

# МЕТОД РЕПЛИКАЦИОННОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ

С.М. Красневский, М.К. Степанкова, М.В. Слободчиков  
Физико-технический институт НАН Б, Проматомнадзор РБ

Техническая диагностика деталей сосудов и трубопроводов после их длительной эксплуатации и последующие прочностные расчеты, проводимые с целью определения остаточного ресурса промышленного оборудования, могут считаться с достаточной степенью надежными лишь при условии достоверного знания всего комплекса характеристик металла, среди которых немаловажное место отводится его макро- и микроструктуре. В процессе эксплуатации объекта в металле происходят изменения, связанные с обезуглероживанием, цементацией, азотированием, сфероидизацией, межкристаллитной коррозией, коррозионным растрескиванием и водородным охрупчиванием, различными фазовыми превращениями и т.д. Все эти изменения сказываются на эксплуатационной надежности оборудования и могут быть учтены лишь после проведения металлографического анализа. Кроме того, существует ряд дефектов металлургического и технологического плана, которые могут быть выявлены также только с помощью металлографических исследований и которые необходимо учитывать при определении остаточного ресурса оборудования. Это такие дефекты, как неравномерное распределение в металле серы и фосфора, загрязненность металла неметаллическими включениями, видманштеттова структура, перегрев, перегрев, микротрещины, образованные у линии сплавления в зоне термического влияния сварки.

Металлографический анализ металла сосудов и трубопроводов базируется на данных, которые определяются параметрами эксплуатации (состав среды, температура, давление), а также технологией изготовления сосуда (марка стали, термообработка, режим сварки). Металлографический анализ позволяет установить тип структуры, величину зерна, распределение в металле серы и фосфора, наличие структурных составляющих, могущих резко снизить пластичность металла, ширину зоны термического влияния в сварных соединениях, наличие повреждений типа водородной, межкристаллитной коррозии, коррозионного растрескивания, определить зону зарождения трещины и ее характер.

Наибольшую информацию металлографические исследования дают в том случае, когда они проводятся в местах, где формируются предпосылки к разрушению материала конструкций. Это места пересечения кольцевых и продольных сварных швов, коррозионных повреждений, обнаруженных при визуальном контроле, места обнаружения дефектов, выявленных магни-

топорошковым, капиллярным или ультразвуковым методами.

На практике чаще всего возникает необходимость в проведении металлографического анализа различного оборудования, находящегося в эксплуатации. В таких случаях вырезка образцов для лабораторных исследований либо крайне нежелательна, либо вообще невозможна. Тогда металлографический контроль проводится непосредственно на объекте. При этом используются или переносной металлографический микроскоп, или применяется методика снятия отпечатков-реплик, которые затем исследуются в лабораторных условиях.

В обоих случаях на поверхности исследуемого объекта изготавливается микрошлиф путем шлифования, полирования и травления, который затем рассматривается в микроскоп и, при необходимости, фотографируется. Выездной металлографический контроль незаменим при аварийных и внештатных ситуациях, когда необходимо принять экстренное решение о дальнейшей эксплуатации оборудования, и требует участия квалифицированного специалиста – металловеда.

Поскольку отечественная промышленность, к сожалению, не выпускает металлографическое оборудование, которое могло бы работать в полевых и зачастую неблагоприятных условиях, то в ФТИ НАН Б в лаборатории прикладной механики был сконструирован и изготовлен для указанных целей портативный металлографический микроскоп (рис. 1).

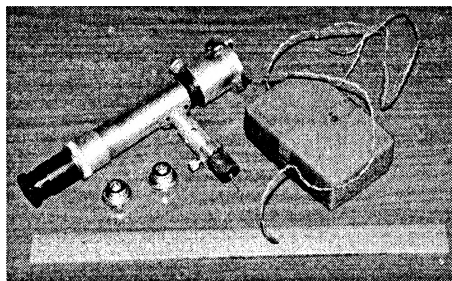


Рис. 1. Микроскоп металлографический портативный ММП-1.

Вес прибора составляет не более 0,5 кг, питание происходит от элемента постоянного тока с напряжением 4,5 В. Микроскоп обеспечивает увеличения: 135, 315 и 600 крат. Эти три увеличения необходимы и достаточны для того, чтобы оценить качество приготовления микрошлифа, тип структуры, морфологические особенности фазовых составляющих и места их распо-

ложения, получить информацию о деталях структуры и строении границ зерен.

В дополнение к проведению металлографического контроля непосредственно на объекте в той же лаборатории была разработана методика репликационной металлографии [1]. Отпечаток-реплика изготавливается на пластине полистирола, одна сторона которой размягчается с помощью растворителя и затем прижимается к травленному микрошлифу. После затвердевания готовый оттиск с микрорельефом шлифа отделяют от последнего и исследуют и фотографируют в лабораторных условиях. При этом качество приготовленной реплики ничем практически не уступает качеству микрошлифа и несет в себе ту же информацию, что и исходный микрошлиф с выявленной на нем микроструктурой исследуемого металла. Метод репликационной металлографии не требует присутствия на объекте опытного специалиста, быстр, надежен и удобен особенно в тех случаях, когда контроль проводится в труднодоступных местах в условиях ограниченного времени пребывания или в случае необходимости проведения трудоемких количественных и качественных исследований при больших увеличениях, не обеспечиваемых портативным микроскопом; таких как определение количественного соотношения фаз и размеров фазовых составляющих, изучение строения границ зерен, определение вида разрушения и многое другое.

Описанные выше методики экспресс-анализа и репликационной металлографии с успехом применялись при технической диагностике нефте-химического оборудования на предприятиях ПО «Нафтан» (г. Новополоцк) и ПО «Азот» (г. Гродно) с целью определения состояния основного металла элементов рабочих сосудов после длительной до 40 лет эксплуатации и возможности дальнейшего использования после реконструкции или без нее.

Диапазон марок материалов, из которых были изготовлены элементы обследованных объектов (корпуса, днища, штуцеры, крышки и др.) охватывал основные стали, используемые для изготовления сосудов, работающих под давлением в температурном интервале от -70 до 475°C, при наличии агрессивных и водородсодержащих сред. Это отечественные и зарубежные углеродистые стали марок Ст 3, сталь 10, сталь 20К; малоуглеродистые низколегированные стали марок 16ГС, сталь WstE 36 (аналог – сталь 17ГС), 09Г2С, SA 302-B (никель-молибден-марганцовистая сталь); теплоустойчивые стали 12МХ и 13CrMo44 (аналог – сталь 15ХМ); коррозионно-стойкие стали аустенитного – 03X17H14M3 и аустенитно-ферритного 08X22H6T и 40X24H12СЛ классов.

В углеродистых и низколегированных сталях перлитного класса в процессе длительной эксплуатации при повышенной температуре ( $\geq 400^\circ\text{C}$ ) или кратковременном перегреве до температур 650-715°C происходят оп-

ределенные структурные превращения, влияющие на физико-механические свойства этих сталей. В частности, возможна сфероидизация перлита, в результате которой преимущественно по границам ферритных зерен образуются крупные глобулярные частицы цементита. Сфероидизация значительно увеличивает скорость ползучести, несколько снижает прочность, относительные удлинение и сужение несколько повышаются [2]. Сфероидизация углеродистой стали может сопровождаться графитизацией – распадом цементита с образованием включений графита. Частицы графита ослабляют металлическую матрицу, приводят к концентрации напряжений и облегчают хрупкое разрушение. Такие включения наблюдаются чаще всего в зоне термического влияния сварных соединений [1]. В процессе эксплуатации сталей, легированных карбидообразующими элементами, возможен переход последних из твердого раствора феррита в карбиды. Обеднение твердого раствора, в частности, молибденом приводит к разупрочнению последнего, а мелкодисперсные карбиды хрома и ванадия препятствуют пластической деформации при ползучести. Внутреннее строение металла существенно влияет и на коррозионные свойства материалов, которые зачастую работают в присутствии коррозионно-агрессивных сред, таких как водород, сероводород, двуокись углерода, продукты распада органических продуктов и др. Достаточно сказать, что такой опасный вид разрушения, как водородное растрескивание, наиболее характерен для малопрочных низколегированных сталей с феррито-перлитной структурой и может протекать даже в ненагруженном состоянии [3].

Разрушение металла возможно также и из-за термической усталости. Усталостные трещины чаще всего распространяются транскристаллитно, а не по границам зерен. Более всего подвержены термической усталости углеродистые стали [2].

Выявление каких-либо отклонений структуры от нормативной и признаков разрушения основного металла сосудов было предметом металлографического контроля на нефте-химическом оборудовании ПО «Нафтан» и ПО «Азот». Обследованное оборудование, основные элементы которого изготовлены из вышеперечисленных малоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей, эксплуатировалось в течение 30-40 лет при различных температурах и давлениях рабочих сред, характеризующихся как некоррозионные. Это, например, корпус сокера (сталь 12МХ;  $R_{\text{раб}}=1,08$  МПа;  $T_{\text{раб}}=435^\circ\text{C}$ ) и колонна – стабилизатор (сталь СтЗсп;  $R_{\text{раб}}=1,1$  МПа;  $T_{\text{раб}}=160-170^\circ\text{C}$ ) установки Висбрекинг, реакторы вторичного реформинга и гидросероочистки (стали WStE36 и SA302B;  $R_{\text{раб}}=32$  МПа;  $T_{\text{раб}}=399^\circ\text{C}$ ), конверторы и испаритель (сталь 15ХМ,  $R_{\text{раб}}=2$  МПа;  $T_{\text{раб}}=450^\circ\text{C}$ ). Металлографический контроль, проведенный методом репликационной металлографии на наружной и внутренней поверхностях и

сварных швах корпусов вышеперечисленного оборудования, не обнаружил отклонений структуры от нормативной. Результаты металлографического контроля хорошо согласовывались с данными замеров твердости НВ. Каких-либо признаков разрушения основного металла и сварных швов в процессе металлографического контроля обследованного оборудования не обнаружено. На основании результатов последующего технического обследования и выполненных расчетов остаточного ресурса сосуда признаны пригодными к дальнейшей эксплуатации.

Здесь нельзя не сказать и об аварийных ситуациях, когда локальные изменения структуры основного металла обследуемого объекта ставят под угрозу надежность всей конструкции. Например, в 2000 г. на ПО «Азот» в шахтном конверторе, изготовленном из стали 09Г2С ( $P_{\text{раб}} = 1,7$  МПа;  $T_{\text{раб}} = 280^\circ\text{C}$ ), произошло частичное разрушение внутренней футеровки, вследствие чего стенка корпуса вошла в прямой контакт с рабочей средой – конвертированным газом, нагретым до  $1350^\circ\text{C}$ . После экстренного охлаждения на участке термического воздействия образовалась структура бейнитного типа намного более твердая (250-350 НВ), чем нормализованная феррито-перлитная (130-150 НВ). В этом случае для оценки состояния сосуда необходимо было провести дополнительные металлографические исследования и выполнить необходимые прочностные расчеты.

Вторая группа сталей, широко применяемая в оборудовании нефте-химического комплекса, – это коррозионно-стойкие и жаростойкие стали, работающие в средах повышенной агрессивности при высоких (до  $900-1000^\circ\text{C}$ ) температурах. При длительной эксплуатации оборудования, изготовленного из хромсодержащих нержавеющей сталей, в условиях повышенных температур ( $500-700^\circ\text{C}$ ) и замедленного охлаждения зоны термического влияния (ЗТВ) и наплавленного металла сварного соединения происходит образование сплошной цепочки карбидов хрома по границам зерен, в результате чего сталь приобретает склонность к межкристаллитной коррозии (МКК), которая проявляется в избирательном растворении границ зерен металла при достаточно высокой общей коррозионной стойкости /4/.

Выпадение обособленных карбидов хрома в ЗТВ сварных швов наблюдалось при проведении репликационного металлографического контроля реакторов каталитического жидкофазного окисления циклогексана ПО «Азот», изготовленных из аустенитной стали и находящихся в эксплуатации более 20 лет в присутствии коррозионной среды. Поскольку морфологические особенности обнаруженных карбидов не способствуют развитию МКК и в целом на всех проконтролированных участках основного металла, металла шва и ЗТВ признаков МКК не обнаружено, был сделан

вывод об отсутствии склонности к МКК металла обследованных реакторов.

Другой опасной особенностью нержавеющей сталей, подвергающихся длительному нагреву при температурах  $650-870^\circ\text{C}$ , является выделение  $\sigma$ -фазы – твердого и хрупкого интерметаллида, образующегося из твердого раствора аустенита либо феррита по границам зерен и внутри них в местах дендритной неоднородности, вызывая значительные внутренние напряжения в металле /5, 6/. Выделения  $\sigma$ -фазы являются причиной высокой хрупкости стали и уменьшают предел ползучести при температурах эксплуатации.

Так, практически полное отсутствие пластичности металла в результате выделения  $\sigma$ -фазы привело к частичному разрушению трубной подвески змеевика паровоздушной смеси во время аварийной остановки и ремонта печи пароперегревателя на ПО «Азот». Подвеска, изготовленная из литой аустенито-ферритной стали, эксплуатировалась в течение 23-х лет в атмосфере дымовых газов при температуре  $870^\circ\text{C}$ . Идентификация обнаруженной вторичной фазы проводилась на месте исключительно по ее морфологическим признакам без применения каких-либо других методов анализа. Позднее она была полностью подтверждена результатами замера микротвердости на вырезанных из мест разрушения образцах-свидетелях.

Из всего вышесказанного можно сделать общий вывод: металлографический экспресс-контроль и репликационная металлография являются одним из важнейших и необходимых этапов при определении состояния металла во время технического диагностирования объектов нефте-химического производства, во время их плановых ремонтов и особенно аварийных остановках.

#### Литература

1. Методика металлографического исследования структуры сталей и сплавов в полевых условиях. – Мн.: ФТИ НАН Б, 2000.
2. П.А. Антикайн, А.К. Зыков. Эксплуатационная надежность объектов котлонадзора. – Справочник. М.: Металлургия, 1985 г.
3. Структура и коррозия металлов: Атлас. Справ. изд./ Сокол И.Я., Ульянов Е.А., Фильдгандлер Э.Г. и др. – М.: Металлургия, 1989. – 400 с.
4. А.П. Гуляев. Металловедение. – М.: Металлургия, 1978. – 647 с.
5. В.А. Борисенко, А.П. Кузюков. Структурное разрушение реакционных труб печи риформинга производства аммиака/Хим. и нефт. машиностр. – 1997. – №1. – с. 64-65.
6. А.П. Акшенцева. Металлография коррозионно-стойких сталей и сплавов. Справочник. – М.: Металлургия, 1991. – 288 с.