



Стандартный метод испытания

Лабораторные испытания металлов на сопротивление сульфидному растрескиванию под напряжением и коррозионному растрескиванию под напряжением в H₂S-содержащих средах

Настоящий стандарт Национальной Ассоциации инженеров-коррозионистов (NACE International) представляет собой документ, одобренный всеми членами организации, которые проанализировали сам документ, его содержание и положения. Принятие настоящего стандарта ни в коей мере не препятствует кому бы то ни было, независимо от того, принят им стандарт или нет, производить, сбывать, покупать или применять продукцию, технологии или методики, не соответствующие настоящему стандарту. Ничто из содержащегося в настоящем стандарте NACE International не может быть истолковано, непосредственно или косвенно, как предоставление каких-либо прав на производство, сбыт или применение каких-либо методов, приборов или изделий, защищенных патентами, или как гарантия либо защита от ответственности за нарушение патентных прав. Настоящий стандарт устанавливает минимальные требования и никоим образом не может рассматриваться, как ограничение на применение новых технологий или материалов лучшего качества. Также настоящий стандарт не претендует на полноту охвата рассматриваемого в нем предмета. В некоторых случаях непредвиденные обстоятельства могут свести на нет пользу от применения настоящего стандарта. NACE International не принимает на себя какой-либо ответственности за толкование или применение настоящего стандарта третьими сторонами, а принимает на себя ответственность только за официальные интерпретации, выпущенные NACE International в соответствии с существующим порядком и политикой, которые запрещают выпуск толкований отдельными лицами, добровольно взявшими на себя такую функцию.

Ответственность за анализ соответствующих нормативных документов, регламентирующих вопросы охраны здоровья на производстве, техники безопасности и экологии, до применения настоящего стандарта NACE International возлагается на его пользователей. Настоящий стандарт NACE International не рассматривает все потенциальные проблемы охраны здоровья на производстве, техники безопасности и воздействия на окружающую среду, связанные с применением материалов, оборудования и/или методов работы, описанных или упомянутых в настоящем стандарте. Ответственность за разработку соответствующих правил техники безопасности, охраны здоровья и защиты окружающей среды по согласованию с соответствующими органами, если это необходимо, во исполнение существующих применимых нормативных требований, до применения настоящего стандарта также возлагается на пользователей настоящего стандарта NACE International.

ВНИМАНИЕ: Стандарты NACE International периодически подвергаются пересмотру и могут быть изменены или аннулированы в любой момент без предварительного уведомления. NACE International требует, чтобы повторное утверждение, пересмотр или отзыв осуществлялись не реже, чем раз в пять лет с момента публикации предыдущего издания. Пользователь должен сам следить за тем, чтобы у него было последнее издание. Покупатели стандартов NACE International могут получить текущую информацию о всех стандартах и других публикациях NACE International, обратившись в Сервисный отдел NACE International по адресу: 1440 South Creek Drive, Houston, Texas 77084-4906 (тел. +1 [281] 228-6200).

Пересмотрен 03/12/2005

Пересмотрен в 1996

Пересмотрен в 1990

Пересмотрен в 1986

Утвержден в 1977

NACE International

1440 South Creek Drive, Houston, Texas 77084-4906

+ 1 281 / 228-6200

ISBN 1-57590-036-X

© 2005, NACE International

Предисловие

Настоящий стандарт посвящен испытанию металлов на сопротивление разрушению от растрескивания под комбинированным действием растягивающего механического напряжения и коррозии в водных средах, содержащих сероводород (H_2S). Это явление обычно называют сульфидным растрескиванием под напряжением (SSC – sulfide stress cracking), когда речь идет об эксплуатации при комнатной температуре, и коррозионным растрескиванием под напряжением (SCC – stress corrosion cracking), когда речь идет об эксплуатации при более высоких температурах. Чтобы отразить эти разновидности в зависимости от температуры и материала, в данном стандарте это явление называется растрескиванием под действием внешних факторов (EC – environmental cracking). В контексте настоящего стандарта, EC включает только SSC, SCC и водородное растрескивание под напряжением (HSC – hydrogen stress cracking).

Основная цель данного стандарта состоит в том, чтобы содействовать обеспечению соответствия испытаний установленным требованиям, с тем, чтобы данные, полученные из разных источников, могли сравниваться на общей основе. Соответственно, данный стандарт помогает производить оценку и выбор всевозможных металлов и сплавов, независимо от их формы или области применения, на предмет эксплуатации в H_2S -содержащей среде. Данный стандарт содержит методы испытания металлов с использованием образцов для испытания на растяжение, образцов в виде балки для испытания на изгиб, в виде С-образного кольца и в виде двухконсольной балки (ДКБ). На некоторые стандартные методы испытаний по ASTM⁽¹⁾, применительно к дополнительным испытаниям, даны ссылки, что делает данный документ всеобъемлющим стандартом на методы испытания. Кроме того, дана ссылка на метод четырехточечного изгиба, в качестве дополнительного испытания^[1,2]. Данный стандарт предназначен для использования лабораторным персоналом и материалововедами в целях содействия обеспечению соответствия испытаний установленным требованиям.

Сульфидное растрескивание под напряжением (SSC) металлов в средах нефтяных месторождений, содержащих H_2S , с 1952 года признается проблемой разрушения материалов. Лабораторные данные и эксплуатационный опыт свидетельствуют, что даже самых малых концентраций H_2S может быть достаточно, чтобы вызвать разрушение материалов, чувствительных к этому виду коррозии, под действием SSC. В некоторых случаях действие H_2S комбинируется с действием хлоридов, вызывая разрушения от коррозии (SSC и других видов) и растрескивания. Однако лабораторный и эксплуатационный опыт показал инженерам-материаловедам оптимальный выбор и характеристики материалов с минимальной склонностью к SSC. Хотя данный стандарт посвящен в первую очередь сульфидному растрескиванию под напряжением (SSC) (при комнатной температуре) и коррозионному растрескиванию под напряжением (SCC) (при повышенной температуре), при выборе материалов для работы в кислых (H_2S -содержащих) средах необходимо учитывать возможность иных механизмов разрушения (например, водородное вспучивание, водородное растрескивание (HIC), хлоридное коррозионное растрескивание под напряжением, питтинг, коррозию с потерей массы).

Необходимость лучшего понимания переменных факторов растрескивания металлов под действием внешних факторов (EC металлов) в условиях нефтяных месторождений, и достижения лучшей корреляции данных вызывается рядом причин. Новые конструкционно-проектные потребности нефтегазовой промышленности ведут к применению более прочных материалов, которые, как правило, более чувствительны к EC, чем менее прочные сплавы.

⁽¹⁾ ASTM International (ASTM), 100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428-2959.

Эти потребности привели к обширным программам НИОКР, направленным на получение более стойких сплавов и/или более эффективных режимов термообработки. В то же время, пользователи в нефтепереработке и производстве синтетического топлива заставляют работать имеющиеся материалы все ближе к пределу их механических свойств.

Считают, что разрушение некоторых сплавов от SSC при комнатной температуре является результатом водородного охрупчивания (HE – hydrogen embrittlement). При катодном выделении водорода на поверхности металла, например, при коррозии или катодном заряде, при наличии H_2S , а также других компонентов, таких, как содержащих цианиды и мышьяк, заставляет атомарный водород проникать в металл вместо образования молекул водорода, которые не способны проникать в металл. В металле атомы водорода диффундируют в участки с интенсивным трехосным растяжением или в некоторые микроструктуры, где они попадают в ловушки, снижая пластичность металла. Хотя известны различные виды растрескивания металлов, именно задержанное хрупкое разрушение в результате совместного действия коррозии в водно-сульфидной среде и растягивающих напряжений известно как сульфидное растрескивание под напряжением, при этом разрушение возможно при напряжениях, значительно меньших предела текучести.

В некоторых случаях, однако, разрушение может возникнуть в результате локальных процессов анодной коррозии, в которых водород может участвовать, а может и не участвовать. В таких случаях разрушение является результатом анодного коррозионного растрескивания под напряжением (SCC). Такие разрушения исторически называли SSC, хотя водород может и не быть их причиной.

Данный стандарт был впервые издан NACE International в 1977 силами рабочей группы T-1F-9, являющейся подразделением Комитета T-1F по металлургии оборудования нефтяных месторождений. В 1986, 1990 и 1996 годах рабочая группа T-1F-9 производила пересмотры стандарта. В 2005 он был пересмотрен рабочей группой 085 "Сульфидное растрескивание под напряжением: Методы испытания металлических материалов". Группа 085 находится под руководством специальной технологической группы (STG) 32 "Нефтегазовая промышленность – Металлургия" и спонсируется STG 62 "Контроль и измерения коррозии – Теория и технические приложения". Стандарт издан NACE под эгидой STG 32.

В стандартах NACE термины "должен", "следует" и "может" используются в соответствии с положениями Руководства по стилю публикаций NACE, издание 4, п. 7.4.1.9. "Должен" означает обязательное требование, "следует" – рекомендуемое, но не обязательное положение, "может" – вариант.

NACE International
Стандартный метод испытания

**Лабораторные испытания металлов на сопротивление
сульфидному растрескиванию под напряжением и коррозионному
растрескиванию под напряжением в H₂S-содержащих средах**

Содержание

Раздел 1: Общие положения	1
Раздел 2: Разнообразие условий испытания на стойкость к растрескиванию под действием внешних факторов (ЕС)	2
Раздел 3: Реактивы	3
Раздел 4: Образцы для испытаний и свойства материалов	3
Раздел 5: Сосуды и приспособления для испытаний	4
Раздел 6: Испытательные растворы	5
Раздел 7: Испытания при повышенных температуре/давлении	7
Раздел 8: Метод А – Стандартное испытание на растяжение по NACE	11
Раздел 9: Метод В – Стандартное испытание балки на изгиб по NACE	18
Раздел 10: Метод С – Стандартный метод испытания С-образного кольца по NACE	27
Раздел 11: Метод D – Стандартное испытание двухконсольной балки по NACE	37
Ссылки	48
Приложение А – Меры безопасности при работе с H ₂ S	50
Приложение В – Комментарий к методам испытания на ЕС	51
Рис. 1: Общая схема оборудования для испытания по Методу А – Стандартное испытание на растяжение по NACE	8
Рис. 2: Общая схема оборудования для испытания по Методу В – Стандартное испытание на изгиб балки по NACE; по Методу С – Стандартное испытание С-образного кольца по NACE; и по Методу D – Стандартное испытание двухконсольной балки по NACE	9
Рис. 3: Образцы для испытания на растяжение	12
Рис. 4: Устройство для создания постоянной нагрузки при помощи грузов	14
Рис. 5: Устройство для создания длительной нагрузки	15
Рис. 6: Кривая "напряжение – логарифм времени до разрушения"	21
Рис. 7: Масштабный чертеж стандартного образца в виде балки для испытания на изгиб	22
Рис. 8: Типовое устройство для нагружения образца для испытания на изгиб	24
Рис. 9: Масштабный чертеж С-образного образца	32
Рис. 10: Образец в виде двухконсольной балки	39
Таблица 1 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 1): Испытание по стандарту NACE TM0177 Метод А – Испытание на растяжение по NACE	19
Таблица 1 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 2): Испытание по стандарту NACE TM0177 Метод А – Испытание на растяжение по NACE	20
Таблица 2 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 1): Испытание по стандарту NACE TM0177 Метод В – Стандартное испытание балки на изгиб по NACE	28
Таблица 2 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 2) Испытание по стандарту NACE TM0177 Метод В – Стандартное испытание балки на изгиб по NACE	29
Таблица 3 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 1): Испытание по стандарту NACE TM0177 Метод С – Испытание С-образного кольца по NACE	35
Таблица 3 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 2): Испытание по стандарту NACE TM0177 Метод С – Испытание С-образного кольца по NACE	36
Таблица 4 – Значения смещения консоли для стальных труб нефтяного сортамента групп прочности по API и других групп прочности	40
Таблица 5 – Рекомендуемые значения смещения консолей для некоторых материалов и уровней прочности	41
Таблица 6 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 1): Испытание по стандарту NACE TM0177 Метод D – Испытание двухконсольной балки по NACE	46
Таблица 6 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 2): Испытание по стандарту NACE TM0177 Метод D – Испытание двухконсольной балки по NACE	47

Раздел 1: Общие положения

1.1 Настоящий стандарт посвящен испытанию металлов при воздействии растягивающих напряжений на сопротивление растрескиванию в H₂S-содержащей водной среде с низким значением pH. Углеродистые и низколегированные стали обычно испытываются на стойкость к растрескиванию под действием внешних факторов (ЕС) при комнатной температуре, при которой склонность к SSC обычно высока. Другие типы сплавов имеют более сложную корреляцию ЕС с температурой.

1.2 Данный стандарт описывает применяемые реактивы, образцы для испытания и оборудование, в нем обсуждаются свойства основного материала и образцов для испытаний, и устанавливаются процедуры испытаний. Всего в данном стандарте предусмотрено четыре метода испытаний:

Метод А – Стандартное испытание на растяжение

Метод В – Стандартное испытание на изгиб

Метод С – Стандартное испытание С-образного кольца

Метод D – Стандартное испытание двухконсольной балки (ДКБ)

Разделы 1-7 данного стандарта содержат общие указания ко всем четырем методам. Разделы 8-11 дают указания по применению метода испытания для каждого типа образца. В начале описания каждого метода испытания (разделы 8-11) приводятся общие указания по определению пригодности каждого метода. Также обсуждается порядок оформления результатов испытаний.

1.3 Металлы могут испытываться на стойкость к ЕС при температуре и давлении окружающей среды (при атмосферных условиях), или при повышенных значениях температуры и давления.

1.3.1 При испытании в условиях окружающей среды порядок испытания в общем виде заключается в следующем. Нагруженные образцы погружают в кислую водную среду, содержащую H₂S. Нагрузки прикладывают с определенным шагом, при этом получают данные, характеризующие сопротивление материала ЕС.

1.3.2 Для испытаний при температурах выше 27°C (80°F), как при атмосферном, так и при повышенном давлении, в разделе 7 приведена альтернативная методика испытания. Все методы (А, В, С и D) могут быть адаптированы к этой методике.

1.4 Данный стандарт может применяться для промышленных или приемочных испытаний, чтобы убедиться в том, что изделие отвечает определенному минимальному уровню стойкости к ЕС, установленному в стандартах API⁽²⁾ 5CT⁽³⁾, ISO⁽³⁾ 11960⁽⁴⁾, или заданному пользователем, либо покупателем. С помощью данного стандарта также можно получить количественную характеристику стойкости изделия к ЕС для исследовательских и справочных целей. Такая оценка может быть основана на следующем:

2

⁽²⁾ Американский нефтяной институт (API), 1220 L. St. NW, Washington, DC 20005.

⁽³⁾ Международная организация по стандартизации (ISO), 1 rue de Varembe, Case postale 56, CH-1211, Geneva 20, Switzerland.

Метод А	Максимальное напряжение без разрушения в течение 720 часов.
Метод В	Статистический коэффициент критического напряжения (S_c) при 50-процентной вероятности разрушения в течение 720 часов.
Метод С	Максимальное напряжение без разрушения в течение 720 часов.
Метод D	Среднее значение $K_{I,SSC}$ (пороговый коэффициент интенсивности напряжений при SSC) при успешных испытаниях одинаковых образцов.

1.5 Меры безопасности: Сероводород исключительно токсичен и требует осторожного обращения (см. Приложение А).

Раздел 2: Разнообразие условий испытания на стойкость к растрескиванию под действием внешних факторов (ЕС)

2.1 Интерпретация результатов испытаний на коррозию под напряжением является трудной задачей. Методы испытаний, приведенные в настоящем стандарте, являются тяжелыми, когда ускоренные испытания особо затрудняют оценку полученных данных. При проверке воспроизводимости результатов испытаний в различных лабораториях наблюдается ряд нежелательных побочных эффектов, типичных для ускоренных испытаний, в том числе:

2.1.1 Испытательная среда может вызвать разрушение от водородного растрескивания (НЦ) и водородного вспучивания. Это особенно касается низкопрочных сталей, обычно не подверженных сульфидному растрескиванию под напряжением (SSC). Водородное растрескивание (НЦ) может быть выявлено визуальным и металлографическим контролем. Вспучивание обычно видно на поверхности образца (подробнее об этом явлении см. стандарт NACE TM0284^[5]).

2.1.2 Испытательная среда может вызвать коррозию некоторых сплавов, которые обычно не корродируют в реальных условиях эксплуатации, и, тем самым, вызвать разрушение вследствие ЕС сплавов, которые обычно не подвержены этому виду разрушения. Проблема стоит особенно остро в отношении мартенситных и дисперсионно-твердеющих нержавеющей сталей.

2.2 Кроме того, при выборе метода (методов) испытания необходимо учитывать некоторые другие аспекты этого вопроса, в том числе:

2.2.1 Важную роль может играть анизотропия механических свойств и чувствительности материала к растрескиванию. Путь трещины в образце должен соответствовать ожидаемому пути в реальной конструкции.

2.2.2 Гальванические эффекты между разнородными металлами, которые могут либо усилить, либо ослабить склонность к растрескиванию. Примерами этого могут служить ускоренное ЕС некоторых никелевых коррозионно-стойких сплавов и замедленное ЕС некоторых дуплексных нержавеющей сталей, в паре с электрохимически менее благородным металлом, например, углеродистой или низколегированной сталью.

2.2.3 Температура испытания оказывает влияние на склонность к растрескиванию. Повышение температуры сверх 24°C (75°F) уменьшает тяжесть SSC в сталях, а понижение температуры ниже 24°C (75°F) может увеличить тяжесть SSC.

- 2.2.4 Разные методы испытаний могут дать разное ранжирование сходных материалов.
- 2.2.5 Неоднородность материалов, например, наличие сварных соединений, сегрегации и т.п. может оказать влияние на результат испытания. Это особенно верно в отношении сравнения результатов, полученных при испытании больших объемов материала (испытание на растяжение), с результатами испытания малых объемов (испытание на изгиб).
- 2.2.6 Наибольшие напряжения, при которых не происходит разрушения при заданном времени воздействия, должны рассматриваться как условные предельные напряжения. При более длительном воздействии или при большем числе образцов это предельное напряжение может оказаться меньше.
- 2.2.7 Результаты испытания на стойкость к ЕС могут иметь статистически переменную природу. Может оказаться необходимым повторить испытание для получения представительного значения показателя, характеризующего стойкость к ЕС.
- 2.2.8 Некоторые образцы более пригодны, чем другие, для определения стойкости к ЕС в локализованных участках, например, вблизи поверхности и в зоне сварки.
- 2.2.9 Некоторые виды испытаний на стойкость к ЕС требуют значительно больше времени, чем другие.

Раздел 3: Реактивы

3.1 Чистота реактивов

3.1.1 Испытательные газы, хлорид натрия (NaCl), уксусная кислота (CH₃COOH) и растворители должны быть ч.д.а. (чистыми для анализа) или химически чистыми (чистота не ниже 99,5%). (См. Приложение В).

3.1.2 Вода для испытаний должна быть дистиллированной или деионизированной, качество воды должно быть не хуже, чем ASTM тип IV (ASTM D 1193^[6]). Водопроводная вода не должна использоваться.

3.2 Для удаления кислорода должен применяться инертный газ, то есть азот, аргон или иной инертный газ высокой чистоты.

Раздел 4: Образцы для испытаний и свойства материалов

4.1 Следует тщательно продумать местоположение и ориентацию образцов, вырезаемых из изделия, с тем, чтобы результаты испытания дали максимально осмысленное показание характеристики, ожидаемой от изделия в условиях эксплуатации. Все образцы в серии следует отбирать из металлургически эквивалентных мест (т.е., все образцы должны иметь одинаковую ориентацию с аналогичной или почти одинаковой микроструктурой и механическими свойствами).

4.2 Для определения свойств основного материала используется испытание на растяжение, проводимое в соответствии со стандартными методами испытаний, например по ASTM A 370⁽⁷⁾. Для определения предела прочности, предела текучести, относительного удлинения и относительного сужения используют не менее двух образцов и усредняют результаты. Изготовление образца для испытания на растяжение и образца для испытания на стойкость к ЕС из соседних участков и при одинаковом положении и ориентации может свести к минимуму обычно имеющиеся место различия свойств между образцами.

4.3 Ряд фундаментальных свойств материалов связан со склонностью к ЕС. Поэтому, вместе с результатами испытания на растяжение следует определить и зафиксировать все данные о химическом составе, механических свойствах, термообработке и предшествующей обработке (такие, как степень холодного обжатия или предварительной деформации). Материалы с разными режимами термообработки и микроструктурами, даже при одинаковом химическом составе должны испытываться как разные материалы.

4.4 Твердость образца может быть измерена до или после воздействия испытательной среды. Однако эти измерения нельзя производить на напряженной части образца.

Раздел 5: Сосуды и приспособления для испытаний

5.1 Размер, форма и впускные отверстия сосудов зависят от вида образцов и приспособлений, используемых для нагружения образцов.

5.2 Сосуды должны быть пригодны для продувки с целью удаления кислорода перед испытанием и не должны допускать попадания воздуха во время испытания. Небольшое выходное отверстие для отвода H_2S , обеспечивающее избыточное давление в сосуде 250 Па (1,0 дюйм водяного столба) предотвращает попадание кислорода через мелкие неплотности или через вытяжку. (См. Приложение В, раздел "Причины необходимости исключения попадания кислорода").

5.3 Сосуды для испытаний должны быть такого размера, чтобы обеспечить сохранение объема раствора в определенных пределах по отношению к площади поверхности образца и избежать дрейфа pH со временем. (Установленные пределы см. в каждом из методов испытания).

5.4 Сосуды для испытаний должны быть изготовлены из материала, инертного по отношению к среде испытания. Хотя некоторые пластиковые сосуды оказались вполне пригодными, другие пластиковые сосуды могут вызвать изменение результатов испытаний вследствие старения. Стекланные сосуды не проявляют такой тенденции.

5.5 Образцы должны быть изолированы от сосудов и приспособлений, изготовленных из разнородных металлов, если такой металл находится в контакте с испытательной средой.

5.6 Для нагружения или искривления образца следует выбрать жесткий электроизоляционный материал, не подверженный релаксации или текучести под нагрузкой.

5.7 Гальваническая связь

5.7.1 Может потребоваться оценка влияния гальванической связи на стойкость к ЕС, как в случае контакта нержавеющей стали или коррозионно-стойкого сплава и обычной стали (см. 2.2.2).

5.7.1.1 Для такой оценки могут использоваться гальванические пары чугуна или стали, прочно закрепленные на образце и имеющие площадь, составляющую 0,5 – 1,0 от обнаженной площади образца.

5.7.2 Частицы сульфида железа могут быть электропроводными. При отложении на изоляционном материале они могут образовать проводящий мостик между материалами и повлиять на результаты испытаний.

Раздел 6: Испытательные растворы

6.1 Испытательный раствор А

6.1.1 Испытательный раствор А представляет собой подкисленный, с добавлением буфера, водный раствор, насыщенный сероводородом (H_2S).

6.1.2 Испытательный раствор А должен содержать 5,0 масс-% хлорида натрия и 0,5 масс-% кристаллической уксусной кислоты, растворенных в дистиллированной или деионизированной воде (например, в 945 г дистиллированной или деионизированной воды растворяют 50,0 г $NaCl$ и 5,0 г CH_3COOH).

6.1.3 Ожидаемое значение pH испытательного раствора до или после насыщения сероводородом, но до соприкосновения с образцом для испытания, составляет 2,6 – 2,8. Каждая лаборатория должна иметь подтвержденную и документированную процедуру продувки, чтобы удостовериться в том, что значение pH испытательного раствора А после продувки не превысило 3,0. Во время испытания значение pH может возрасти, но не должно превышать 4,0. При соблюдении определенного соотношения объема сосуда к площади поверхности образца и принятии мер к недопущению попадания кислорода в сосуд, в соответствии с данным стандартом, pH не превысит этого значения.

6.1.4 Испытательный раствор А должен применяться в Методах А, С и D, если пользователем или покупателем не оговорено применение испытательного раствора В или испытательного раствора С.

6.2 Испытательный раствор В

6.2.1 Испытательный раствор В представляет собой подкисленный, с добавлением буфера, водный раствор, насыщенный сероводородом (H_2S).

6.2.2 Испытательный раствор В должен содержать 5,0 масс-% хлорида натрия, 2,5 масс-% кристаллической уксусной кислоты и 0,41 масс-% ацетата натрия, растворенных в дистиллированной или деионизированной воде (например, в 921 г дистиллированной или деионизированной воды растворяют 50,0 г $NaCl$, 25,0 г CH_3COOH и 4,1 г CH_3COONa).

6.2.3 Ожидаемое значение рН испытательного раствора до или после насыщения сероводородом, но до соприкосновения с образцом для испытания, составляет 3,4 – 3,6. Во время испытания значение рН может возрасти, но не должно превышать 4,0. Если рН превысит 4,0, испытание считается недействительным. При соблюдении определенного соотношения объема сосуда к площади поверхности образца и принятии мер к недопущению попадания кислорода в сосуд, в соответствии с данным стандартом, рН не превышает этого значения.

6.2.4 Испытательный раствор В предназначен для использования с углеродистыми и низколегированными сталями.

6.2.5 Использование испытательного раствора В допускается в Методах А, С и D.

6.3 Испытательный раствор С

6.3.1 Испытательный раствор С представляет собой концентрированный водный раствор с добавлением буфера, в котором содержание хлоридов, парциальное давление H_2S и значение рН устанавливаются пользователем или покупателем так, чтобы эти параметры моделировали реальные условия эксплуатации.

6.3.2 Испытательный раствор С должен состоять из дистиллированной или деионизированной воды, содержащей 0,4 г/л ацетата натрия (5 ммоль CH_3COONa) и хлорид (добавленный в виде $NaCl$) в той же концентрации, что и в реальных условиях эксплуатации.

6.3.3 Для получения заданного рН добавляют соляную кислоту (HCl) или гидроксид натрия ($NaOH$). Значение рН испытательного раствора измеряют в начале испытания и в конце испытания. Значение рН испытательного раствора должно поддерживаться в пределах $\pm 0,2$ от заданного рН.

6.3.4 Испытательный газ должен состоять из смеси H_2S и диоксида углерода (CO_2), при этом содержание H_2S должно быть достаточным для получения заданного парциального давления H_2S , характерного для реальных условий эксплуатации. Газ для испытания должен непрерывно барботироваться через испытательный раствор. Скорость барботирования газа должна быть оптимизирована для поддержания насыщенности испытательного раствора.

6.3.5 Испытательный раствор С предназначен для использования с мартенситными нержавеющими сталями.

6.3.6 Использование испытательного раствора С допускается в Методах А, С и D.

Примечание: Сочетание пониженной концентрации ацетата (0,4 г/л) и подкисления соляной кислотой (HCl) вместо уксусной кислоты приводит к значительно пониженной концентрации уксусной кислоты в испытательном растворе С по сравнению с испытательным раствором В. Хотя этого может быть достаточно для поддержания постоянства объемного значения рН раствора при испытании коррозионно-стойких сплавов, стойкость к повышению рН на границе металл-раствор вследствие диссоциации уксусной кислоты снижается. Поскольку испытания проводятся при малой конвекции, возможно не-

большое увеличение рН на поверхности, и, для условий на границе между активным и пассивным поведением, это может привести к пассивности, что даст чрезмерно оптимистичный результат. Измерения объемного значения рН раствора не обязательно указывают на те или иные ограничения буферной способности раствора, так как изменения рН в высокой степени локализованы.

6.4 Испытательный раствор для использования в Методе В описан в 9.3.

6.5 Все реактивы, добавляемые в испытательные растворы, должны измеряться с точностью $\pm 1,0\%$ от количества, установленного для данного метода испытания.

6.6 Температура испытательного раствора должна поддерживаться на уровне $24\pm 3^\circ\text{C}$ ($75\pm 5^\circ\text{F}$), за исключением Метода D (испытание двухконсольной балки), при котором диапазон изменения испытательной температуры составляет $24\pm 1,7^\circ\text{C}$ ($75\pm 3,0^\circ\text{F}$). Также, диапазон изменения испытательной температуры должен быть задан в соответствии с условиями испытания при повышенной температуре (см. раздел 7). Любые отклонения за эти пределы должны быть указаны в протоколе.

6.7 В протоколе испытания материала должен быть указан испытательный раствор, применявшийся для каждого метода испытания.

Раздел 7: Испытания при повышенных температуре/давлении

7.1 Для большинства классов материалов преобладающие механизмы растрескивания в присутствии H_2S изменяются с изменением температуры. Растрескивание ферритных сталей и ферритных и мартенситных нержавеющей сталей происходит, в основном, по водородному (т.е. катодному) механизму; эти стали имеют максимальную чувствительность к такому растрескиванию при комнатной температуре. У аустенитных нержавеющей сталей при росте температуры чувствительность к растрескиванию увеличивается вследствие сильного влияния анодных процессов. Дуплексные нержавеющей стали проявляют смешанные свойства, с максимальной чувствительностью к растрескиванию в среднем температурном интервале. Для облегчения проведения испытаний при моделировании условий эксплуатации или для прогнозирования наихудших условий, а также для облегчения проведения испытаний при парциальном давлении H_2S (абсолютном) свыше 100 кПа (14,5 psia), имеются следующие модифицированные методики.

7.2 По сравнению с испытаниями при комнатной температуре и атмосферном давлении, испытания при повышенных температуре и давлении требуют рассмотрения дополнительных вопросов безопасности. Хотя в данном документе приведены некоторые общие руководящие положения, они могут не быть всеобъемлющими, и их следует дополнить так, чтобы гармонизировать с местными требованиями техники безопасности. Поскольку во время испытания H_2S может расходоваться, описаны методики восполнения газа и обеспечения непрерывного барботирования газа. Скорость утечки H_2S и ее влияние на агрессивность испытательной среды являются функциями нескольких факторов, включая скорость коррозии испытуемого материала и парциальное давление H_2S в испытательной среде. Приведено руководство по принятию мер, которые, как показал опыт, являются подходящими для поддержания требуемого парциального давления H_2S , но во всех случаях необходимо получить подтверждение того, что требуемые условия испытания поддерживаются на заданном уровне, путем измере-

ния концентрации H_2S либо в испытательном растворе, либо в газовой фазе. Эта информация должна быть приведена в протоколе вместе с результатами испытания.

7.3 Испытательное оборудование

Испытательное оборудование должно состоять из сосуда для испытания и вспомогательного оборудования, рассчитанных на то, чтобы выдерживать коррозию и давление, соответствующие условиям испытания, с необходимым запасом надежности.

7.3.1 Сосуд (емкость) для испытания должен быть оборудован карманом для термопары или другими средствами измерения температуры испытательного раствора, впускным и выпускным отверстиями для газа, погружной трубкой на впускном отверстии и прибором для измерения давления.

7.3.2 Если необходимо поддерживать непрерывное барботирование газа, то для ограничения потери испытательного раствора может использоваться конденсатор на выпускном отверстии. Установлено, что такое решение полезно при температурах выше $50^\circ C$ ($120^\circ F$) и/или при объеме испытательного раствора менее 200 мл.

7.3.3 Для обеспечения безопасности обычно применяется разрывная мембрана или предохранительный клапан.

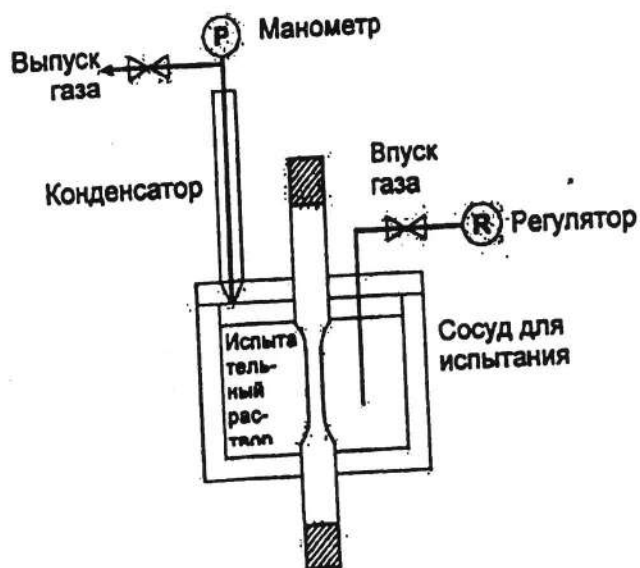


Рис. 1: Общая схема оборудования для испытания по Методу А – Стандартное испытание на растяжение по NACE

7.3.4 Точность прибора для измерения давления должна составлять $\pm 1\%$ максимального давления в системе. Если давление измеряют манометром, то максимальное давление в системе должно быть выше, чем 20%, и ниже, чем 80% полной шкалы манометра. Общие схемы оборудования для испытаний по различным методам показаны на рис. 1 и 2.

7.3.5 Если используются уплотнения из эластомеров, они должны обладать стойкостью к воздействию H_2S при используемой температуре, что должно быть подтверждено независимым измерением.

7.4 Испытательный раствор

Раствор, используемый при испытании, может быть выбран, исходя из требований технического задания на проведение испытания. Обычно испытательный раствор состоит из рассола (NaCl) при концентрациях вплоть до насыщения. Допускается буферное подкисление, аналогично методам, используемых для испытаний при комнатной температуре. Также, испытательный раствор может содержать элементарную серу^[8,9,10].

7.5 Испытательный газ

Испытательный газ обычно представляет собой смесь из двух или более следующих компонентов: H_2S , CO_2 и инертный газ, такой как N_2 или Ar. При низком парциальном давлении H_2S опыты в инертном газе без CO_2 требуют тщательной интерпретации из-за эффектов коррозионной растворимости изделия^[11]. Испытательную газовую смесь следует держать в стандартном газовом баллоне, оснащенном подходящим регулятором давления (обычно из нержавеющей стали), способным подавать газ на полное требуемое испытательное давление. Следует использовать промышленно выпускаемую газовую смесь с аналитически определенным составом.

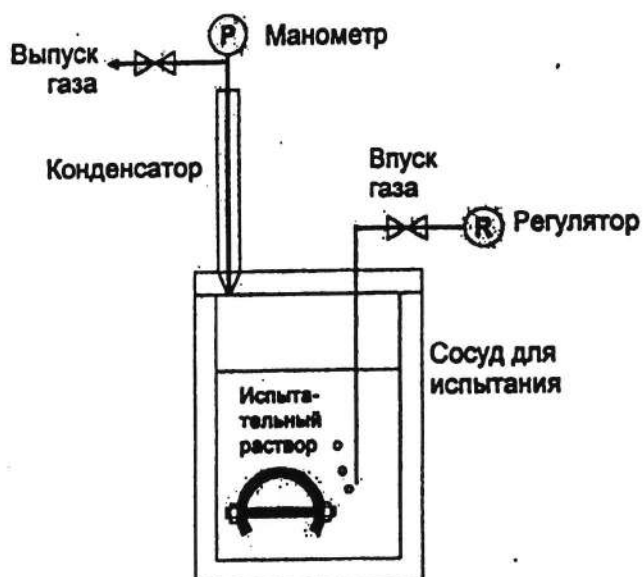


Рис. 2: Общая схема оборудования для испытания по Методу В – Стандартное испытание на изгиб балки по NACE; по Методу С – Стандартное испытание С-образного кольца по NACE; и по Методу D – Стандартное испытание двухконсольной балки по NACE

7.6 Процедура испытания

Процедуры испытания должны быть идентичны процедурам, установленным для испытаний при комнатной температуре, если не оговорены следующие исключения или изменения:

7.6.1 Испытательный раствор и образец (образцы) для испытания должны быть помещены в сосуд для испытания, затем этот сосуд должен быть герметично закрыт и проверен на герметичность. Сосуды для испытания обычно проверяются на герметичность (отсутствие утечек) инертным газом при 1,5-кратном максимальном испытательном давлении.

7.6.2 Объемное расширение испытательного раствора при нагревании может привести к заполнению сосуда и риску взрыва. Объем испытательного раствора не должен превышать 75% общей емкости сосуда. Кроме того, при температурах свыше 225°C (435°F) следует предусматривать больший коэффициент запаса надежности (т.е., использовать меньший процент от общей емкости сосуда).

7.6.3 Испытательный раствор должен быть деаэрирован струей инертного газа, барботируемого через впускную трубку в испытательный раствор, как минимум, в течение 1 часа на литр испытательного раствора.

7.6.4 Парциальное давление H_2S (p_{H_2S}) в испытательной среде должно определяться одним из следующих двух методов:

7.6.4.1 С предварительным нагревом сосуда до подачи испытательного газа

7.6.4.1.1 Сосуд для испытания нагревают при закрытых клапанах до температуры испытания, и стабилизируют температурный режим. Необходимо измерять давление в системе (давление паров испытательного раствора), P_1 .

7.6.4.1.2 Испытательный газ подается в сосуд до достижения испытательного давления P_T .

7.6.4.1.3 Парциальное давление H_2S (p_{H_2S}) в испытательной среде приблизительно задается уравнением (1):

$$p_{H_2S} = (P_T - P_1)X_{H_2S} \quad (1)$$

где:

P_T = полное абсолютное испытательное давление;

P_1 = давление паров над испытательным раствором; и

X_{H_2S} = мольная доля H_2S в испытательном газе.

7.6.4.2 С подачей испытательного газа до нагрева сосуда

Испытательный газ можно подавать в сосуд для испытания до нагрева, если могут быть продемонстрированы апробированные средства расчета p_{H_2S} .

7.6.5 По необходимости производится восполнение испытательного газа для поддержания требуемых условий испытания (главным образом, парциального давления H_2S), описанных в 7.2. Установлено, что при испытаниях коррозионно-стойких сплавов при абсолютном парциальном давлении H_2S ниже 2кПа (0,3 psia) или углеродистых и легированных сталей при абсолютном парциальном давлении H_2S ниже 100 кПа (14,5 psia) необходимо непрерывное барботирование испытательного газа с удельным расходом 0,5 – 1,0 мл/мин или периодическое восполнение испытательного газа один или два раза в неделю. Необходимо избегать потерь испытательного раствора и попадания кислорода в процессе восполнения испытательного газа.

7.6.6 Длительность испытания должна соответствовать применяемому методу (А, В, С, или D). Температура при испытаниях по Методам А, В и С должна поддерживаться в

пределах $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ($\pm 5^{\circ}\text{F}$) от заданной температуры испытания и фиксироваться вручную ежедневно или с большей частотой, с помощью устройства регистрации данных. При испытаниях по Методу D температура испытания должна поддерживаться в пределах $\pm 1,7^{\circ}\text{C}$ ($\pm 3,0^{\circ}\text{F}$). Давление необходимо контролировать и ежедневно регистрировать. Если давление при испытании падает более, чем на 40 кПа (6 psi) ниже требуемого испытательного давления, необходимо восполнить испытательный газ.

7.6.7 По завершении испытания, до открытия сосуда для испытания его следует продуть инертным газом, одновременно охлаждая его до окружающей температуры. При использовании оборудования с внешним нагружением нагрузка должна быть снята, по возможности, до охлаждения.

Раздел 8: Метод A – Стандартное испытание на растяжение по NACE

8.1 По Методу A, стандартному методу NACE для испытания на растяжение, оценивается стойкость металлов к растрескиванию под действием внешних факторов (ЕС) при одноосном приложении усилия растяжения. Используется простой гладкий образец с четко выраженным напряженным состоянием. Определение склонности к ЕС этим методом обычно основано на измерении времени до разрушения. Образцы, нагруженные до определенного уровня напряжений, либо разрушаются, либо не разрушаются за заданное время. При испытании ряда образцов при разных уровнях нагружения можно найти условный порог напряжений, при котором происходит ЕС^[12].

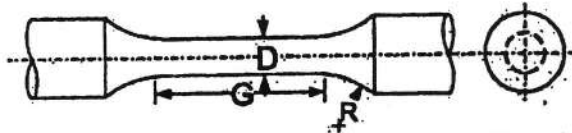
8.1.1 В данном разделе приведена процедура испытания при комнатной температуре и атмосферном давлении. Особые соображения по поводу испытаний при повышенных температуре и давлении см. в разделе 7.

8.2 Образец для испытаний

8.2.1 Выбор образцов часто ограничивается размерами и формой материала, подлежащего испытанию. Ориентация образца может повлиять на результат и должна быть отмечена.

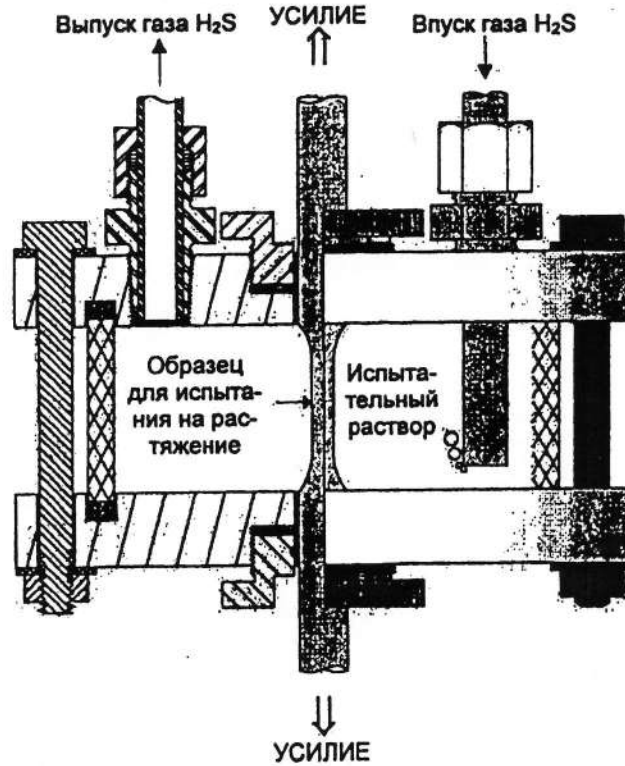
8.2.2 Диаметр расчетного участка образца [см. рис. 3(a)] должен составлять $6,35 \pm 0,13$ мм ($0,250 \pm 0,005$ дюйма), а длина – 25,4 мм (1,00 дюйм) (см. ASTM A 370). Допускаются образцы нестандартных размеров с расчетным участком диаметром $3,81 \pm 0,05$ мм ($0,150 \pm 0,002$ дюйма) и длиной 15 мм (0,60 дюйма). После механической обработки образцы для испытания на растяжение должны храниться в помещении с низкой влажностью, в эксикаторе или в ингибированном масле до момента испытания.

8.2.3 Радиус кривизны на концах расчетного участка должен быть не менее 15 мм (0,60 дюйма), чтобы свести к минимуму концентрации напряжений и разрушения по галтели.



Размер	Образец стандартного размера для испытания на растяжение	Образец уменьшенного размера для испытания на растяжение
D	6,35 ±0,13 мм (0,250 ±0,005 дюйма)	3,81 ±0,05 мм (0,150 ±0,002 дюйма)
G	25,4 мм (1,00 дюйма)	15 мм (0,60 дюйма)
R(мин.)	15 мм (0,60 дюйма)	15 мм (0,60 дюйма)

(а) Размеры образцов для испытания на растяжение



(б) Образец в камере искусственного климата

Рис. 3: Образцы для испытания на растяжение

8.2.3.1 Для уменьшения риска разрушения по галтели можно также:

- 1) устранить подрезку радиусов галтели при механической обработке образцов; и
- 2) обработать расчетный участок образца с небольшой конусностью [0,05–0,13 мм (0,002–0,005 дюйма)], что дает минимальное сечение в середине расчетного участка.

8.2.4 Концы образца должны быть достаточно длинными, чтобы можно было разместить на них уплотнения сосуда с раствором и закрепить образец в захватах машины [см. рис. 3(б)].

8.2.5 Механическая обработка или шлифование образца должны выполняться тщательно, во избежание перегрева или наклепа расчетного участка. Последние два прохода механической обработки следует выполнить с общим съемом материала не более 0,05 мм

(0,002 дюйма). Допускается также шлифование, если материал при этом не наклепывается.

8.2.6 Для всех материалов шероховатость поверхности образца должна быть не хуже 0,81 мкм (32 микродюймов). Чистовая отделка поверхности может выполняться путем механического полирования или электрополирования, если при этом выполняются требования к шероховатости. При использовании любого другого процесса чистовой отделки, кроме шлифования, необходимо зафиксировать это в результатах испытания. При электрополировании условия в ванне должны быть такими, чтобы образец не поглощал водород во время обработки.

8.2.7 Если размер или форма материала таковы, что нельзя изготовить стандартный образец, можно использовать уменьшенный образец. Однако образцы меньшего размера могут давать меньшее время до разрушения, чем стандартные образцы. При использовании образцов меньшего размера в протоколе испытания необходимо четко обозначить использование и указать размеры таких образцов.

8.2.8 Маркировка образцов

8.2.8.1 На торцах образца, но не на расчетном участке, допускается маркировка клеймением или виброгравировкой.

8.2.9 Очистка образцов

8.2.9.1 Перед испытанием образцы должны быть обезжирены растворителем и промыты ацетоном.

8.2.9.2 После очистки нельзя касаться расчетной длины образца или загрязнять ее.

8.3 Испытательный раствор (для Метода А) – см. раздел 6.

8.4 Испытательное оборудование

8.4.1 Для осуществления испытания по Методу А пригодны различные типы приспособлений для нагружения образцов и различные типы сосудов, используемых для испытаний на коррозию под напряжением. Поэтому ниже речь идет, в основном, о характеристиках оборудования, необходимых для правильного выбора приборов и методик.

8.4.2 Испытания на растяжение следует проводить с помощью устройств, создающих постоянную нагрузку или длительную нагрузку (пружинного типа или с кольцевым динамометром), см. ASTM G 49^[13].

8.4.2.1 Все нагрузочные устройства должны иметь калибровку, обеспечивающую точное нагружение образца. Погрешность нагружения в пределах диапазона калибровки нагрузочного устройства не должна превышать 1,0% от калибровочной нагрузки.

8.4.2.2 Нагрузочное устройство не должно вызывать скручивающих нагрузок.

8.4.3 При испытании материалов, склонных к данному виду разрушения, с применением длительной нагрузки, трещины могут зарождаться и распространяться только на часть сечения образца (см. 8.7). Следовательно, определение склонности к данному виду разрушения по результатам опыта при длительной нагрузке требует визуального осмотра образцов на наличие сквозных трещин. Такое определение может быть затруднительным, если трещины малы и редки, или если они плохо видны из-за коррозионных отложений. Однако испытание с устройствами постоянной нагрузки гарантирует, что материалы, склонные к данному виду разрушения, будут полностью разрушаться, что однозначно указывает на склонность материала и исключает возможность пропуска сквозных трещин при визуальном осмотре образцов.

8.4.4 Для создания постоянной нагрузки могут использоваться грузовые устройства, оказывающие постоянное давление на гидравлический элемент (см. рис. 4).

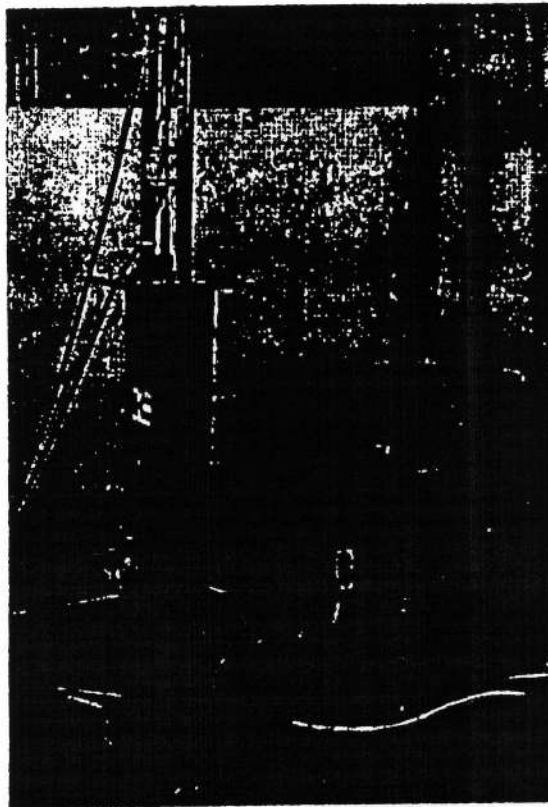


Рис. 4: Устройство для создания постоянной нагрузки при помощи грузов

8.4.5 Длительная нагрузка может создаваться с помощью пружинных устройств и кольцевых динамометров, в которых релаксация самого устройства или образца приводит лишь к незначительному процентному уменьшению приложенной нагрузки (см. рис. 5).

8.4.5.1 При использовании кольцевых динамометров необходимо:

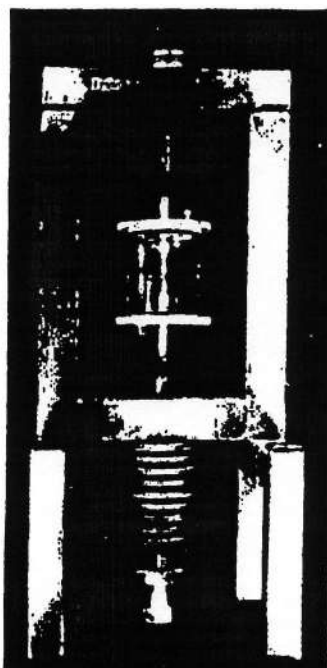
8.4.5.1.1 Перед калибровкой подготовить кольцевой динамометр путем растяжения его не менее 10 раз до 110% от наибольшей рабочей нагрузки.

8.4.5.1.2 Согласовать нагрузку на образец с нагрузочным интервалом кольцевого динамометра. Соответственно, кольца следует подобрать таким образом, чтобы приложенная нагрузка вызвала деформацию кольца, превышающую 0,6% его

диаметра, но не менее 0,51 мм (0,020 дюйма). Если деформация меньше 0,51 мм (0,020 дюйма) или 0,6% от диаметра кольца, необходимо задать калибровочную деформацию, калибровочную нагрузку и испытательную нагрузку.



(а) При помощи кольцевого динамометра



(b) При помощи пружины

Рис. 5: Устройства для создания длительной нагрузки

8.4.5.2 Значительное уменьшение деформации кольца может означать:

- (а) зарождение и распространение трещин в образце;
- (b) текучесть образца; или
- (с) релаксацию напряжений.

Необходимо предусмотреть измерение деформации кольца во время и в конце испытания.

8.4.5.3 Рекомендуется наблюдать за деформацией кольца, когда приложенная нагрузка составляет до 10% от предела текучести материала.

8.4.6 Образец должен быть электрически изолирован от других металлических деталей, находящихся в контакте с раствором.

8.4.6.1 Уплотнения образца должны быть электроизолирующими и герметичными, но должны допускать его движение при незначительном трении.

8.4.6.2 Если испытательное устройство может быть целиком погружено в раствор, нагрузочное устройство может быть изготовлено из того же материала, что и образец, или, если оно изготовлено из иного материала, оно должно быть электрически изолировано от образца. При желании, нагрузочное устройство может быть снабжено непроницаемым непроводящим покрытием.

8.4.7 Емкость сосуда для испытания должна быть достаточной для того, чтобы объем раствора составлял 30 ± 10 мл на 1 см^2 площади поверхности образца.

8.5 Расчет напряжений

8.5.1 Значения нагрузки на образец для испытания на растяжение определяют по уравнению (2):

$$P = S \times A \quad (2)$$

где:

P – нагрузка;

S – приложенное напряжение;

A – фактическая площадь поперечного сечения расчетного участка.

8.6 Порядок испытания

8.6.1 Измерьте минимальный диаметр расчетной части образца и вычислите нагрузку, необходимую для создания требуемого уровня напряжений.

8.6.2 Очистите образец, поместите его в сосуд и герметично закройте сосуд во избежание попадания в него воздуха во время испытания.

8.6.3 Нагрузка может быть приложена до или после продувки сосуда инертным газом.

8.6.3.1 Нагрузка на образец может прикладываться ступенчато, долями от предела текучести или конечной нагрузки.

8.6.4 Нагрузку прикладывайте осторожно, не допуская превышения требуемого значения. Если оно будет превышено, нагружение необходимо начать снова, или забраковать образец.

8.6.5 Сосуд сразу же наполняют испытательным раствором так, чтобы расчетный участок образца был полностью погружен в раствор. Чтобы гарантировать отсутствие кислорода в испытательном растворе до подачи H_2S , испытательный раствор должен быть полностью деаэрирован одним из приведенных ниже методов (см. Приложение В):

- (a) Испытательный раствор можно деаэрировать в сосуде для испытания путем продувки инертным газом при расходе не менее 100 мл/мин в течение, как минимум, 1 часа.
- (b) Испытательный раствор можно заранее деаэрировать в герметичной емкости путем продувки инертным газом при расходе не менее 100 мл/мин в течение, как минимум, 1 часа на литр раствора. После этого заранее деаэрированный раствор заливают в сосуд для испытания и дополнительно продувают инертным газом в течение не менее 20 минут после укупоривания сосуда.
- (c) Допускается применение иных методов деаэрации и заливки раствора, если в результате они дают полностью деаэрированный раствор до подачи H_2S .

8.6.6 Затем раствор насыщают H_2S при расходе не менее 100 мл/мин в течение, как минимум, 20 минут на 1 литр раствора. Поток H_2S в сосуде и в выпускном патрубке должен быть непрерывным в течение всего испытания при низком расходе (по несколько пузырьков в минуту). Благодаря этому поддерживается концентрация и небольшое избыточное давление H_2S и исключается попадание в сосуд воздуха через мелкие неплотности.

8.6.6.1 Загрязнение кислородом проявляется тем, что испытательный раствор становится дымчатым (непрозрачным) при поступлении H_2S в сосуд для испытания. Непрозрачность раствора при поступлении H_2S делает испытание недействительным. Образец необходимо изъять и очистить, а процедуру приготовления, переноса и деаэрации раствора – повторить.

8.6.7 Испытание прекращается при разрушении образца или через 720 часов (что наступит раньше).

8.6.8 Для более точного определения напряжения, не вызывающего разрушения, могут быть испытаны дополнительные образцы.

8.7 Выявление разрушения

После испытательного воздействия поверхности расчетного участка не разрушившегося образца должны быть очищены и осмотрены на наличие трещин. Образцы с трещинами необходимо отметить.

8.7.1 Для всех материалов, разрушением является:

- (a) Полное разделение частей образца; или
- (b) Наличие трещин на расчетном участке образца, видимых при 10-кратном увеличении после 720-часового испытания. Чтобы определить, являются ли трещины на расчетном участке образца свидетельством ЕС, могут применяться методики исследования с применением металлографии, растровой микроскопии или механических испытаний. Если подтвердилось, что причиной возникновения трещин не является ЕС, то образец выдержал испытание.

8.7.2 Время до разрушения можно регистрировать при помощи электрических таймеров и микропереключателей.

8.8 Оформление результатов испытания

8.8.1 При каждом уровне напряжений регистрируют время до разрушения, или отсутствие разрушения, или наличие трещин в конце испытания.

8.8.2 Необходимо также регистрировать химический состав, термообработку, механические свойства образца, прочую оговоренную выше информацию, и другие данные, полученные при испытании.

8.8.3 В табл. 1 приведена рекомендуемая форма протокола. Возможно также представление данных на полупологарифмической бумаге (см. рис. 6).

Раздел 9: Метод В – Стандартное испытание балки на изгиб по NACE

9.1 Метод В – стандартное испытание балки на изгиб по NACE – предназначен для испытания углеродистых и низколегированных сталей, подвергаемых растяжению, для оценки их сопротивления растрескиванию в водных H_2S -содержащих средах с низким значением pH. Позволяет оценить склонность материала к ЕС при наличии концентрации напряжений. Компактный размер образца облегчает испытание малых, локализованных участков и тонкого материала. Нагружение образцов до определенного прогиба позволяет получить результат в виде разрушения или его отсутствия. Испытывая серию образцов с разной величиной прогиба, можно получить статистический коэффициент критического напряжения (S_c) при 50-процентной вероятности разрушения. В этом методе NaCl не добавляется в испытательный раствор. Установлена корреляция результатов лабораторных испытаний углеродистых и низколегированных сталей и данных эксплуатации^[14].

9.1.1 В данном разделе приведена процедура испытания балки на изгиб при комнатной температуре и атмосферном давлении. Особые соображения по поводу испытаний при повышенных температуре и давлении см. в разделе 7.

**Таблица 1 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 1):
Испытание по стандарту NACE TM0177^(A)
Метод А – Испытание на растяжение по NACE**

Компания-заказчик _____ Дата поступления заказа _____
 Представитель _____ Телефон _____ Лаборатория _____
 Наименование сплава _____ Тип материала _____

Химический состав	Номер плавки/Маркировка				
C					
Mn					
Si					
P					
S					
Ni					
Cr					
Mo					
V					
Al					
Ti					
Nb					
N					
Cu					
Прочие					
Сведения о выплавке и обработке материала (напр., OH, BOF, EF, AOD) ^(B)					
Форма изделия					
Термообработка (время, температура и режим охлаждения в каждом цикле процесса)					
Другие виды механической, термической, химической обработки или нанесения покрытий ^(C)					

^(A) Если метод испытания не соответствует TM0177, он должен быть подробно описан.

^(B) Метод выплавки: мартеновский (OH), кислородно-конвертерный (BOF), в электропечи (EF), аргоно-кислородное обезуглероживание (AOD).

^(C) Например: холодное упрочнение, плакирование, азотирование, предварительное деформирование.

**Таблица 1 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 2):
Испытание по стандарту NACE TM0177
Метод А – Испытание на растяжение по NACE**

Результаты лабораторного испытания материала _____ согласно NACE TM0177^(A)

Геометрия образца: Стандартная Нестандартная - Номинальный диаметр _____ Расчетная длина _____
 Постоянная нагрузка – От груза Гидравлическая Иная _____
 Длительная нагрузка – Кольцо Пружина Иная _____
 Деформация кольца после испытания

Химический состав: Испытательный раствор А Испытательный раствор В
 Испытательный раствор С (охарактеризовать) _____
 Другой испытательный раствор _____
 Выпускная ловушка для кислорода Температурный режим 24±3°C (75±5°F)
 Температурный режим _____ ±3°C (±5°F)

Обозначение материала	Свойства образцов						Испытательное напряжение (% от предела текучести)						рН раствора ^(E)		Термическая обработка	Примечания (состояние поверхности и уровень H ₂ S)		
	Положение ^(B)	Ориентация ^(C)	Предел текучести ^(D) ()	Предел прочности на растяжение	Относительное удлинение, %	Сужение, %	Твердость ()	1	2	3	4	5	6	7			Начало	Окончание

- (A) Если метод испытаний не соответствует стандарту NACE TM0177, он должен быть подробно описан.
- (B) Положение образца может быть: для трубных изделий: на наружной поверхности (OD), в середине толщины стенки (MW) или на внутренней поверхности (ID); для сплошных изделий: на поверхности (S), на четверти толщины (QT), на середине радиуса (MR), в центре (C), по кромке (E).
- (C) Ориентация может быть: продольная (L) или поперечная (T).
- (D) В скобках указывать значения в метрических или в британских единицах, в зависимости от представления результатов испытания. Если не оговорено иное, предел текучести принимается при 0,2% остаточной деформации.
- (E) Укажите рН для испытания, при котором образец выдержал максимальное напряжение.

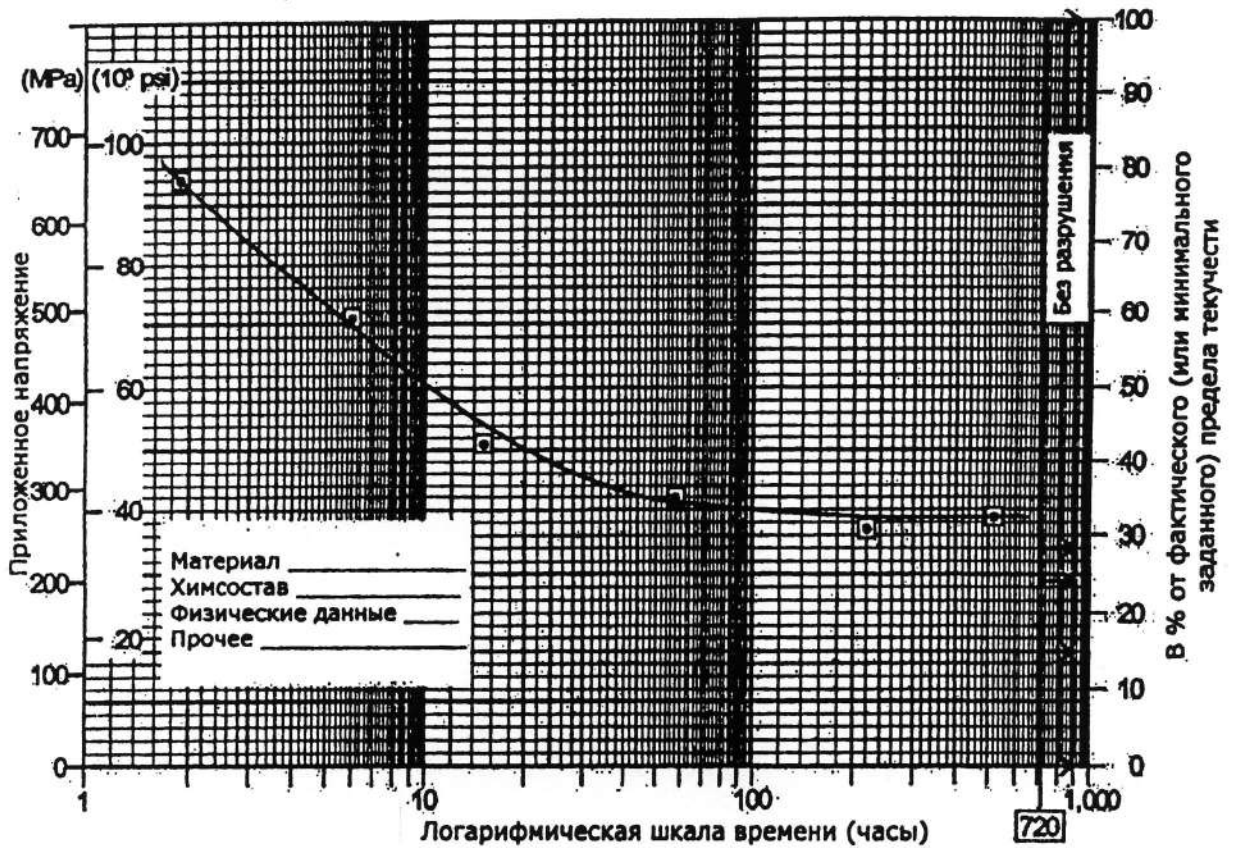


Рис. 6: Кривая "напряжение – логарифм времени до разрушения"

9.1.2 Сущность Метода В

9.1.2.1 Каждый из серии образцов подвергают изгибу путем приложения различной изгибающей нагрузки. Напряженные образцы подвергают воздействию испытательной среды и определяют, возникло ли разрушение в виде растрескивания. По данным испытаний серии образцов при различных значениях прогиба находят статистическое значение S_c с 50-процентной вероятностью разрушения, которое служит мерой сопротивления материала SSC.

9.1.2.2 Метод представляет собой испытание образцов с высокой податливостью при постоянном прогибе. Расчетное напряжение называют псевдонапряжением, так как оно не отражает:

- (a) фактическое напряжение и распределения напряжений в образце;
- (b) отклонение от упругости, связанное с пластической деформацией; или
- (c) снижение напряжений в образце по мере распространения в нем трещины или трещин.

Поэтому метод непригоден для определения порогового напряжения.

9.2. Образец для испытания

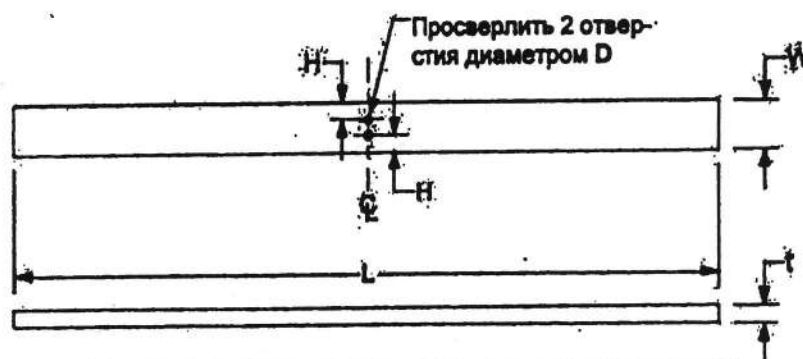
9.2.1 Размеры стандартного образца – балки для испытания на изгиб: ширина $4,57 \pm 0,13$ мм ($0,180 \pm 0,0050$ дюйма), толщина $1,52 \pm 0,13$ мм ($0,060 \pm 0,0050$ дюйма), длина $67,3 \pm 1,3$ мм ($2,65 \pm 0,050$ дюйма) (см. рис. 7). После механической обработки образцы должны храниться в помещении с низкой влажностью, в эксикаторе или в неингибированном масле до момента испытания.

9.2.2 Как правило, для определения склонности материала к рассматриваемому виду разрушения используют от 12 до 16 образцов.

9.2.2.1 Ориентация и положение образца в материале должны быть указаны в протоколе испытания.

9.2.3 Образцы фрезеруют до черного размера и доводят до конечных размеров шлифованием. За каждый из последних двух проходов снимают не более $0,013$ мм ($0,00050$ дюйма) материала на сторону, не допуская перегрева. Шероховатость поверхности должна быть не хуже $0,81$ мкм (32 микродюйма).

9.2.4 Как показано на рис. 7, в середине образца, на расстоянии $1,58$ мм ($0,0620$ дюйма) от каждого бокового края, сверлят два отверстия диаметром $0,71$ мм ($0,028$ дюйма) (сверло № 70). Отверстия сверлят до чистовой обработки поверхности.



Размер	Значение	
	(мм)	(дюймы)
L	$67,3 \pm 1,3$	$2,65 \pm 0,050$
t	$1,52 \pm 0,13$	$0,060 \pm 0,0050$
W	$4,57 \pm 0,13$	$0,180 \pm 0,0050$
H	$1,58 \pm 0,05$	$0,062 \pm 0,002$
D	$0,71 \pm 0,01$	$0,028 \pm 0,0005$ (Сверло № 70)

Рис. 7: Масштабный чертеж стандартного образца в виде балки для испытания на изгиб

9.2.5 Маркировка образца

9.2.5.1 Образцы можно маркировать клейменем или виброгравировкой на расстоянии не более 13 мм ($0,5$ дюйма) от любого конца на сжатой стороне.

9.2.6 Очистка образцов

9.2.6.1 Поверхности и кромки образцов зачищают вручную шкуркой № 240 с расположением следов параллельно оси образца.

9.2.6.2 Образцы обезжиривают растворителем и промывают ацетоном.

9.2.6.3 После очистки нельзя касаться руками напряженной части образца и загрязнять ее.

9.3 Испытательный раствор

9.3.1 Испытательный раствор содержит 0,5 масс-% кристаллической уксусной кислоты в дистиллированной или деионизированной воде (например, 5,0 г CH_3COOH растворяют в 995 г дистиллированной или деионизированной воды). NaCl в раствор не добавляют.

9.3.2 Применение испытательных растворов А, В и С в данном методе испытания не стандартизовано.

9.4 Испытательное оборудование

9.4.1 Для осуществления испытания по Методу В пригодны различные типы приспособлений для нагружения образцов и различные типы сосудов, используемых для испытаний на коррозию под напряжением. Поэтому ниже речь идет, в основном, о характеристиках оборудования, необходимых для правильного выбора приборов и методик.

9.4.2 Испытание осуществляется с помощью устройств, обеспечивающих постоянный прогиб при трехточечном изгибе образца (см. рис. 8).

9.4.3 Испытательное устройство, полностью погружаемое в раствор, должно быть изготовлено из материала, стойкого к общей коррозии (обычно используется материал UNS⁽⁴⁾ S31600). Элементы устройства, соприкасающиеся с образцом, должны быть электрически изолированы от него.

9.4.4 Прогибомеры должны быть градуированы делениями по 0,0025 мм (0,00010 дюйма).

9.4.4.1 Прогиб образца определяется отдельными приборами (прогибомерами) или приборами, встроенными в нагрузочное устройство. При конструировании прогибомера для конкретных целей следует предусмотреть, чтобы прогиб измерялся в середине образца.

9.4.5 Сосуд для испытаний

9.4.5.1 Сосуд для испытательного раствора должен иметь емкость, достаточную для размещения 30 ± 10 мл раствора на 1 см^2 площади поверхности образца. Рекомендуется максимальный объем – 10 л.

⁽⁴⁾ Единая система нумерации металлов и сплавов (последнее издание), совместная публикация ASTM International и Общества инженеров-автомобилистов (SAE), 400 Commonwealth Dr., Warrendale, PA 15096.

9.4.5.2. Сосуд должен иметь клапаны на входе и выходе во избежание загрязнения раствора кислородом.

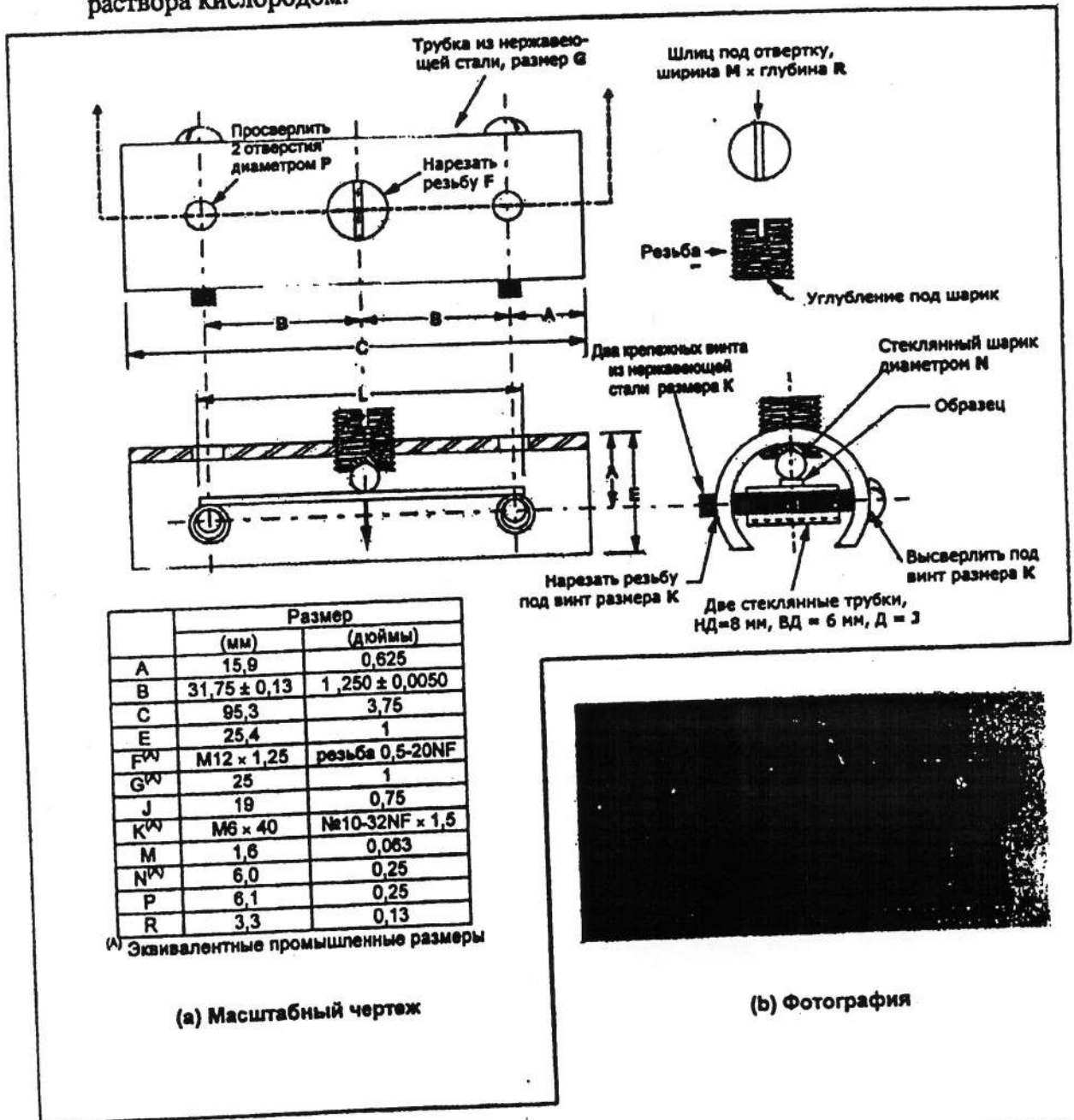


Рис. 8: Типовое устройство для нагружения образца для испытания на изгиб

9.4.5.3 Для подачи инертного газа и H₂S ниже расположения образцов необходим барботер из спеченного стекла. Пузырьки не должны попадать на образцы.

9.5 Расчет прогиба

9.5.1 При вычислении прогиба балки используют расчетное псевдонапряжение в наружных волокнах (S) испытуемого материала. Для углеродистых и низколегированных сталей с твердостью 22–24 HRC значение S обычно находится в районе 69 МПа (10⁴ psi). С ростом твердости S обычно уменьшается.

9.5.2 Выбранный интервал расчетных значений S используется, как псевдонапряжения для расчета прогиба образцов.

9.5.3 Прогиб образца при каждом значении псевдонапряжения вычисляется по уравнению (3):

$$D = \frac{Sl^2}{6Et} \quad (3)$$

где:

D – прогиб;

S – псевдонапряжение;

l – пролет балки;

t – толщина образца;

E – модуль упругости.

Формула предполагает упругий изгиб и не учитывает концентрацию напряжений от отверстий, а также пластичность образца при больших напряжениях.

9.6 Порядок испытания

9.6.1 Измерьте размеры образца и вычислите прогибы, обеспечивающие требуемый уровень псевдонапряжений.

9.6.2 Нагрузите образцы в держателях, прогибая их с точностью до 0,0025 мм (0,00010 дюйма) по циферблатному индикатору.

9.6.2.1 Прикладывайте нагрузку осторожно, не допуская ее превышения. В случае превышения заданного прогиба, ведите испытание при увеличенном прогибе, или забракуйте его.

9.6.3 Очистите нагруженные образцы и поместите их в сосуд.

9.6.4 Сосуд сразу же наполняют испытательным раствором и герметично укупоривают. Чтобы гарантировать отсутствие кислорода в испытательном растворе до подачи H_2S , испытательный раствор должен быть полностью деаэрирован одним из приведенных ниже методов (см. Приложение В):

- (a) Испытательный раствор можно деаэрировать в сосуде для испытания путем продувки инертным газом при расходе не менее 100 мл/мин в течение, как минимум, 1 часа.
- (b) Испытательный раствор можно заранее деаэрировать в герметичной емкости путем продувки инертным газом при расходе не менее 100 мл/мин в течение, как минимум, 1 часа на литр раствора. После этого заранее деаэрированный раствор заливают в сосуд для испытания и дополнительно продувают инертным газом в течение не менее 20 минут после укупоривания сосуда.
- (c) Допускается применение иных методов деаэрации и заливки раствора, если в результате они дают полностью деаэрированный раствор до подачи H_2S .

9.6.5 Затем раствор насыщают H_2S при расходе не менее 100 мл/мин в течение, как минимум, 20 минут на 1 литр раствора. H_2S в сосуде периодически восполняют путем барботирования H_2S в течение 20-30 минут при расходе не менее 100 мл/мин на литр испытательного раствора. Периодичность этой процедуры – 3 раза в неделю на протяжении испытания. Восполнение производится в первый, третий и пятый дни каждой недели.

9.6.5.1 Загрязнение кислородом проявляется тем, что испытательный раствор становится дымчатым (непрозрачным) при поступлении H_2S в сосуд для испытания. Непрозрачность раствора при поступлении H_2S делает испытание недействительным. Образец необходимо изъять и очистить, а процедуру приготовления, переноса и деаэрации раствора – повторить.

9.6.6 Испытание прекращается через 720 часов или при разрушении всех образцов (что наступит раньше).

9.6.7 Для более точного определения S_c могут быть испытаны дополнительные образцы и проведены повторные испытания.

9.8 Выявление разрушения

9.8.1 Наличие трещины определяют осмотром с помощью маломощного бинокулярного микроскопа. Если в образце имеется только одна или несколько трещин, его форма может сильно измениться, главным образом, из-за разветвления трещин, что помогает выявить треснутые образцы. Однако при наличии многих трещин изменение формы может оказаться малозаметным. Наличие объемных продуктов коррозии может заслонить трещины, что заставляет прибегать к тщательному исследованию. В подобных случаях может потребоваться механическая очистка или изготовление из образца металлографических шлифов.

9.8.2 Под разрушением понимается наличие трещин в образце. Поэтому после испытания следует очистить поверхность образцов, согнуть их вручную на 20° и осмотреть на наличие трещин при 10-кратном увеличении. Образцы с трещинами считаются разрушенными.

9.9 Оформление результатов испытаний

9.9.1 В протокол включают сведения о наличии или отсутствии разрушения и об уровне псевдонапряжений (S). Время до разрушения является необязательным показателем.

9.9.2 Критическое напряжение S_c вычисляют по уравнению (4), если S выражено в МПа, или по уравнению (5), если S выражено в psi.

$$S_c = \frac{\sum S}{n} + 2 \frac{\sum T}{n} \quad (4)$$

где:

S – номинальное псевдонапряжение в наружном волокне (в МПа), использованное при расчете прогиба балки;

T – результат испытания (без разрушения: +1, с разрушением: -1);

n – общее количество испытанных образцов.

При использовании уравнения (4) все значения псевдонапряжений, которые отличаются более чем на ± 210 МПа от исходного значения $S_c \times 68,95$ МПа, отбрасываются, и пересчитывается новое значение S_c . Пересчитанное значение устраняет систематическую ошибку в данных сверху и снизу.

$$S_c = \frac{\sum S}{10^4 \text{ psi}} + \frac{2 \sum T}{n} \quad (5)$$

где:

S – номинальное псевдонапряжение в наружном волокне (в psi), использованное при расчете прогиба балки;

T – результат испытания (без разрушения: +1, с разрушением: -1);

n – общее количество испытанных образцов.

При использовании уравнения (5) все значения псевдонапряжений, которые отличаются более чем на $\pm 3,0 \times 10^4$ psi от исходного значения $S_c \times 10^4$ psi, отбрасываются, и пересчитывается новое значение S_c . Пересчитанное значение устраняет систематическую ошибку в данных сверху и снизу.

9.9.3 В протоколе испытания необходимо зафиксировать вычисленные значения S_c для каждого материала. Если производился пересчет S_c , то указывают пересчитанное значение S_c , а не исходное.

9.9.4 В протокол необходимо включить сведения о химическом составе, термообработке, механических свойствах и т.п. данные.

9.9.5 В табл. 2 приведена рекомендуемая форма протокола испытания.

Раздел 10: Метод С – Стандартный метод испытания С-образного кольца по NACE

10.1 Метод С, стандартный метод испытания С-образного кольца по NACE, обеспечивает оценку стойкости металлов к растрескиванию по действием внешних факторов (ЕС) в условиях нагружения по окружности (напряжения в ободу). Он особенно пригоден для испытания поперечных образцов труб и прутков. Склонность материала к ЕС путем испытания С-образного кольца обычно определяется по времени до растрескивания в процессе испытания. С-образные образцы нагружают до определенного уровня напряжений в наружных волокнах, и получают результат в виде наличия или отсутствия разрушения. При испытании серии образцов с разным уровнем напряжений можно получить кажущийся пороговый уровень напряжений, при котором начинается ЕС.

10.1.1 В данном разделе приведена процедура испытания С-образного кольца при комнатной температуре и атмосферном давлении. Особые соображения по поводу испытаний при повышенных температуре и давлении см. в разделе 7.

**Таблица 2 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 1):
Испытание по стандарту NACE TM0177^(A)
Метод В – Стандартное испытание балки на изгиб по NACE**

Компания-заказчик _____ Дата поступления заказа _____
 Представитель _____ Телефон _____ Лаборатория _____
 Наименование сплава _____ Тип материала _____

Химический состав	Номер плавки/Маркировка				
C					
Mn					
Si					
P					
S					
Ni					
Cr					
Mo					
V					
Al					
Ti					
Nb					
N					
Cu					
Прочие					
Сведения о выплавке и обработке материала (напр., OH, BOF, EF, AOD) ^(B)					
Форма изделия					
Термообработка (время, температура и режим охлаждения в каждом цикле процесса)					
Другие виды механической, термической, химической обработки или нанесение покрытий ^(C)					

^(A) Если метод испытания не соответствует TM0177, он должен быть подробно описан.

^(B) Метод выплавки: мартеновский (OH), кислородно-конвертерный (BOF), в электропечи (EF), аргоно-кислородное обезуглероживание (AOD).

^(C) Например: холодное упрочнение, плакирование, азотирование, предварительное деформирование.

**Таблица 2 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 2)
Испытание по стандарту NACE TM0177
Метод В – Стандартное испытание балки на изгиб по NACE**

Результаты лабораторного испытания материала _____ согласно NACE TM0177^(A)
 Геометрия образца: Стандартная Нестандартная - Номинальный диаметр _____ Длина _____
 Применен метод статистического S_e _____
 Химический состав: 0,5 масс-% кристалл. уксусной кислоты в дистиллированной или деионизированной воде
 Другой испытательный раствор _____
 Выпускная ловушка для кислорода Температурный режим $24 \pm 3^\circ\text{C}$ ($75 \pm 5^\circ\text{F}$)
 Температурный режим _____ $\pm 3^\circ\text{C}$ ($\pm 5^\circ\text{F}$)

Обозначение материала	Свойства образцов						Значение псевдонапряжения (S) ()						Значение S_e	pH раствора ^(E)		Термическая обработка	Примечания (состояние поверхности и уровень H ₂ S)	
	Положение ^(B)	Ориентация ^(C)	Предел текучести ^(D) ()	Предел прочности на растяжение	Относительное удлинение, %	Сужение, %	Твердость ()	Время до разрушения (часы)						Начало	Окончание			
								NF – без разрушения за 720 часов										

- (A) Если метод испытаний не соответствует стандарту NACE TM0177, он должен быть подробно описан.
- (B) Положение образца может быть: для трубных изделий: на наружной поверхности (OD), в середине толщины стенки (MW) или на внутренней поверхности (ID); для сплошных изделий: на поверхности (S), на четверти толщины (QT), на середине радиуса (MR), в центре (C), по кромке (E).
- (C) Ориентация может быть: продольная (L) или поперечная (T).
- (D) В скобках указывать значения в метрических или в британских единицах, в зависимости от представления результатов испытания. Если не оговорено иное, предел текучести принимается при 0,2% остаточной деформации.
- (E) Укажите pH для испытания, при котором образец выдержал максимальное напряжение.

10.2 Образец для испытания

10.2.1 Согласно стандарту ASTM G 38^[15] должен применяться С-образный образец без надреза. Размеры С-образных образцов могут меняться в широких пределах, однако образцы с наружным диаметром менее 15,9 мм (0,625 дюйма) не рекомендуются к применению из-за трудности механической обработки и пониженной точности нагружения. Типовой С-образный образец приведен на рис. 9.

10.2.2 По ширине образца окружные напряжения могут меняться в зависимости от отношения ширины к толщине (w/t) и диаметра к толщине (d/t) С-образного кольца. Отношение w/t должно находиться в пределах от 2 до 10, а d/t – от 10 до 100.

10.2.3 Нагрузочное приспособление должно быть изготовлено из того же материала, что и С-образный образец, или приспособление должно быть электрически изолировано от образца во избежание гальванических эффектов, если такие эффекты нежелательны.

10.2.4 Механическую обработку следует производить поэтапно: за два последних прохода должно быть удалено не более 0,05 мм (0,002 дюйма) материала с получением в итоге шероховатости не хуже 0,81 мкм (32 микродюймов). После механической обработки образцы должны храниться в эксикаторе или в ингибированном масле до момента испытания.

10.2.4.1 Для коррозионных испытаний обычно используются образцы с хорошо обработанной поверхностью. Однако при помощи С-образных образцов оценивают также поверхность труб и прутков в исходном состоянии. Применение иного процесса чистовой отделки, нежели механическая обработка, должно быть отмечено в протоколе испытаний.

10.2.5 Маркировка образца

10.2.5.1 На концевых сегментах С-образного кольца допускается маркировка клеем или виброгравировкой.

10.2.6 Очистка образца

10.2.6.1 Перед испытанием образцы обезжиривают растворителем и промывают в ацетоне.

10.2.6.2 После промывки не следует касаться руками или загрязнять рабочую часть образца.

10.3 Испытательный раствор – Раствор для испытания по методу С см. в разделе 6.

10.4 Испытательное оборудование

10.4.1. Оборудование для нагружения С-образных образцов должно включать инструмент для измерения образца с точностью до 0,025 мм (0,0010 дюйма), ключи для затяжки болтов и зажимное устройство.

10.4.1.1. С-образные образцы зажимают болтами за концы кольца. В центральной части зажим не допускается.

10.4.2 Образец должен быть оперт таким образом, чтобы с нагруженной частью соприкасался только испытательный раствор.

10.4.2.1 Опорное устройство должно быть выполнено из материала, совместимого с испытательным раствором.

10.4.2.2 Необходимо избегать гальванических эффектов между С-образными образцами, опорным устройством и сосудом. Например, для электрической изоляции С-образного образца от опор можно использовать изолирующую втулку или шайбу.

10.4.3 Сосуд для испытания

10.4.3.1 Сосуд должен иметь емкость, достаточную для размещения 30 ± 10 мл раствора на 1 см^2 поверхности образца.

10.4.3.2 Для подвода инертного газа и H_2S ниже образцов следует использовать барботер из спеченного стекла. Следите, чтобы пузырьки газа не попадали на С-образные образцы.

10.5 Расчет прогиба

10.5.1. Прогиб, необходимый для получения желаемого напряжения в С-образном образце, рассчитывается по уравнению (6):

$$D = \frac{pd(d-t)S}{4tE} \quad (6)$$

где:

D – прогиб С-образного образца по отверстиям под болты;

d – наружный диаметр С-образного образца;

t – толщина С-образного образца;

S – желаемое напряжение в наружных волокнах;

E – модуль упругости.

10.5.1.1 Прогиб, рассчитанный по уравнению (6), не должен вызывать напряжений, превышающих предел упругости материала. Для многих коррозионно-стойких сплавов предел упругости находится заметно ниже предела текучести при 0,2% остаточной деформации. Значения прогиба, выходящие за предел упругости, могут быть найдены по кривой напряжение-деформация материала и по характеристикам напряжение-прогиб конкретного С-образного образца.

10.5.1.2 Уравнение (6) может быть использовано для расчета прогиба, необходимого для нагружения образца до полного 0,2% предела текучести (S_Y). Для этого в исходном уравнении необходимо заменить S на $S_Y + E(0,002)$. Данное соотношение действительно не для всех сплавов, его следует предварительно проверять до использования для иных материалов, нежели углеродистые и низколегированные стали.

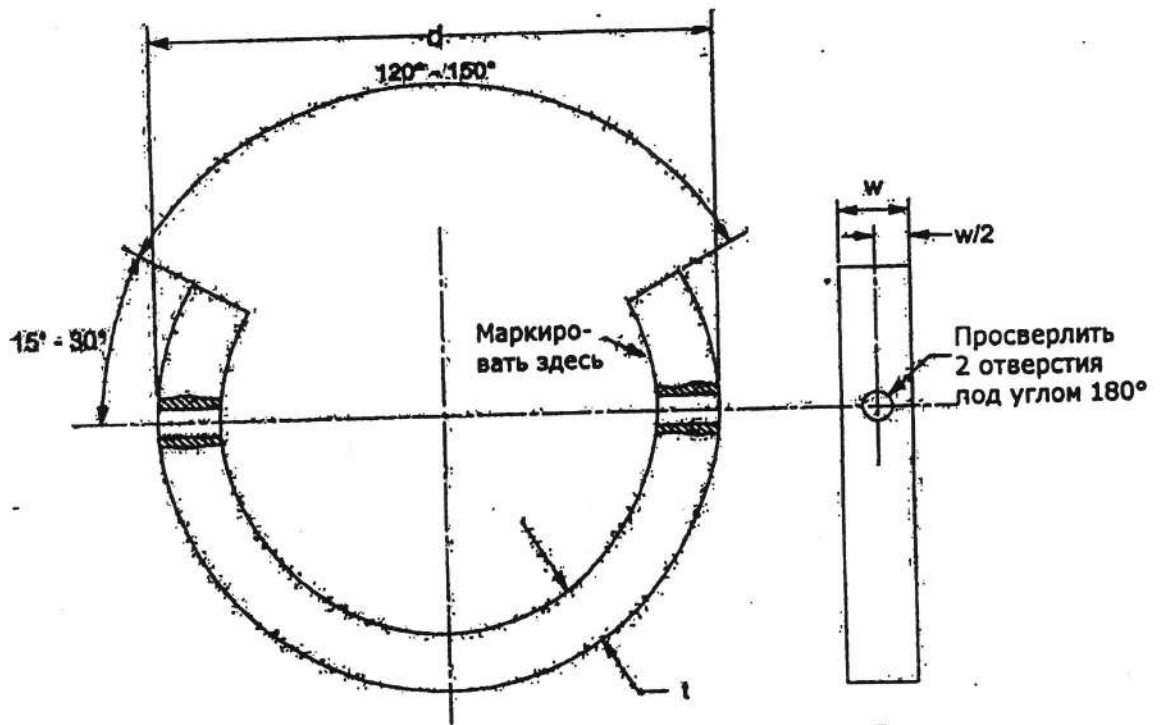


Рис. 9: Масштабный чертеж С-образного образца

10.5.1.3 Не существует уравнения для расчета прогиба, необходимого для нагружения С-образного образца до значений, лежащих в интервале между пределом упругости материала и его 0,2% предела текучести.

10.5.2 Прогиб можно найти непосредственно при помощи электрических тензOMETрических датчиков, наклеенных на С-образный образец.

10.5.2.1 Каждый С-образный образец должен быть откалиброван в точке, расположенной на наружном диаметре под углом 90° к оси стяжного болта. Болт затягивают до требуемой деформации путем наблюдения за выходом тензодатчика. При достижении требуемой деформации удаляют датчик и остатки клея. После этого С-образный образец зачищают с использованием процедуры, описанной в 10.2.6.

10.6 Порядок испытания

10.6.1 Измерьте размеры С-образных образцов и вычислите соответствующие значения прогиба.

10.6.2 Нагрузите С-образные образцы, затягивая стяжные болты до требуемого прогиба с точностью 0,025 мм (0,0010 дюйма).

10.6.2.1 Прогиб тщательно, с соблюдением согласованности точек замеров, измеряют по оси стяжного болта на наружном диаметре, внутреннем диаметре или посередине толщины стенки. В случае превышения заданного прогиба, ведите испытание при увеличенном прогибе, или забракуйте его.

10.6.3 Очистите С-образные образцы и поместите их в сосуд для испытания.

10.6.4 Сосуд сразу же наполняют испытательным раствором и герметично укупоривают. Чтобы гарантировать отсутствие кислорода в испытательном растворе до подачи H_2S , испытательный раствор должен быть полностью деаэрирован одним из приведенных ниже методов (см. Приложение В):

- (a) Испытательный раствор можно деаэрировать в сосуде для испытания путем продувки инертным газом при расходе не менее 100 мл/мин в течение, как минимум, 1 часа.
- (b) Испытательный раствор можно заранее деаэрировать в герметичной емкости путем продувки инертным газом при расходе не менее 100 мл/мин в течение, как минимум, 1 часа на литр раствора. После этого заранее деаэрированный испытательный раствор заливают в сосуд для испытания и дополнительно продувают инертным газом в течение не менее 20 минут после укупоривания сосуда.
- (c) Допускается применение иных методов деаэрации и заливки раствора, если в результате они дают полностью деаэрированный раствор до подачи H_2S .

10.6.5 Затем раствор насыщают сероводородом при расходе не менее 100 мл/мин в течение, как минимум, 20 минут на 1 литр раствора. Поток H_2S в сосуде и в выпускном патрубке должен быть непрерывным в течение всего испытания при низком расходе (по несколько пузырьков в минуту). Благодаря этому поддерживается концентрация и небольшое избыточное давление H_2S и исключается попадание в сосуд воздуха через мелкие неплотности.

10.6.5.1 Загрязнение кислородом проявляется тем, что испытательный раствор становится дымчатым (непрозрачным) при поступлении H_2S в сосуд для испытания. Непрозрачность раствора при поступлении H_2S делает испытание недействительным. Образец необходимо изъять и очистить, а процедуру приготовления, переноса и деаэрации раствора – повторить.

10.6.6 Испытание прекращается при разрушении С-образных образцов или через 720 часов (что наступит раньше).

10.7 Выявление разрушения

10.7.1 Высоконагруженные С-образные образцы из сплавов, склонных к ЕС, разрушаются по всей толщине или трескаются хорошо видимым образом. Однако, у более стойких к ЕС сплавов растрескивание зачастую начинается медленно, и его трудно обнаружить. Мелкие трещины могут возникать в нескольких местах и маскироваться продуктами коррозии. В качестве критерия разрушения лучше отмечать первую трещину, обнаруженную при 10-кратном увеличении. Другой метод выявления трещин в С-образном кольце заключается в его нагружении свыше уровня напряжений, при котором проводилось испытание. Трещины от ЕС можно отличить от трещин, вызванных механическим нагружением, по характерной коррозии стенок трещины.

10.8 Оформление результатов испытания

10.8.1 В протокол заносятся сведения о разрушении (или не разрушении) каждого образца. Если регистрируется время до разрушения, оно должно быть указано в протоколе.

10.8.2 В протоколе указываются химический состав, термообработка, механические свойства и другие полученные данные.

10.8.3 Рекомендуемая форма протокола приведена в табл. 3.

**Таблица 3 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 1):
Испытание по стандарту NACE TM0177^(A)
Метод C – Испытание C-образного кольца по NACE**

Компания-заказчик _____ Дата поступления заказа _____
 Представитель _____ Телефон _____ Лаборатория _____
 Наименование сплава _____ Тип материала _____

Химический состав	Номер плавки/Маркировка				
C					
Mn					
Si					
P					
S					
Ni					
Cr					
Mo					
V					
Al					
Ti					
Nb					
N					
Cu					
Прочие					
Сведения о выплавке и обработке материала (напр., OH, BOF, EF, AOD) ^(B)					
Форма изделия					
Термообработка (время, температура и режим охлаждения в каждом цикле процесса)					
Другие виды механической, термической, химической обработки или нанесение покрытий ^(C)					

^(A) Если метод испытания не соответствует TM0177, он должен быть подробно описан.

^(B) Метод выплавки: мартеновский (OH), кислородно-конвертерный (BOF), в электропечи (EF), аргоно-кислородное обезуглероживание (AOD).

^(C) Например: холодное упрочнение, плакирование, азотирование, предварительное деформирование.

**Таблица 3 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 2):
Испытание по стандарту NACE TM0177
Метод С – Испытание С-образного кольца по NACE**

Результаты лабораторного испытания материала _____ согласно NACE TM0177^(A)
 Геометрия образца: Наружный диаметр _____ Толщина стенки _____ Ширина _____
 Оборудование: Материал болтов такой же, как образца
 Поправка на текучесть введена

Химический состав: Испытательный раствор А Испытательный раствор В
 Испытательный раствор С (охарактеризовать) _____
 Другой испытательный раствор _____
 Выпускная ловушка для кислорода Температурный режим 24±3°C (75±5°F)
 Температурный режим _____ ±3°C (±5°F)

Обозначение материала	Свойства образцов						Испытательное напряжение (% от предела текучести)						pH раствора ^(E)		Термическая обработка	Примечания (состояние поверхности и уровень H ₂ S)	
	Положение ^(B)	Ориентация ^(C)	Предел текучести ^(D) ()	Предел прочности на растяжение	Относительное удлинение, %	Сужение, %	Твердость ()	Время до разрушения (часы)						Начало			Окончание
								NF – без разрушения за 720 часов									

- (A) Если метод испытаний не соответствует стандарту NACE TM0177, он должен быть подробно описан.
 (B) Положение образца может быть: для трубных изделий: на наружной поверхности (OD), в середине толщины стенки (MW) или на внутренней поверхности (ID); для сплошных изделий: на поверхности (S), на четверти толщины (QT), на середине радиуса (MR), в центре (C), по кромке (E).
 (C) Ориентация может быть: продольная (L) или поперечная (T).
 (D) В скобках указывать значения в метрических или в британских единицах, в зависимости от представления результатов испытания. Если не оговорено иное, предел текучести принимается при 0,2% остаточной деформации.
 (E) Укажите pH для испытания, при котором образец выдержал максимальное напряжение.

Раздел 11: Метод D – Стандартное испытание двухконсольной балки по NACE

11.1 Метод D, Стандартное испытание двухконсольной балки (ДКБ) по NACE, представляет собой испытание на остановку трещины по методике механики разрушения, заключающейся в измерении сопротивления металлического материала распространению растрескивания под действием внешних факторов (ЕС), выраженного в виде критического коэффициента интенсивности напряжений, $K_{I,SSC}$ для SSC, и $K_{I,ЕС}$ для более общего случая ЕС. Метод D не зависит от неопределенности, связанной с питтингом и/или зарождением трещины, поскольку каждый корректно испытанный образец имеет трещину. При испытании на стойкость к SSC углеродистых и низколегированных сталей данный метод требует небольших затрат времени. Метод непосредственно дает численное выражение сопротивления распространению трещины и не зависит от результатов оценки состояния образцов (разрушен или не разрушен)^[16]. Испытание на сопротивление ЕС методами механики разрушения в настоящее время изучается специальной группой NACE TG 085 и рабочей группой WG 085c, а также комитетами ASTM E8.06.02 и G1.06.04. Рекомендуется поддерживать связь с этими органами, чтобы быть в курсе состояния дел в этой области.

11.1.1 В данном разделе приведена процедура испытания ДКБ и расчета $K_{I,SSC}$ при комнатной температуре и атмосферном давлении. Особые соображения по поводу испытаний при повышенных температуре и давлении см. в разделе 7. Расчетный коэффициент интенсивности напряжений следует обозначать $K_{I,ЕС}$. Уравнения для расчета $K_{I,ЕС}$ – те же, что приведены в пункте 11.6 для расчета $K_{I,SSC}$. Однако приведенные ниже характеристики поведения материала в условиях SSC могут не соответствовать более общим условиям ЕС.

11.2 Образец для испытания

11.2.1 Чертеж стандартного образца в виде ДКБ приведен на рис. 10(a). Для нагружения образца используется двусторонний клин [см. рис. 10(b)]. Двусторонний клин должен быть изготовлен из того же материала, или из того же класса материала, что и образец ДКБ. Материал клина может быть подвергнут термообработке или наклепу для повышения его твердости, что способствует предотвращению истирания поверхности при вставке клина. Клин может иметь защиту из политетрафторэтиленовой (ПТФЭ) ленты для уменьшения коррозии на участке контакта с клином.

11.2.2 Номинальная толщина стандартного образца ДКБ должна составлять 9,53 мм (0,375 дюйма); все размеры показаны на рис. 10(a). Если толщина материала недостаточна для выполнения этого требования, можно рассмотреть использование дополнительных толщин, как указано на рисунке. Образцы ДКБ уменьшенного размера из некоторых углеродистых и низколегированных сталей могут давать в результате испытания меньшие значения $K_{I,SSC}$, чем образцы стандартного размера; разница может достигать 37%. Для количественной оценки этого эффекта требуется проведение дополнительной работы.

11.2.3 Из трубных изделий могут быть вырезаны образцы ДКБ полной толщины, если отношение наружного диаметра к толщине стенки изделия превышает 10. Боковые канавки должны иметь глубину, равную 20% толщины стенки, с тем, чтобы толщина перемычки (B_n) составляла 60% от толщины стенки.

11.2.4 Боковые канавки необходимо тщательно обработать, не допуская перегрева и наклепа. За последние два прохода следует удалить не более 0,05 мм (0,002 дюйма) металла. Допускается шлифование, если материал при этом не упрочняется.

11.2.5 При испытании материалов с низкими значениями $K_{I,SSC}$ [ниже 22-27 МПа·м^{1/2} (20-25 ksi·дюйм^{1/2})] или материалов, в которых затруднено зарождение трещины, например, материалов с пониженным пределом текучести, рекомендуется выполнить прорезь с помощью электроэрозионной обработки [см. рис. 10(a)] или нанести предварительную усталостную трещину, что весьма способствует предотвращению бокового растрескивания и зарождению SSC, соответственно. Наведение усталостной трещины в образце ДКБ следует проводить при контролируемой нагрузке и частоте. Допустимая глубина усталостной трещины составляет 1-3 мм (0,04-0,12 дюйма) от ее основания. Во избежание получения ошибочно высоких результатов максимальная нагрузка при наведении усталостной трещины должна составлять 70% ожидаемого исходного K_I от установки клина или 30 МПа·м^{1/2} (27 ksi·дюйм^{1/2}), в зависимости от того, что меньше. Отношение минимальной нагрузки к максимальной должно быть в диапазоне 0,1-0,2. Трещину следует углубить при нагрузке, равной 2/3 максимальной нагрузки при наведении трещины, прикладываемой в течение примерно 20000 циклов нагружения, чтобы трещина прошла через все участки остаточных сжимающих напряжений.

11.2.6 Маркировка образца

11.2.6.1 Рекомендуется маркировка каждой консоли ДКБ клеймением или вибрографировкой, либо поблизости от двух отверстий, либо на конце без клина.

11.2.7 Размерный контроль

11.2.7.1 Измерьте размеры B , B_n , $2h$ и расстояние от центров отверстий до ближнего торца образца ДКБ (для измерения B_n рекомендуется микрометр с наконечниками-лезвиями). Зарегистрируйте все значения, выходящие за допуски по рис. 10(a), для последующего расчета $K_{I,SSC}$ (см. 11.6.3).

11.2.8 Очистка образца

11.2.8.1 Перед испытанием образцы обезжиривают растворителем и промывают в ацетоне.

11.3 Испытательный раствор – раствор для испытания по Методу D см. в разделе 6.

ПРИМЕЧАНИЕ: Для материалов с высоким сопротивлением растрескиванию предварительно следует применять наведение усталостной трещины и/или повышенное значение исходного смещения консолей образца (δ), вместе с повышенным значением pH раствора.

11.3.1 Соответственно, испытательный раствор (A, B или C) должен быть насыщен сероводородом, как описано в 11.5.7.

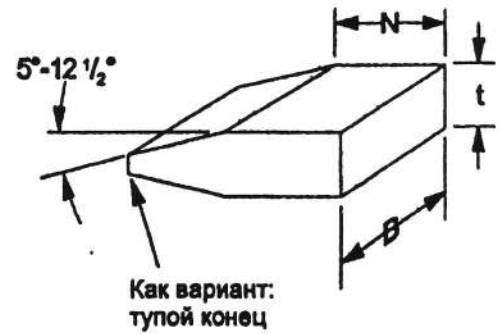


ПРИМЕЧАНИЯ:

- (1) Если ожидается очень низкое сопротивление растрескиванию, можно использовать образец ДКБ длиной U.
- (2) Зачаток V-образной трещины можно заменить коротким пазом, прорезанным с помощью электроэрозионной обработки, толщиной X и глубиной Y. Кроме того, треугольную часть V-образной трещины можно удалить по соображениям эффективности механической обработки, придав пазу прямоугольную форму. (Во избежание поломки консоли ДКБ рекомендуется скруглить или обработать на фаску самое дно паза под клин).
- (3) Канавки должны располагаться по центру с точностью Z, взаимное смещение не более Z.

Размер	Значение	
	(мм)	(дюймы)
B	9,53 ±0,05	0,375 ±0,002
B _n	5,72 ±0,05	0,225 ±0,002
D	4,85	0,191 (сверло №11)
E	6,4 +0,2/-0,0	0,25 +0,01/-0,00
F	6,35 ±0,10	0,250 ±0,004
G	1,91 ±0,05	0,075 ±0,002
h	12,70 ±0,05	0,500 ±0,002
J	38,10 ±1,59	1,500 ±0,0630
K	3,17 ±0,77	0,125 ±0,031
L	101,60 ±1,59	4,000 ±0,0630
M	51 ±13	2,0 ±0,5
N	6,35 ±0,10	0,250 ±0,004
R	0,25 ±0,05	0,010 ±0,002
S	2,38 ±0,05	0,094 ±0,002
U	130	5
w	25,40 ±0,05	1,000 ±0,002
X	0,3	0,01
Y	41,3	1,63
Z	±0,05	±0,002

(a) Чертеж образца



ПРИМЕЧАНИЕ:

Достаточно для создания заданного смещения консоли

(b) Двусторонний клин

Рис. 10: Образец в виде двухконсольной балки

11.4 Испытательное оборудование

11.4.1 Сосуд для испытания должен иметь размер, достаточный для размещения примерно 1 л испытательного раствора на образец ДКБ (10–12 мл раствора на 1 см² площади поверхности образца ДКБ). Емкость сосуда не должна превышать 10 л, чтобы не затруднять насыщение раствора.

11.4.2 Рекомендуется использовать щелевое основание или иную опору для образцов, выполненную из электроизоляционного материала и обеспечивающую равномерное размещение и ориентацию образцов ДКБ.

11.4.3 Для облегчения установки клина можно снабдить тиски небольшим устройством для приложения нагрузки к клину, заподлицо с торцом образца ДКБ.

11.4.4 Для подвода инертного газа и H₂S ниже образцов следует использовать барботер из спеченного стекла. Следите, чтобы пузырьки газа не попадали на образцы ДКБ.

11.5 Порядок испытания

11.5.1 Очистите образцы ДКБ, как описано в 11.2.8.1.

11.5.2. Наведите на образцы усталостные трещины (если желательно) согласно процедуре, описанной в 11.2.5.1.

11.5.3 Измерьте ширину паза с помощью набора щупов. Поскольку начальное значение интенсивности напряжений оказывает влияние на конечное значение K_{ISSC} для углеродистых и низколегированных сталей^[17], рекомендуется толщину клиньев для испытания стойких к SSC углеродистых и низколегированных сталей, достаточную для получения заданного смещения консоли, выбирать по табл. 4. Для каждой группы прочности материала смещение консоли не должно превышать верхнего предела для данной группы прочности согласно табл. 4.

Таблица 4 – Значения смещения консоли для стальных труб нефтяного сортамента групп прочности по API и других групп прочности

Группа прочности ^(A)	Интервал значений предела текучести		Допустимое смещение консоли (δ)	
	МПа	(ksi)	мм	(10 ⁻³ дюйма)
L-80	552 – 655	(80 – 95)	0,71 – 0,97	(28 – 38)
C-90	621 – 724	(90 – 105)	0,64 – 0,89	(25 – 35)
C-95, T-95	655 – 758	(95 – 110)	0,58 – 0,84	(23 – 33)
100 ^(B)	689 – 793	(100 – 115)	0,51 – 0,76	(20 – 30)
105 ^(B)	724 – 827	(105 – 120)	0,46 – 0,71	(18 – 28)
110 ^(B)	758 – 862	(110 – 125)	0,38 – 0,64	(15 – 25)
P-110	758 – 965	(110 – 140)	0,25 – 0,64	(10 – 25)
Q-125	862 – 1030	(125 – 150)	0,25 – 0,51	(10 – 20)

^(A) Группы прочности по API (если не оговорено иное).

^(B) Группы прочности не по API.

Допустимые значения смещения консоли, приведенные в табл. 4, можно также использовать и при выборе клиньев для испытания других марок углеродистых и низколегированных сталей. В табл. 5 приведены указания по выбору толщины клиньев для изделий из низколегированных сталей, не включенных в табл. 4, и для других сплавов. При испытании сталей с пределом текучести ниже 550 МПа (80 ksi) смещение консоли (δ) можно рассчитать по уравнению (7a) или (7b), в которых YS – предел текучести:

$$\delta(\text{мм}) = \left[2,02 - \frac{YS(\text{МПа})}{530} \pm 0,13\text{мм} \right] \quad (7a)$$

$$\delta(\text{дюймы}) = \left[0,080 - \frac{YS(\text{ksi})}{1953} \pm 0,0050\text{дюймов} \right] \quad (7b)$$

Недавний опыт показал, что при испытании углеродистых и низколегированных сталей при повышенных температурах и/или в более мягких испытательных средах, нежели испытательный раствор А, для получения удовлетворительного зарождения трещины могут потребоваться большие значения смещения консоли, чем указанные в табл. 4 и 5 для испытаний при комнатной температуре. Однако рекомендации по выбору конкретных значений смещения консоли для испытаний, проводимых при температуре выше комнатной или с менее агрессивными испытательными растворами, выходят за рамки настоящего стандарта. Поэтому, для того, чтобы установить необходимое значение смещения консоли для таких испытаний, может потребоваться предварительное экспериментальное изучение.

Таблица 5 – Рекомендуемые значения смещения консолей для некоторых материалов и уровней прочности

Предел текучести		Смещение консоли (δ), мм (10^{-3} дюйма) ^(A)				
МПа	(ksi)	Низколегированные стали ^(B)	UNS J91540	Дуплексные нержавеющие стали	UNS N10276	Ti-3-8-6-4-4
552	(80)	0,71–1,07 (28–42)	0,64–0,89 (25–35)	—	—	—
621	(90)	0,58–0,89 (23–35)	0,46–0,71 (18–28)	—	—	—
689	(100)	0,48–0,79 (19–31)	0,20–0,46 (8–18)	—	—	—
827	(120)	0,33–0,58 (13–23)	—	0,89–1,02 (35–40)	—	1,02–1,52 (40–60)
965	(140)	0,20–0,46 (8–18)	—	0,64–0,89 (25–35)	—	—
1,100	(160)	0,18–0,38 (7–15)	—	—	1,27–1,78 (50–70)	—
1,240	(180)	0,15–0,30 (6–12)	—	—	1,02–1,27 (40–50)	—

^(A) Эти значения действительны при указанном пределе текучести, а не в некотором интервале предела текучести используемого материала.

^(B) Для сталей, используемых для производства труб нефтяного сортамента, см. табл. 4.

11.5.3.1 Для определения фактического смещения консолей следует измерить исходное расстояние между отверстиями в образце ДКБ.

11.5.3.2 Поскольку трудно обеспечить точное измерение смещения консолей, необходимо подобрать такую толщину клиньев, чтобы смещение лежало в середине требуемого интервала.

11.5.3.3 Заведите клин в паз заподлицо с торцом образца ДКБ.

11.5.3.4 Повторно измерьте расстояние между отверстиями и вычислите фактическое смещение (δ). Для стойких к SSC углеродистых и низколегированных сталей (см. табл. 5), если фактическое смещение меньше рекомендуемого интервала, допускается установка нового клина, чтобы получить нужное смещение. Если фактическое

смещение больше рекомендуемого интервала, клин необходимо удалить, а полученные электроэрозионной обработкой паз или усталостную трещину следует продлить через участок пластической деформации до повторного нагружения образца ДКБ.

11.5.4 Очистите образцы ДКБ растворителем и промойте их в ацетоне.

ПРИМЕЧАНИЕ: Если образец ДКБ выполнен с наведенной усталостной трещиной, его следует чистить обтиранием, но не погружением в растворитель.

11.5.5 Поместите образцы ДКБ в сосуд для испытания.

11.5.6 Долейте в сосуд 1 литр испытательного раствора на один образец ДКБ (10-12 мл на 1 см² площади поверхности образца). Чтобы гарантировать отсутствие кислорода в испытательном растворе до подачи H₂S, испытательный раствор должен быть полностью деаэрирован одним из приведенных ниже методов (см. Приложение В):

- (a) Испытательный раствор можно деаэрировать в сосуде для испытания путем продувки инертным газом при расходе не менее 100 мл/мин в течение, как минимум, 1 часа.
- (b) Испытательный раствор можно заранее деаэрировать в герметичной емкости путем продувки инертным газом при расходе не менее 100 мл/мин в течение, как минимум, 1 часа на литр раствора. После этого заранее деаэрированный раствор заливают в сосуд для испытания и дополнительно продувают инертным газом в течение не менее 20 минут после укупоривания сосуда.
- (c) Допускается применение иных методов деаэрации и заливки раствора, если в результате они дают полностью деаэрированный раствор до подачи H₂S.

11.5.7 Затем раствор насыщают сероводородом при расходе не менее 100 мл/мин в течение, как минимум, 20 минут на 1 литр раствора. Поток H₂S в сосуде и в выпускном патрубке должен быть непрерывным в течение всего испытания при низком расходе (по несколько пузырьков в минуту). Благодаря этому поддерживается концентрация и небольшое избыточное давление H₂S, и исключается попадание в сосуд воздуха через мелкие неплотности.

11.5.7.1 Загрязнение кислородом проявляется тем, что испытательный раствор становится дымчатым (непрозрачным) при поступлении H₂S в сосуд для испытания. Непрозрачность раствора при поступлении H₂S делает испытание недействительным. Образец необходимо изъять и очистить, а процедуру приготовления, переноса и деаэрации раствора – повторить.

11.5.8 Температуру испытательного раствора необходимо поддерживать в пределах 24±1,7°C (75±3,0°F) на протяжении всего испытания, так как установлено, что в окрестности комнатной температуры значения K_{ISSC} для низколегированных сталей существенно изменяются с изменением температуры. За температурой испытательного раствора необходимо следить, а среднюю температуру отразить в протоколе.

11.5.9 Продолжительность испытания углеродистых и низколегированных сталей – 14 суток. Нержавеющие стали и сплавы на основе Ni, Ni/Co, Ti и Zr могут потребовать более длительного испытания, чтобы прекратился рост трещины. Для таких материалов

рекомендуется продолжительность испытания не менее 720 часов. Продолжительность испытания должна быть согласована заинтересованными сторонами и указана в протоколе.

11.5.10 После испытания удалите с образца ДКБ продукты коррозии путем парового хонингования, осторожной обдувки стеклянными шариками или любым иным способом, не вызывающим удаления значительного количества металла.

11.5.11 Постройте кривую "нагрузка-смещение" и удалите клин. По резкому изменению наклона кривой найдите равновесную нагрузку (P).

11.5.12 После удаления клина образец ДКБ должен быть механически раскрыт для обнажения поверхностей трещины. Эта процедура может быть осуществлена на машине для проведения испытаний на разрыв. Образцы из ферритных сталей можно охладить в жидком азоте и расщепить молотком и зубилом.

11.6 Определение $K_{I,SSC}$

11.6.1. Изучите поверхность излома, обращая внимание на следующее:

- (a) Трещина должна вырасти не менее чем на 2,5 мм (0,10 дюйма) за основание угольника (шеврона) трещины, или за дно паза, прорезанного на электроэрозионном станке, или за наведенную усталостную трещину;
- (b) Если поверхность излома не плоская, выпуклая часть фронта трещины не должна выходить за пределы V-образной части боковых канавок;
- (c) Фронт трещин не должен пересекаться с внутренней трещиной и расщелинами.
- (d) На фронте трещины не должно быть значительных нарушений, вызванных выходом основной трещины вниз или вверх от ранее образовавшейся (более темной) краевой треугольной трещины ("зуб акулы"). Так, чтобы испытание было действительным, результирующая ширина любой краевой трещины у фронта основной трещины на поверхности излома не должна превышать 25% толщины перемычки B_n . Краевые трещины, располагающиеся на достаточном расстоянии от фронта основной трещины (образованной ранее во время испытания), учитываются с весовым коэффициентом, равным одной четверти от краевых трещин, расположенных у фронта основной трещины. Таким образом, образец ДКБ, у которого образовались ранее краевые трещины имеют результирующую ширину, превышающую 100% толщины перемычки, считается недействительным. Для образцов ДКБ, имеющих как образовавшиеся ранее краевые трещины, так и краевые трещины у фронта основной трещины, чтобы испытание считалось действительным, сумма результирующих значений ширины образовавшихся ранее трещин, деленная на 4, плюс значения ширины трещин у фронта основной трещины, не должна превышать 25% толщины перемычки B_n .
- (e) Трещина не должна ответвляться в одну или обе консоли (боковая трещина);
- (f) Фронт трещины должен находиться на расстоянии не менее 25 мм (1,0 дюйма) от заднего (без паза) торца образца; и

- (g) Фронт трещины в полноразмерном (неразогнутом) образце трубного изделия не должен захватывать край поверхности излома, ближайший к внутренней поверхности трубы.

11.6.2 Если поверхность излома отвечает всем требованиям по п. 11.6.1., испытание признается действительным. Измерьте расстояние от надрезанного торца образца до средней точки фронта трещины, используя индикаторный прибор, и вычтите 6,35 мм (0,250 дюйма), чтобы получить длину трещины (а). При наличии сомнений, можно проверить местоположение границы разрушения от SSC (хрупкого разрушения) методом окрашивания до разделения консолей или методом электронной микроскопии после разделения.

11.6.3 Коэффициент интенсивности напряжений для сульфидного растрескивания под напряжением (SSC) плоского образца в виде двухконсольной балки определяется из уравнения (8):

$$K_{ISSC} \text{ (для плоского образца ДКБ)} = \frac{Pa(2\sqrt{3} + 2,38h/a)(B/B_n)^{1/\sqrt{3}}}{Bh^{3/2}} \quad (8)$$

где:

- K_{ISSC} – коэффициент интенсивности напряжений порога SSC;
 P – равновесная (конечная) нагрузка на клин в плоскости нагружения;
 a – длина трещины, см. 11.6.2;
 h – высота каждой консоли;
 B – толщина образца в виде двухконсольной балки;
 B_n – толщина перемычки.

(Если какой-либо размер лежит вне заданного допуска по п. 11.2.7.1, то при расчете K_{ISSC} следует взять фактический размер, а не номинальный).

11.6.3.1 Проверка расчета:

Исходные данные: $B = 9,53$ мм (0,375 дюйма)
 $B_n = 5,72$ мм (0,225 дюйма)
 $h = 12,7$ мм (0,500 дюйма)
 $P = 1870$ Н (421 фунт)
 $a = 46,48$ мм (1,830 дюйма)

Результат: $K_{ISSC} = 35,3$ МПа·м^{1/2} (32,1 ksi·дюйм^{1/2})

11.6.4 Коэффициент интенсивности напряжений для SSC полноразмерного (неразогнутого) образца трубного изделия в виде ДКБ определяется из уравнения (9)^[18]:

$$K_{ISSC} \text{ (для криволинейного образца ДКБ)} = \left(\frac{3I}{Bh^3} \right)^{1/2} K_{ISSC} \text{ (для плоского образца ДКБ)} \quad (9)$$

где:

- K_{ISSC} (для плоского образца ДКБ) рассчитывается по уравнению (8);
 Величина I вычисляется из уравнения (10):

$$I = -\frac{h}{4} \left(\frac{D^2}{4} - h^2 \right)^{3/2} + \frac{D^2 h}{32} \left(\frac{D^2}{4} - h^2 \right)^{1/2} + \frac{D^4}{128} \sin^{-1} \left(\frac{2h}{D} \right) + \frac{h}{4} \left[\left(\frac{D}{2} - B \right)^2 - h^2 \right]^{3/2} - \frac{h}{8} \left(\frac{D}{2} - B \right)^2 \left[\left(\frac{D}{2} - B \right)^2 - h^2 \right]^{1/2} - \frac{1}{8} \left(\frac{D}{2} - B \right)^4 \sin^{-1} \left(\frac{2h}{D - 2B} \right) \quad (10)$$

где:

B и h имеют значения согласно 11.6.3;

D – наружный диаметр трубного изделия.

Математический анализ и результаты экспериментов показали, что поправочный коэффициент для криволинейного образца дает увеличение значения K_{ISSC} лишь на несколько процентов, как максимум.

11.6.4.1 Проверка расчета:

Исходные данные: $D = 193,7$ мм (7,625 дюйма)
 Остальные данные, как в пункте 11.6.3.1
 Результат: $K_{ISSC} = 35,4$ МПа·м^{1/2} (32,2 ksi·дюйм^{1/2})

11.7 Оформление результатов

11.7.1 По каждому комплекту образцов ДКБ в протокол следует включить все индивидуальные значения K_{ISSC} , полученные при действительных испытаниях. По каждому образцу следует указать смещение консоли.

11.7.2 В протокол включают химический состав, режим термообработки, механические свойства и другие полученные данные.

11.7.3 В табл. 6 приведена рекомендуемая форма протокола.

**Таблица 6 – Единая форма протокола испытания материала (Часть 1):
Испытание по стандарту NACE TM0177^(A)
Метод D – Испытание двухконсольной балки по NACE**

Компания-заказчик _____ Дата поступления заказа _____
 Представитель _____ Телефон _____ Лаборатория _____
 Наименование сплава _____ Тип материала _____

Химический состав	Номер плавки/Маркировка				
C					
Mn					
Si					
P					
S					
Ni					
Cr					
Mo					
V					
Al					
Ti					
Nb					
N					
Cu					
Прочие					
Сведения о выплавке и обработке материала (напр., OH, BOF, EF, AOD) ^(B)					
Форма изделия					
Термообработка (время, температура и режим охлаждения в каждом цикле процесса)					
Другие виды механической, термической, химической обработки или нанесение покрытий ^(C)					

^(A) Если метод испытания не соответствует TM0177, он должен быть подробно описан.

^(B) Метод выплавки: мартеновский (OH), кислородно-конвертерный (BOF), в электропечи (EF), аргоно-кислородное обезуглероживание (AOD).

^(C) Например: холодное упрочнение, плакирование, азотирование, предварительное деформирование.