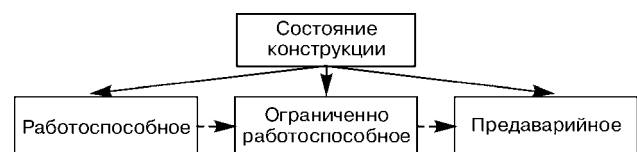


Рис. 2. Классификация состояний материала сварной конструкции



Рис. 3. Критерии, определяющие состояние металла сварной конструкции

роводов первостепенное значение приобретают параметры, которые могут изменяться под влиянием эксплуатационных воздействий и, следовательно, выступать в качестве критериев при определении того или иного состояния материала согласно классификации на рис. 3. Анализируемые параметры должны непосредственно либо косвенно характеризовать способность материалов выдерживать заданные нагрузки.

В реальной широкой практике оценка состояния строится преимущественно на информации о дефектности металла. При этом данные о его структурном состоянии по ряду причин не учитываются, хотя вполне очевиден целый класс объектов, где материаловедческие аспекты состояния металла являются преобладающими, так как дефекты, возникающие на почве структурной деградации, не успевают выявляться из-за их лавинообразного роста и практически мгновенного разрушения изделия.

Изменения свойств в процессе деформационного старения после длительной эксплуатации определяются не столько временем, сколько предварительной пластической деформацией [14]. При этом наибольшие деформации носят локальный характер, что дополнительно осложняет непосредственную оценку. Исключая из рассмотрения экстремальные случаи, связанные с грубыми нарушениями условий монтажа трубопроводов, подвижками грунта и т. п., целесообразно отметить следующее.

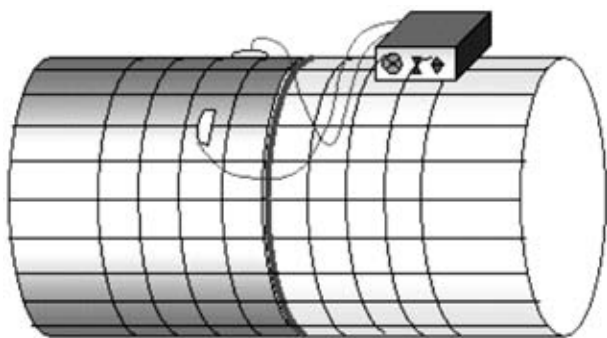


Рис. 4. Расположение датчика коэрцитиметра на образце сварной трубы магистрального трубопровода при исследовании параметров методики проведения мониторинга остаточного ресурса особо ответственных сварных конструкций

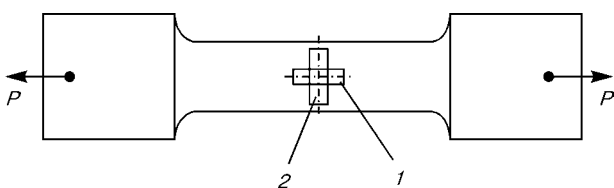


Рис. 5. Позиционирование (1 – продольное; 2 – поперечное) датчика коэрцитиметра при испытании образцов из трубной стали 09Г2С

1). В процессе производства трубный передел сопровождается холодным деформированием металла, что особенно характерно для сварных труб. Иными словами, нельзя полностью исключить возможность возникновения повышенных местных пластических деформаций, которые могут повлиять на дальнейшую эксплуатацию трубопроводов в полевых условиях.

2). Максимальные искажения формы поперечного сечения трубной заготовки наблюдаются на концевых участках (так называемый концевой эффект). Характерно, что значительное количество разрушений при испытаниях и эксплуатации трубопроводов зарождается именно в этих местах. Наименее контролируемы значения возможных пластических деформаций в монтажных условиях. Их допустимый уровень ограничивается правилами выполнения работ, таких, как холодное гнутье труб или выправление местных искажений формы.

3). В процессе эксплуатации пластические деформации, значения которых зависят от ряда факторов, могут возникать в зоне механических повреждений и коррозионных дефектов, в местах образования гофров и на других участках деформирования металла трубопровода [6].

С учетом сказанного выше были проведены исследования с целью разработки методики оценки изменений служебных характеристик трубных сталей в процессе эксплуатации для прогнозирования остаточного ресурса. Для контроля напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса материала данных сварных металлоконструкций использован магнитный метод [7–9]. Исследования проведены на образцах из трубной стали 09Г2С с использованием коэрцитиметра с приставным магнитным устройством (ПМУ).

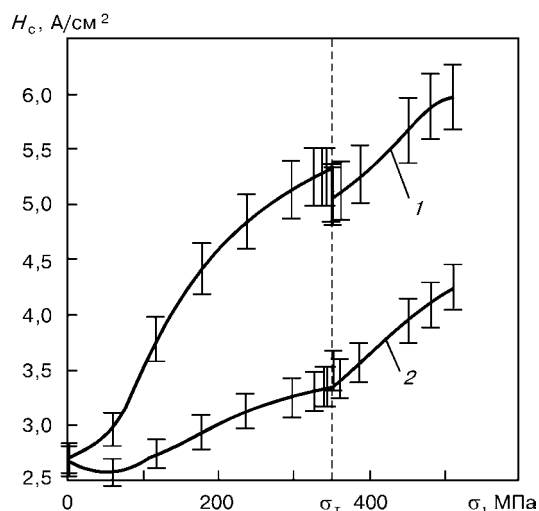


Рис. 6. Зависимость коэрцитивной силы H_c от напряжения σ при растяжении образцов из основного металла (стали 09Г2С): 1 – в направлении 90°; 2 – 0°

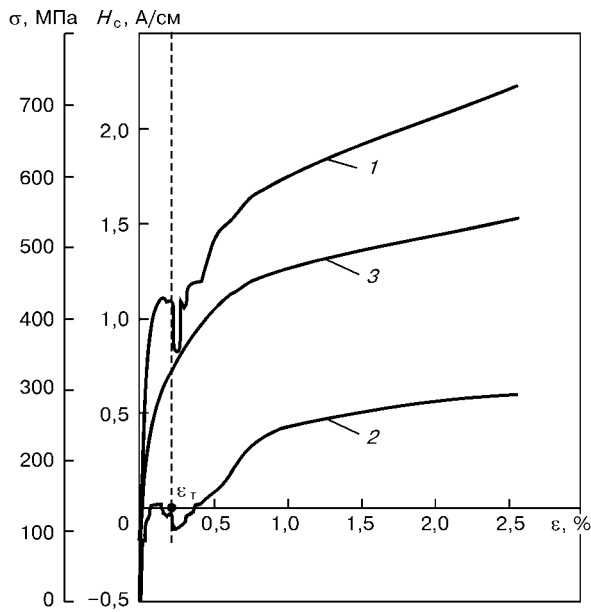


Рис. 7. Зависимость величины H_c (1, 2 — в направлении 90 и 0°) и прикладываемого напряжения σ (3) от поперечной деформации ϵ при растяжении сварных образцов из стали 09Г2С

Принцип выполнения исследования состоял в следующем: локальный участок контролируемого образца изделия (рис. 4) предварительно намагничивался с помощью ПМУ однополярными импульсами тока. Далее в катушку ПМУ подается размагничивающий ток (обратной полярности) и измеряется его значение I_0 в момент, когда индукция в магнитной цепи ПМУ — изделие, измеряемая преобразователем Холла (ПХ), равна нулю. Показания на измерительном устройстве прибора не зависят от изменения зазора между изделием и ПМУ в пределах от 0 до 0,7 мм. При этом погрешность измерения величины H_c в диапазоне 1...20 А/см составляет 5%. Предварительно для получения значения величины H_c в абсолютных единицах проводили градуировку прибора на эталонных образцах с известными значениями этой величины с целью повышения достоверности измерений. Результаты измерений регистрировались и заносились в банк данных (блок памяти) прибора.

Одноосное статическое нагружение образцов стандартных размеров (700×60×28 мм) из трубной стали осуществляли на разрывной машине в соответствии с требованиями НД. Применение накладного датчика (ПМУ) позволило оперативно измерять значения H_c в различных направлениях по отношению к сварному соединению и направлению приложения нагрузки. При этом измерение коэрцитивной силы H_c образцов было проведено в процессе их поэтапного нагружения (рис. 5) в направлениях 0 (1) и 90° (2) по отношению к прикладываемой нагрузке P . Одновременно записывали диаграмму нагружения и фиксировали начало пластического течения материала. Результаты исследований при одноосном растяжении образцов представлены на рис. 6. Кривые зависимости $H_c = f(\sigma)$ построены по средним из нескольких измерений значений коэрцитивной силы. Результаты исследова-

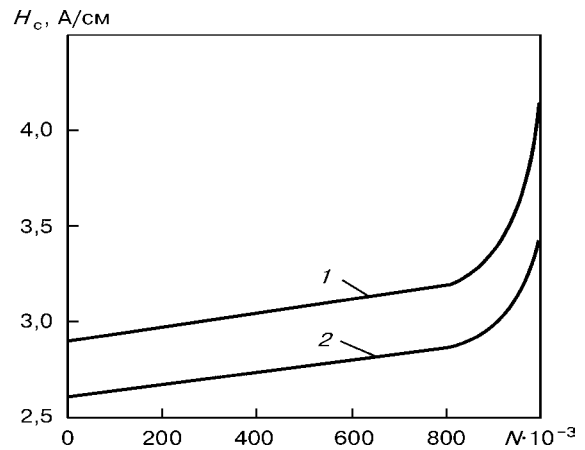


Рис. 8. Зависимость коэрцитивной силы H_c от количества циклов N для образцов из стали 09Г2С при многоциклового усталости: 1 — в направлении 90°; 2 — 0°

ования при одноосном растяжении сварных образцов в соответствии с выбранной методикой представлены на рис. 7.

Анализ полученных результатов исследований показал, что в области упругих деформаций наибольшей чувствительностью к растягивающим напряжениям обладает способ, при котором коэрцитивная сила измеряется в направлении 90° (рис. 7, кривая 1). В направлении приложения нагрузки 0° для всех образцов наблюдается минимум функции $H_c(\sigma)$ (рис. 7, кривая 2). При этом было отмечено, что увеличение напряжения σ в зоне временного упрочнения металла приводит к росту H_c по обоим направлениям. Скачок значений величины H_c , наблюдаемый на кривых рис. 6, 7, соответствует состоянию текучести металла образца, представленной на диаграмме растяжения, т. е. достижению предела текучести σ_T в стали конструкции.

Моделирование процесса накопления повреждений и пластической деформации материала изделия при циклическом нагружении проводили на аналогичных образцах из стали 09Г2С. Испытания проводили в режиме многоциклового усталости при отнулевом цикле нагружения с частотой 5 Гц и амплитудой нагружения 280 МПа. Характерная зависимость коэрцитивной силы H_c от количества циклов N при усталостном нагружении представлена на рис. 8.

Таким образом, была выявлена зависимость значений коэрцитивной силы при статическом и циклическом нагружении от параметров нагружения образцов сварных соединений из стали, применяемых для производства труб магистральных нефте-, газопроводов [10]. При этом были определены пороговые значения H_c для зоны сварного шва (рис. 7), а также области основного металла, по достижении которых в металле начинают накапливаться необратимые изменения (рис. 6). Это дает основания, необходимые для прогнозирования эксплуатационного ресурса сварных конструкций с позиций анализа структурного состояния, а в комплексе с данными диагностики неразрушающего контроля существенно улучшает качество и досто-

верность оценки состояния и остаточного ресурса трубопроводов.

ВЫВОДЫ

1. Стендовые разрушающие статические и циклические исследования образцов сталей, проведенные в сочетании с параллельным коэрцитиметрическим контролем, подтвердили эффективность разработанной методики. Информационный параметр — коэрцитивная сила — в процессе «продвижения» металла от исходного состояния поставки до момента разрушения изменяется на 100...200 % в зависимости от особенностей ее состояния. Были установлены характерные значения величины H_c при нагрузках, соответствующих пределам текучести и прочности.

2. Для достоверного определения остаточного ресурса конструкции необходимы три источника информации: диагностические данные о состоянии объекта; данные о старении материала, полученные магнитным методом, а также истории нагружения объекта. При этом базовой основой для прогнозирования должна являться информация по каждому конкретному техническому объекту, полученная магнитным методом.

3. Используя рассмотренный подход и построив предварительно аналогичные зависимости для других марок сталей, использующихся при изготовлении несущих металлоконструкций, можно прогнозировать их остаточный ресурс непосредственно по результатам контроля магнитным методом значений коэрцитивной силы. Это позволяет рекомендовать данный метод как дополнительный к применяемым по обнаружению макродефектов для принятия решения об остаточном ресурсе и обеспечения качества эксплуатации ответственных сварных конструкций.

1. *Болотин В. В.* Ресурс машин и конструкций. — М.: Машиностроение, 1990. — 448 с.
2. *Бондаренко А. Ю.* Прогнозирование ресурса ответственных сварных конструкций на стадии эксплуатации // Тез. Междунар. конф. «Сварные конструкции» (Киев, окт. 2000 г.). — Киев, 2000. — С. 71.
3. *О старении* и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов / Б. Е. Патон, С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 7. — С. 3–12.
4. *Стеклов О. И.* Мониторинг и прогноз ресурса сварных конструкций с учетом их старения и коррозии // Сварка и родственные технологии — в XXI век: Сб. тр. междунар. конф. (ноябрь, 1998 г., Киев). — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1998. — С. 257–261.
5. *В. С. Гиренко, С. Е. Семенов, Л. В. Гончаренко.* Деформационное старение трубных сталей // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 3. — С. 32–35.
6. *Иванцов О. М.* Надежность и экологическая безопасность магистральных трубопроводов России // Сб. тр. Междунар. конф. (Киев, нояб. 1998 г.). — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1998. — С. 99–109.
7. *Клюев В. В.* Неразрушающий контроль и диагностика безопасности // Зав. лаборатория. Диагностика материалов. — 1996. — № 1. — С. 16.
8. *Boving, Knud G.* NDE handbook. NDT examination methods for condition monitoring. Teknisk Forland A/S. — Danish Technical Press, 1989. — 418 p.
9. *Об оценке* усталостного состояния и остаточного ресурса сварных соединений неразрушающим магнитным методом для обеспечения качества сварных конструкций и изделий / Л. М. Лобанов, Ю. К. Бондаренко, Г. Я. Безлюдько, А. Ю. Бондаренко // МИС. Док. V-2002–2001.
10. *Об оценке* усталостного состояния и остаточного ресурса сварных соединений неразрушающим магнитным методом. Материаловедческие аспекты / В. Ф. Мужичкий, Ю. К. Бондаренко, А. Ю. Бондаренко, Г. Я. Безлюдько // Матер. 3-й Междунар. конф. «Диагностика трубопроводов» (Москва, 21–26 мая 2001 г.). — С. 11.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев

Поступила в редакцию
22.01.2002

Научно-производственная фирма Специальные Научные Разработки

СНР

Направления деятельности — разработка, изготовление приборов и установок НК механических свойств, структуры, напряженно-деформированного (усталостного) состояния, ресурса металлопродукции и оборудования по магнитным характеристикам металла: коэрцитиметры, аустенометры, многопараметрические анализаторы петли магнитного гистерезиса. Магнитометры универсальные и специализированные (для МПД), включая дефектоскопические. Приборы и установки УЗ-толщинометрии и дефектоскопии, работающие ЭМА-методом бесконтактно, по горячему металлу, без зачистки и без контактной жидкости (через слой защитного покрытия или воздушный зазор).

Методики применения всех этих средств НК.

Область применения — производство прокатной металлопродукции и оборудования машиностроения, текущее состояние оборудования, сосудов давления и др. металлоконструкций в эксплуатации, их диагностика, включая экспертизу надзора.

Многоканальные системы технологической сигнализации, сбора, обработки и хранения информации для таких объектов, как энергетические котлы, турбины, генераторы, грузоподъемные машины общего и специального назначения.

г. Харьков, тел./факс (0572) 64-36-13, тел. 64-99-85, 26-32-06
E-mail: bezlyudko@yahoo.com