

Вихретоковые методы и средства контроля замковой резьбы бурового оборудования

Сотрудники
ЗАО «Константа»
Санкт-Петербург



Сясько Владимир Александрович
Генеральный директор, д. т. н.
Научные интересы: контроль физико-механических характеристик, микро- и наноструктурированных материалов.



Соломенчук Павел Валентинович
Инженер.

Резьбовое соединение является наиболее нагруженным элементом в бурильной колонне. Особенности конструкции замковой резьбы учитывают большие статические и динамические нагрузки, возникающие при её эксплуатации, при этом переменный по высоте профиль резьбы создает естественные концентраторы механических напряжений и очаги возникновения усталостных трещин.

Возникающие при эксплуатации напряжения принимают максимальное значение в последних трех витках резьбы возле сбега [1]. На рис. 1 изображена расчетная эпюра напряжений по оси изделия с резьбой [2]. Видно, что напряжения во впадине первых трех витков резьбы трубы со стороны сбега могут приближаться к пределу текучести материала трубы.

Данные, полученные моделированием, подтверждают статистику отказов и выхода из строя труб вследствие возникновения и развития трещин в резьбе [3].

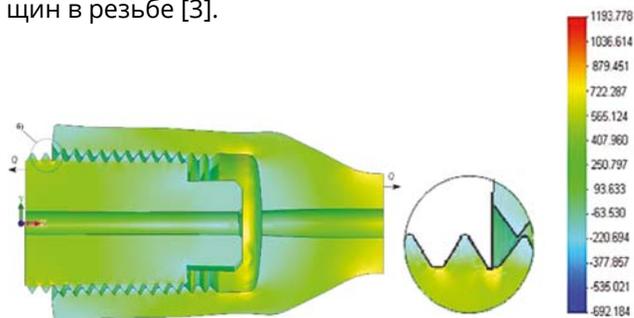


Рис. 1. Эпюра напряжений по оси резьбы: а — общий вид; б — зона наибольшей концентрации напряжений (увеличение); в — цветовая шкала напряжений, МПа

На рис. 2 представлена фотография трещины ниппельного конца трубы, бывшей в употреблении. Трещина имеет большое раскрытие и хорошо видна, однако, это не единственный дефект, образовавшийся в резьбе во время эксплуатации трубы.

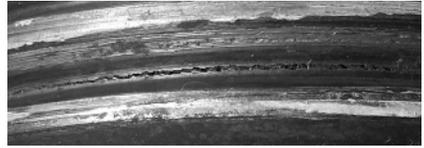


Рис. 2. Фотография трещины ниппельного конца трубы

На рис. 3 представлены фотографии дефектов, обнаруженные визуальными методами практически невозможно. Показанные дефекты, в частности, трещины, расположенные в витках на участке сбega, могут увеличиваться в размере и привести к обрыву резьбы.

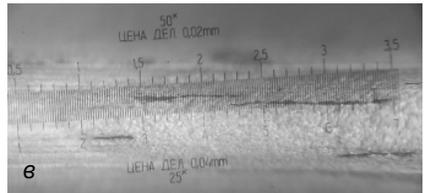
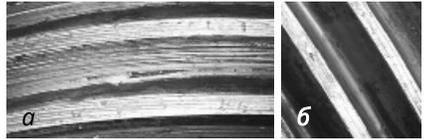


Рис. 3. Фотографии дефектов, выявляемых средствами НК: а — прихват в витке; б — группа трещин на участке сбega; в — группа трещин в витке на участке сбega (вид через микроскоп МПБ-3 при 50-кратном увеличении)

Для обнаружения трещин в замковой резьбе могут применяться методы оптического, акустического, магнитного и вихретокового видов НК.

Вихретоковый контроль основан на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля преобразователем. Стандарт организации СТО 03-001-12 оговаривает применение вихретоковых средств для контроля резьбы насосно-компрессорного оборудования, однако нормативных документов, регламентирующих их применение для контроля замковой резьбы, нет.

Наиболее распространенные традиционные трансформаторные преобразователи имеют круговые обмотки возбуждения и измерительную, ось которых перпендикулярна поверхности объекта контроля (ОК). Обмотка возбуждения наводит в ОК вихревые токи, форма траектории протекания которых близка к форме обмотки возбуждения. Если преобразователь расположить над участком ОК с трещиной, то форма траектории протекания вихревых токов исказится, о чем будет свидетельствовать изменение параметров ЭДС измери-

тельной обмотки. Для круговых трансформаторных преобразователей информативным параметром сигнала является фаза вносимой ЭДС. Чем глубже трещина, над которой располагается преобразователь, тем сильнее искажается форма траектории протекания вихревых токов и тем больше изменяется фаза вносимой ЭДС, анализируя которую можно оценить глубину трещины. Однако для рассматриваемой задачи данные традиционные преобразователи не обеспечивают требуемой чувствительности вследствие их конструктивных особенностей [4].

Рассмотрим вихретоковые методы контроля, основанные на анализе параметров линейного вихревого тока в зоне трещины резьбовых соединений.

За рубежом метод ACFM (Alternating Current Field Measurement — измерение параметров поля переменного тока) достаточно широко используется для обнаружения и определения размеров поверхностных дефектов [5]. Первые разработки

в этой области берут свое начало в 1980-х гг. Основной целью исследований того времени было развитие методов НК усталостных трещин сварных конструкций морских сооружений под водой. В настоящее время данный метод нашел применение для выявления трещин в резьбовых соединениях. Суть метода заключается в следующем. Протяженная обмотка W_B с переменным током возбуждает непосредственно под собой в электропроводящем полупространстве однородное электромагнитное поле, где, в соответствии с принципом зеркального отображения, вихревой ток будет практически линейен (рис. 4а). При нахождении обмотки над трещиной, направление

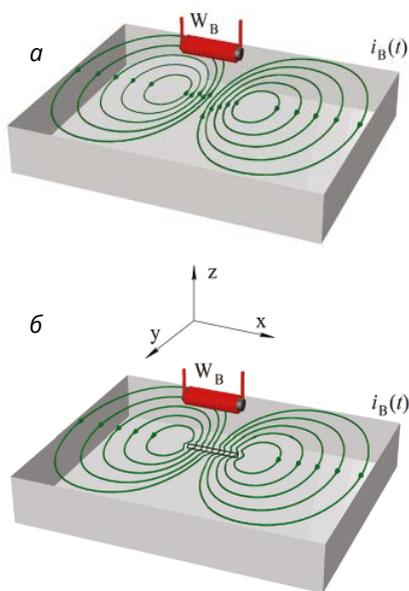


Рис. 4. Симметричная картина вихревых токов, возбуждаемых протяженной обмоткой в бездефектном объекте контроля (а), и ее искажение в районе трещины, направление которой совпадает с осью обмотки (б)

которой совпадает с осью обмотки, произойдет искажение картины вихревых токов (рис. 4б) и, соответственно, картины результирующего магнитного поля.

В качестве информативного параметра преобразователя, основанного на методе АСFM, принято использовать амплитуды составляющих (проекций) B_z и B_x вектора магнитной индукции (рис. 5).

В отсутствие дефекта линейный вихревой ток протекает в направлении оси Y , а магнитное поле однородно и направлено по оси X . В этом случае составляющая B_x будет иметь некоторое положительное постоянное значение, зависящее от электрофизических параметров (электропроводность, магнитная проницаемость) материала ОК и его геометрии. Составляющие B_y и B_z будут равны нулю.

В случае наличия дефекта типа трещины на поверхности ОК наблюдается «разрыв» линий электрического поля. Напряженность электрического поля уменьшается в центре дефекта и увеличивается вблизи его краев. Вихревой ток будет огибать дефект по краям. Вследствие этого при перемещении точки наблюдения вдоль дефекта к его середине наблюдается уменьшение составляющей B_x . Это уменьшение пропорционально глубине дефекта, а минимальное значение B_x соответствует максимальной глубине дефекта. На краях дефекта наблюдаются незначительные всплески амплитуды B_x , что объясняется концентрацией плотности тока в этих местах. Протекание тока по круговой траектории на краях дефекта создает нормальное к плоскости магнитное поле, и составляющая B_z не равна нулю. Знак составляющей B_z определяется правилом правого винта. Положение максимума положительного и отрицательного значения амплитуды B_z достаточно близки к точкам начала и конца дефекта, однако не совпадают с ними. Это объясняется некоторым удалением точки наблюдения от ОК.

На рис. 6 представлена структура одноканального измерительного преобразователя фирмы TSC, реализующего метод АСFM.

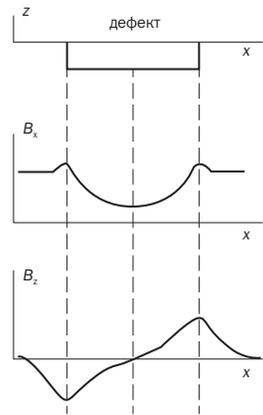


Рис. 5. Проекция вектора магнитной индукции в районе трещины

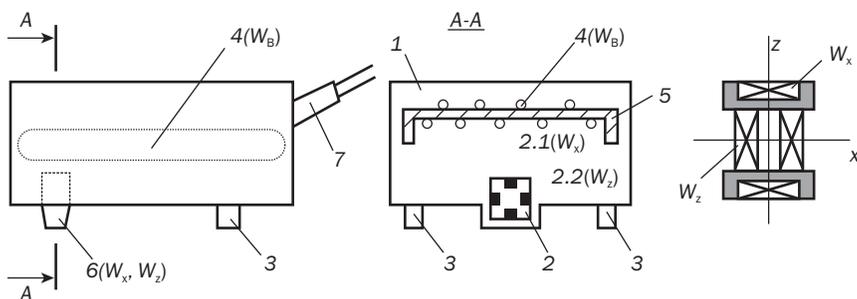


Рис. 6. Структура одноканального измерительного преобразователя: а — вид сбоку; б — ортогональная проекция с разрезом по плоскости А — А; в — чувствительный элемент из совмещенных абсолютных обмоток W_x и W_z

Преобразователь состоит из корпуса 1 длиной 50 мм, шириной 25 мм и высотой 25 мм. Чувствительный элемент 2 размещен в профилированном выступе 6. Две опоры 3 из нержавеющей стали предназначены для обеспечения возможности установки преобразователя на цилиндрических основаниях. Чувствительный элемент состоит из двух абсолютных x - и z -ориентированных обмоток W_x и W_z , намотанных на сложнопрофильный диэлектрический каркас вокруг общей центральной точки. Обмотка W_x содержит 50 витков провода и имеет квадратное поперечное сечение со стороной 5 мм. Z -ориентированная катушка содержит 100 витков и имеет круглое поперечное сечение диаметром 3 мм (рис. 6в). Обмотка возбуждения W_B 4 намотана на ярмо 5, представляющее собой плоскую пластину из магнитомягкой стали с двумя концами, согнутыми на 90° в плоскости, ортогональной к основанию преобразователя. По обмотке W_B протекает ток до 1 А частотой 5 кГц.

При размерах чувствительного элемента и профилированного выступа, соответствующих профилю резьбовых соединений бурового оборудования, с использованием рассматриваемого преобразователя возможно выявление трещин в пазах резьбы. Для обеспечения приемлемой производительности контроля и удобства эксплуатации используются многоканальные линейные преобразователи, структура которых представлена на рис. 7. Главной отличительной особенностью преобразователя 1 является наличие основания, повторяющего профиль резьбы изделия 6 и обеспечивающего позиционирование чувствительных элементов 2 относительно витков резьбы.

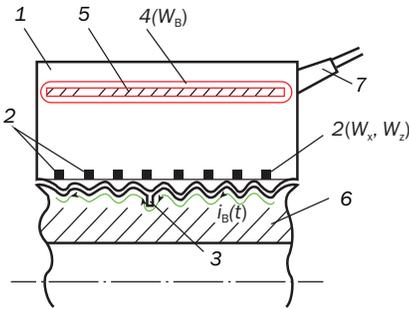


Рис. 7. Линейный многоканальный измерительный преобразователь для контроля резьбы: 1 — корпус; 2 — чувствительные элементы с ортогональными обмотками W_x и W_z ; 3 — трещина в углублении витка резьбы; 4 — обмотка возбуждения W_v ; 5 — ярмо; 6 — участок резьбы изделия; 7 — кабель

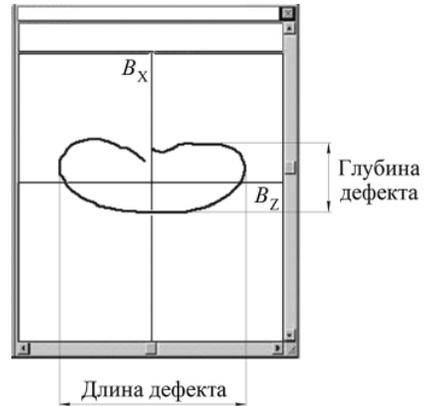


Рис. 8. Наложение составляющих B_x и B_z на комплексную плоскость при перемещении измерительного преобразователя по витку резьбы вдоль трещины

Для проведения контроля за один оборот преобразователя число чувствительных элементов равно числу витков резьбы. Длина ярма 5 и обмотки 4 обеспечивает протекание линейного вихревого тока по всей длине участка резьбы в зоне чувствительных элементов. В районе краев трещины 3 произойдет искривление картины вихревого тока, что будет зафиксировано обмотками W_x и W_z соответствующего чувствительного элемента при его перемещении вдоль трещины.

Измерение (оценка) глубины и протяженности трещины осуществляется автоматически за счет применения специальных программных алгоритмов и расчетных таблиц, получаемых методами моделирования или же путем построения градуировочной характеристики на контрольных образцах изделий с известными параметрами дефектов. Для удобства анализа результаты составляющие B_x и B_z совмещают и отображают на одной комплексной плоскости (рис. 8). При этом в каждый момент времени $\vec{B} = \vec{B}_x + \vec{B}_z$.

Таким образом, при перемещении от начала к концу трещины получается годограф, напоминающий по форме замкнутую петлю (его часто называют «диаграмма-бабочка»). Основным преимуществом подобного метода отображения является то, что он не чувствителен к скорости сканирования. Если контроль будет осуществляться от-

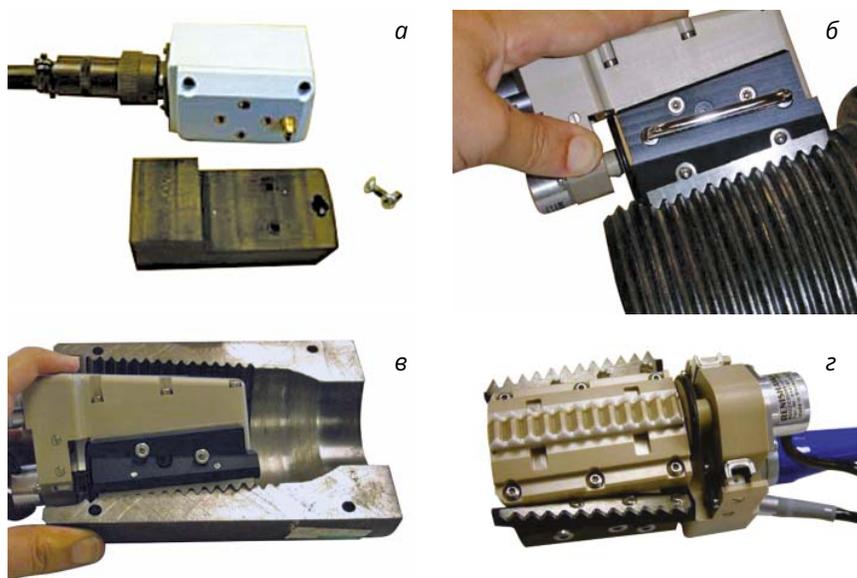


Рис. 9. Варианты исполнения измерительных преобразователей производства фирмы TSI для контроля замковой резьбы бурового оборудования: *а* — одноканальный с насадкой для позиционирования; *б, в* — многоканальный линейный для ручного контроля; *г* — многоканальный линейный для контроля внутренней резьбы с элементами позиционирования и электроприводом

дельными дискретными отрезками или даже точечными измерениями «диаграмма-бабочка» все равно будет строиться из отдельных секторов и не изменится.

Варианты исполнения измерительных преобразователей для контроля резьбы представлены на рис. 9. Преобразователи имеют встроенный датчик перемещения, который позволяет формировать карту контроля каждого изделия с привязкой по координатам. Скорость сканирования при контроле резьбы лежит в диапазоне 30–50 мм/с. Максимальное число каналов до 32, температура эксплуатации от – 20 до + 40 °С.

В процессе контроля на экран ноутбука, входящего в состав системы, в окна выдаются сигналы B_x и B_z с выходов чувствительных элементов, совмещенный сигнал B на комплексной плоскости, информация о длине и глубине обнаруженных трещин, а также технологическая информация (рис. 10).

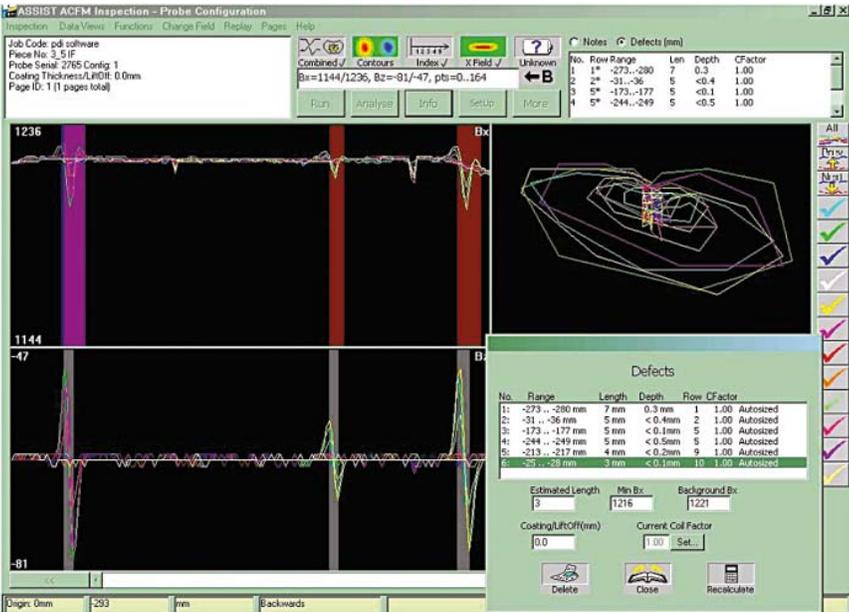


Рис. 10. Представление результатов контроля резьбы на экране ноутбука

Проведенные исследования показали, что существенное повышение чувствительности обеспечивает применение для контроля резьбы тангенциальных преобразователей с обмотками возбуждения и измерительной, форма которых в зоне контроля повторяет форму впадины резьбы и формирует во впадине линейный ток, нормальный к трещине (рис. 11). Видно, что наибольшая плотность и линейность тока имеет место именно в месте развития трещины (во впадине).

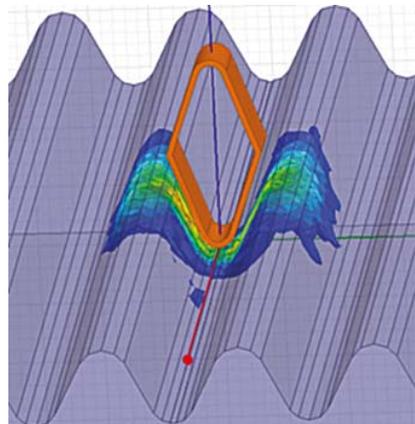


Рис. 11. Картина распределения вихревых токов, наведенных тангенциальным преобразователем, во впадине резьбы

На рис. 12 изображен трансформаторный трехобмоточный преобразователь вихретокового

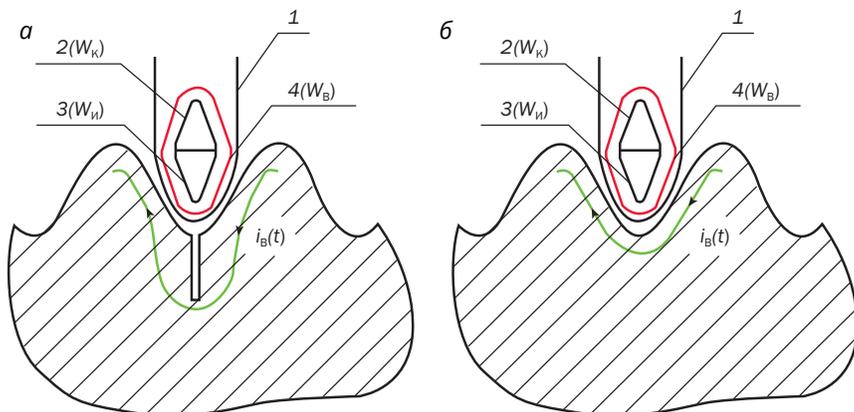


Рис. 12. Трехобмоточный трансформаторный преобразователь с тангенциальным возбуждением линейного тока во впадине резьбы. Картина линейного тока без дефекта (а) и при наличии трещины (б): 1 — корпус клинообразный; 2 — обмотка компенсационная измерительная; 3 — обмотка измерительная; 4 — обмотка возбуждения

дефектоскопа «Константа ВД1», расположенный во впадине резьбы тангенциально. Информативным параметром преобразователя является изменение фазы разностного напряжения дифференциально включенных обмоток $W_{и}$ и $W_{к}$.

Трехобмоточный преобразователь фиксируется в клинообразном корпусе, который, в свою очередь, для устранения износа закрепляется в каретке на фиксированном расстоянии от впадины резьбы (рис. 13, 14). Помимо исключения износа, зазор позволяет произво-

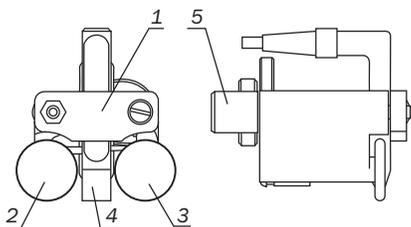


Рис. 13. Каретка с преобразователем в клинообразном корпусе: 1 — корпус каретки; 2 и 3 — удерживающие колеса; 4 — клинообразный корпус с преобразователем



Рис. 14. Сканирование резьбы вихретоковым преобразователем, закрепленным в каретке

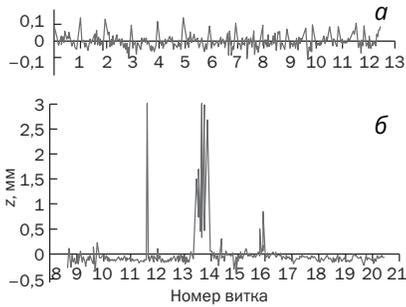


Рис. 15. Дефектограмма сканирования резьбы: а — ниппельного конца нового переходника; б — ниппельного конца трубы, отработавшей свой ресурс

дить контроль резьбы без тщательной её очистки. Толщина загрязнений может достигать 0,5 мм. Главное при этом — обеспечение отсутствия стальной стружки во впадине резьбы, которая может налипать на корпус, искажая его сигналы.

Порог чувствительности вихретоковых средств контроля (минимальная глубина обнаруживаемого дефекта) определяется нечувствительностью

преобразователя к неглубоким трещинам и влиянием мешающих параметров, в основном девиации относительной магнитной проницаемости μ металла. Так, при контроле стального изделия при частоте тока возбуждения 0,1–2 МГц для преобразователей размером 1–2 мм зона нечувствительности составляет примерно 50 мкм. Это означает, что трещины с глубиной менее 50 мкм не могут быть обнаружены. Также при контроле новых труб разброс магнитных свойств металла может приводить к возникновению ложных показаний, эквивалентных трещине глубиной $\pm 0,1$ мм. Однако при контроле труб, бывших в употреблении (отработавших свой ресурс), наблюдаются ложные показания, эквивалентные трещине глубиной до 0,25 мм. В качестве примера на рис. 15а приведена дефектограмма сканирования ниппельного конца нового переходника. Видно, что разброс μ по поверхности объекта контроля имеет преимущественно циклический характер. На рис. 15б приведена дефектограмма сканирования ниппельного конца трубы, отработавшей свой ресурс. Отчетливо видны всплески, соответствующие трещинам во впадине резьбы. Помимо них на дефектограмме видны выбросы, эквивалентные трещинам глубиной до 0,25 мм на участках без макродефектов. Причиной этих выбросов могут являться микрповреждения, накопленные металлом в процессе эксплуатации трубы.

На рис. 16 представлена дефектограмма сканирования резьбы насосно-компрессорной трубы $\varnothing 60$ мм, бывшей в употреблении, с нанесенными прорезями.

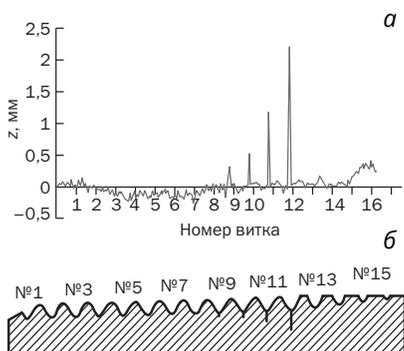


Рис. 16. Дефектограмма сканирования резьбы насосно-компрессорной трубы $\varnothing 60$ мм, бывшей в употреблении, с нанесенными прорезями глубиной 0,3; 0,5; 1 и 2 мм (а); эскиз профиля контролируемой резьбы (б)



Рис. 17. Контрольные образцы дефектов резьбы для вихретоковой дефектоскопии: а — изготовленный из ферромагнитной стали 40Х, б — изготовленный из немагнитной стали NMS 100

Для метрологического обеспечения вихретоковой дефектоскопии резьбы изготавливаются контрольные образцы, передающие требуемые характеристики изделий и глубину дефекта. Контрольные образцы изготавливаются в виде цилиндров с кольцевыми канавками, имеющими форму профиля резьбы. Во впадине электроэрозионным способом изготавливаются узкие прорезы глубиной 0,3; 0,5; 1,0 и 2,0 мм. Выпускаются контрольные образцы, имитирующие резьбы с различными шагами и формами профиля (рис. 17).

Преимуществами вихретокового контроля резьбы являются относительно высокая скорость контроля, возможность проведения контроля резьбы без её тщательной очистки, отсутствие необходимости применения расходных материалов.

Литература

1. Субботин С. С., Соколова Н. Г., Брюханов О. Ф., Михайленко В. И. Дефектоскопия нефтяного оборудования. — М.: Недра, 1975. — 264 с.
2. Языков В. А. Конечный элементный анализ напряженно-деформированного состояния резьбового соединения. — Вестник ТОГУ. Технические науки. 2007. № 1 (4). С. 111–118.
3. Семин В. И. Современные методы проектирования резьбовых соединений труб нефтегазового сортамента для строительства скважин. / Автореф. дисс. на соиск. звания д-ра техн. наук. — М.: ОАО НПО «Буровая техника» – ВНИИБТ. 2005.
4. Сясько В. А., Соломенчук П. В., Коротеев М. Ю. Вихретоковый неразрушающий контроль резьбы насосно-компрессорных труб. — Контроль. Диагностика. 2012. № 10. С. 17–22.
5. Laenen C. Application of the ACFM inspection method for the inspection of internal tank welds. <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/103.pdf>