

Б.А. Грязнов, Ю.С. Налимов, В.Е. Рябцев, О.Н. Герасимчук,
П.П. Малюшевский, Т.В. Хейдал

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ПЕРМАНЕНТНОЙ МАРКИРОВКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН (Часть III. Испытания на коррозионную усталость маркированных образцов)

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
просп. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина
Институт проблем прочности НАН Украины (г. Киев)
ул. Тимирязевская, 2, г. Киев-14, 252014, Украина,
International Pipe Technology & Management (Norway)*

Как видно из I и II частей статьи, пятно маркировки, нанесенное на трубчатое изделие нефтяного сортамента, следует рассматривать как микроконцентратор механических напряжений. Регулирование напряжений в микроконцентраторах, а также их полное устранение практически затруднительны, так как мало зависят от конструирования и пока не поддаются теоретическому определению, поскольку в ряде случаев в трубных элементах бурового оборудования, например, суммируется несколько волновых нагрузок: от изгиба в вертикальной и горизонтальной плоскостях, скручивания, от вибрации породоразрушающего инструмента и т.д.

Природа усталостного разрушения сложна и подчиняется множеству внешних и внутренних определителей. Структурные изменения материала циклически нагружаемых элементов не могут быть точно проконтролированы и строго математически описаны и поэтому невозможно определить состояние объекта исследования в любой период времени.

Однако ясно, что зарождение и развитие усталостных микротрещин обязательно происходят от границ пятна электроразрядной маркировки, как от включения, имеющего резко отличающиеся физико-механические особенности. Кроме того, как показано выше, здесь часто образуются выбросы металла над исходной поверхностью с образованием узкой щели на их границе раздела, особенно опасные при работе изделия в активной коррозионной жидкой среде.

Испытания на усталость образцов, вырезанных из труб нефтяного сортамента, производились на электродинамическом стенде ВЭС-400А Института проблем прочности НАН Украины, предназначенном для испытания изделий на вибрационную прочность.



Рис. 1. Чертеж образцов, вырезанных из труб нефтяного сортамента с наружным диаметром 120 мм из стали 17Г1С

На рис. 1 приведен чертеж образцов, вырезанных из труб нефтяного сортамента с наружным диаметром 120 мм, изготовленных из стали марки 17Г1С. Испытанию подвергались образцы с пятнами и без электроразрядной маркировки на рабочей части образца в месте его минимального сечения. Пятна маркировки наносились на наружную поверхность трубы.

© Грязнов Б.А., Налимов Ю.С., Рябцев В.Е., Герасимчук О.Н., Малюшевский П.П., Хейдал Т.В.,
Электронная обработка материалов, 2006, № 3, С. 101–105.

Предварительные пробные испытания показали, что усталостные трещины развиваются прежде всего со стороны внутренней поверхности трубы, поскольку она более дефектна изначально из-за особенностей использованной технологии изготовления. То есть дефектность внешней поверхности трубы даже с пятнами маркировки заведомо меньше дефектности ее внутренней поверхности. Тем не менее для устранения этого влияния пришлось провести фрезеровку со стороны внутренней поверхности трубы в области рабочей части образца для создания сжимающих остаточных напряжений и удаления дефектного слоя. Далее при помощи наждачной бумаги эта поверхность доводилась до 8-го класса чистоты, причем риски от обработки наждачной бумагой были параллельны оси образца. После этой доработки случаев появления трещин с внутренней поверхности не было, что очень важно, поскольку пятна маркировки располагались на наружной поверхности трубы.

Подготовленный образец закреплялся консольно на вибраторе электродинамического стенда ВЭД-400А коротким концом в зажиме, а на выпуклой поверхности рабочей части образца в минимальном его сечении устанавливался тензодатчик.

Испытания образцов проводили при колебаниях по первой изгибной форме в условиях комнатной температуры и симметричного цикла нагружения. Деформацию образцов в зоне разрушения определяли тензорезисторами КФ-5 (база 3 мм). Соответствие измеряемого сигнала относительной деформации поверхности образца в месте наклейки тензорезистора устанавливали динамической тарировкой тензорезистора на камертонной балке. При пересчете деформаций в напряжения значение модуля упругости E испытываемой стали было принято равным $2,1 \cdot 10^5$ МПа. Критерием предельного состояния (разрушения) образца считалось снижение резонансной частоты колебаний на $\sim 3\%$, при котором в образце появляется усталостная макротрещина. База испытаний для оценки ограниченного предела выносливости $N = 1 \cdot 10^7$ циклов. В процессе усталостных испытаний контролировали размах колебаний конца образца бинокулярным микроскопом, соответствовавшего заданной нагрузке при тарировке.

Испытания на усталость выполнялись на резонансной частоте ~ 150 Гц. Кривые усталости строились по результатам испытаний 10–11 образцов. Динамическая тарировка производилась на десяти образцах.

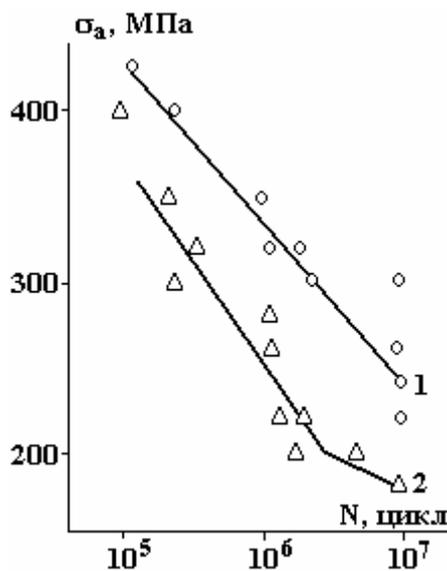


Рис. 2. Кривые усталости образцов, вырезанных из труб нефтяного сортамента.
1 – образцы без пятен маркировки; 2 – образцы с пятнами маркировки

По результатам испытаний построены кривые усталости в полулогарифмических координатах (рис. 2). Соответственно экспериментальные данные аппроксимировали уравнением

$$\sigma_i = A - B \lg N_i,$$

где σ_i – амплитуда максимальных напряжений цикла на i -м уровне; N_i – долговечность образца при σ_i .

Коэффициенты уравнений кривых усталости и среднее квадратичное отклонение S приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Образцы	A	B	S
Без пятен маркировки	895,4	91,9	0,0175
С пятнами маркировки	1008,9	125,2	0,0436

Результаты испытаний приведены на рис. 2, в табл. 2 и 3. Предел ограниченной выносливости определяли на уровне нагрузки, при которой на заданной базе испытаний сохранялось не менее двух образцов.

Характерно, что, во-первых, был сравнительно небольшой разброс результатов усталостных испытаний, во-вторых, усталостные трещины теперь развивались только от выпуклой рабочей части образца (наружной поверхности трубы).

Из рассмотренных результатов испытаний следует, что предел выносливости образцов без пятен маркировки равен 240 МПа, а образцов с пятнами (в режиме разрядов для исследуемой стали) – 180 МПа. К тому же наблюдаются отличия характера разрушения образцов без пятен маркировки и с нанесенными пятнами элементов марки. Образцы с пятнами маркировки (в режиме разрядов $U_0 = 10325$ В, $C = 96$ мкФ, $W_0 = 5000$ Дж) разрушались, как правило, с образованием более двух усталостных трещин у краев образца, которые сходились на пятне; такие же образцы без пятен – с одной усталостной трещиной.

Таблица 2. Результаты испытаний на усталость образцов, вырезанных из непромаркированных труб

№ образца	Частота циклов f , Гц	σ_a , МПа	$N \cdot 10^6$, циклов
1	160	430	0,15
2	145	350	1,05
3	155	320	1,17
4	157	320	1,94
5	150	300	2,60
6	145	300	10,17
7	156	260	9,4
8	155	240	10,10
9	150	240	10,20
10	153	220	10,00
11	155	220	10,00

Таблица 3. Результаты испытаний на усталость образцов, вырезанных из промаркированных труб

№ образца	Частота циклов f , Гц	σ_a , МПа	$N \cdot 10^6$, циклов
1	153	350	0,225
2	148	320	0,330
3	150	280	1,060
4	154	260	1,170
5	148	220	1,310
6	148	220	1,860
7	145	200	1,600
8	142	200	3,800
9	148	180	10,000
10	154	180	10,000

Одновременно выполнялись дополнительные металлографические исследования на приборе ПМТ-3 (измерение микротвердости), а также на микроскопе Neophot-2.

Установлено, что основная масса материала имеет полосчатую структуру (рис. 3,а), которая сформировалась еще при изготовлении труб. Зерна материала вытянуты в окружном направлении. Степень вытянутости зерен – не менее 3–5.

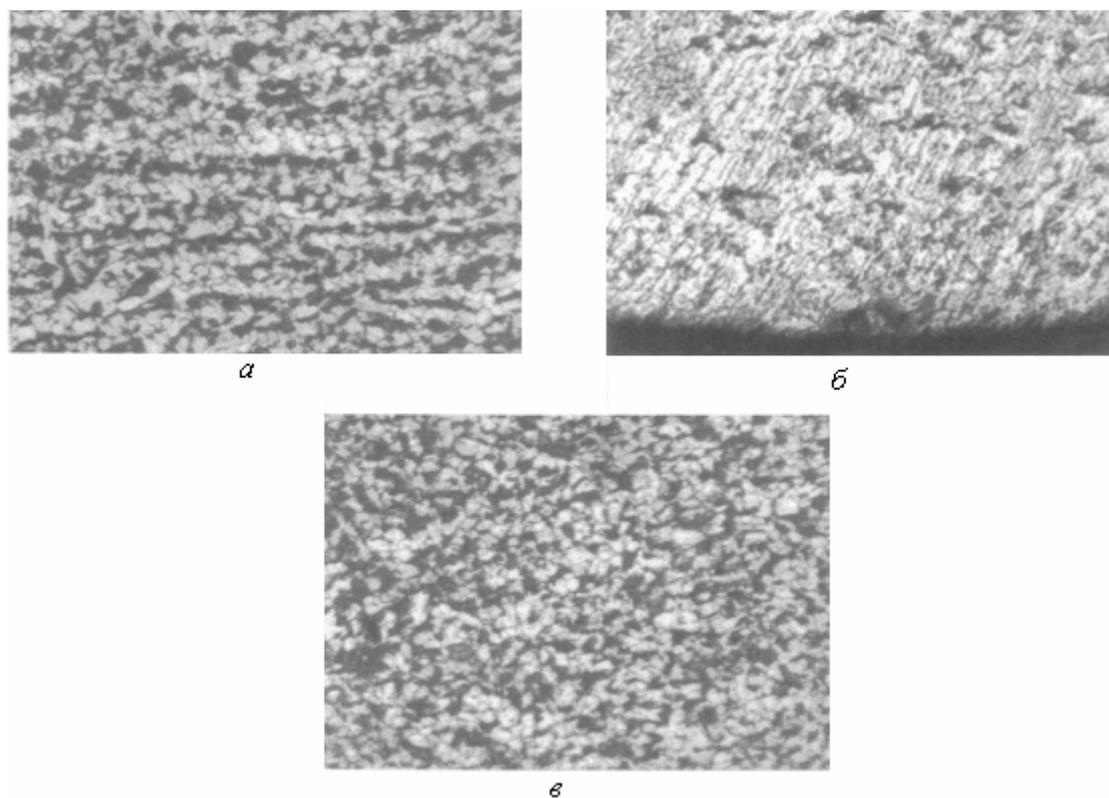


Рис. 3. Макроструктура образца, вырезанного из трубы нефтяного сортамента, после испытаний на усталость. а – основной материал ($\times 320$); б – поверхностный слой в районе нанесения пятна маркировки ($\times 500$); в – слой на глубине 35–40 мкм в районе пятна маркировки ($\times 320$)

Микротвердость материала образцов по всей его толщине (и в области пятна маркировки) находилась в пределах 2,2–2,4 ГПа и только на глубине до 15 мкм со стороны пятна несколько выше – до 3,0–3,2 ГПа.

Однако пятном по глубине затронут слой 0,8 мм. На всем слое полностью отсутствует полосчатая структура (рис. 3,б). Наблюдается укрупнение зерен в сравнении с основным (не затронутым действием плазмы разряда) приблизительно в 1,8–2,0 раза. В то же время в поверхностном слое пятна маркировки на глубине 35–40 мкм (в области повышенной микротвердости) зерно измельчено (рис. 3,в) по сравнению с основным примерно в 2,0–2,5 раза. Данный слой практически не содержит углерода, который заменен водородом и кислородом.

Хорошо идентифицируется обезуглероженный слой, который распространяется до глубины 120–150 мкм. По микроструктуре он похож на сталь Ст.35. На глубине около 200 мкм проявляется избыток углерода, который был туда оттеснен при ударно-тепловом воздействии канала электрического разряда. Структуры этой области и Ст.50 с крупным зерном похожи.

По мере приближения к границе (по глубине) пятна начинают появляться вытянутые зерна в направлении прокатки труб. Зерно начинает измельчаться и вытягиваться. В области, не подвергнутой действию канала электрического разряда, отклонений материала от основного по виду микроструктуры не установлено.

Проведены также испытания образцов на коррозионную стойкость. Заневоленные образцы помещались в емкость с коррозионной средой (3% раствор NaCl в воде), где выдерживались 2 месяца. Кроме того, часть испытаний на усталостную прочность производилась в коррозионной среде.

Для приближенного определения степени поврежденности по-разному обработанных поверхностей образцов после испытаний на коррозионную стойкость был использован метод измерения глубины каверн в оксидном слое. Для этого фокусировали объектив сначала на

поверхность слоя, а затем на донную часть самой глубокой каверны. Разность их уровней оценивали по специально откалиброванному лимбу механизма точной фокусировки и пересчитывали в толщину оксидного (поврежденного) слоя. Эти данные представлены в табл. 4.

Таблица 4. Толщина (в мкм) продуктов коррозии в центральной части кратера (пятна маркировки)

№ образца	На необработанном слое	На обработанном слое в центре кратера
2	25	52
3	18	38
7	12	18

Осмотр шлифа пятна при увеличении $\times 400$ показал, что после испытаний на коррозионную стойкость в поперечном направлении на краю имеются зазубрины и щербины, соответствующие ямкам на дне кратера, а твердый перекристаллизованный слой отсутствует.

В целом проведенные испытания доказали, что полученные экспериментальные данные близки к результатам испытаний на воздухе. Разброс результатов небольшой, но все же характерно, что при испытаниях на большой базе ($\sim 10^7$ циклов) коррозионная среда начинает проявляться сильнее у промаркированных разрядами образцов. Так, при испытании образцов с пятнами маркировки на воздухе предел выносливости был равен 180 МПа, а в коррозионной среде он понизился до 140 МПа.

В то же время у образцов без пятен маркировки разница пределов выносливости на воздухе и в коррозионной среде небольшая.

Образцы, заневоленные и выдержанные два месяца в коррозионной среде (с пятнами маркировки и без них), не показали снижения циклической прочности.

Испытания образцов на воздухе с пятнами маркировки и с полированной рабочей частью образца в районе наружной поверхности трубы выявили, что их долговечность практически равна долговечности образцов без пятен маркировки с неполированной поверхностью.

Таким образом, в целом промаркированные образцы отличаются от непромаркированных меньшим пределом выносливости, особенно в коррозионной среде, и уменьшенной коррозионной стойкостью, что связано со слишком большим энергетическим воздействием на материал канала подводных электрических разрядов.

Поступила 31.08.05

Summary

In work is cited data about tireless durability and corrosive firmness of metal of the standards cut out from pipes with the inflicted electric digits by the spots of marking. It is set that the marked standards differ from non-marked by the less limit of endurance, special in a corrosive environment, and the diminished corrosive firmness, that is related to too large power influence on material by the channel of underwater electric digits.