

УДК 622.245.1(083.74)

## Испытание бурильных труб и их соединений

Островский И. Р., Сирик В. Ф., Самков В. Н.

ООО «Днепропетровский завод бурового оборудования», Днепропетровск, Украина

Поступила в редакцию 01.03.11, принята к печати 18.03.11

### Аннотация

Испытание бурильных труб проводят для определения эксплуатационных показателей: допустимой нагрузки растяжения-сжатия, прочности сварного шва, выносливости бурильной колонны, износостойкости замковых резьб. В качестве критерия допустимых напряжений принят предел текучести материала труб  $[\sigma_T]$ , коэффициент запаса прочности  $K = 1,5$ . В качестве материала бурильных труб приняты стальные горячекатаные трубы группы прочности по ГОСТ 631-75, материал замковых соединений – сталь марки 40Х и 40ХН ГОСТ 4543-71.

Ключевые слова: бурильные трубы, испытания.

Развитие техники и технологии производства бурильных труб и их соединений для бурения скважин различного назначения и конструкций дало возможность обеспечить надежным и эффективным инструментом горнодобывающую, геологоразведочную, жилищно-коммунальную промышленности. В Украине вместо резьбовых соединений буровых замков с трубами применяют прогрессивную и надежную конструкцию с приваренными замками: исключается изготовление трубной резьбы, сварка является более производительной, чем навинчивание замков с нагревом, исключается замена замков в полевых условиях и т.д.

Бурение скважин на нефть и газ с созданием горизонтальных участков, создание коммуникаций различного назначения в жилых районах городов с помощью горизонтально направленного бурения потребовало повышения качества бурильных труб и их соединений. Поэтому возникла необходимость проводить дополнительные испытания с целью определения эксплуатационных показателей бурильных колонн.

В нормативных документах и опубликованных источниках приведены требования качества изделий, методы испытаний и численные значения величин показателей [1, 2, 3].

В настоящей статье приведены методы испытаний бурильных труб различного назначения и их соединений, полученных при изготовлении их для различных условий эксплуатации. Проводились следующие испытания:

- определение допустимой растягивающей нагрузки;
- определение влияния промывочной жидкости, содержащей раствор кислоты, на выносливость труб;
- определение допустимой изгибающей нагрузки на сварной шов бурильных труб с приваренными замками;
- определение средней наработки до отказа тела трубы;
- определение влияния вида упрочнения замковой резьбы на среднюю наработку до отказа.

В качестве критерия прочности материала принято  $0,8\sigma_T$  величины предела текучести материала трубы.

Величина растягивающего усилия определялась по формуле

$$F = 0,8\sigma_T \cdot 0,785(D^2 - d^2) \cdot 10^{-3}, \text{ кН}$$

где  $F$  – расчетное значение растягивающей нагрузки, прилагаемой к образцу бурильной трубы, кН;  $\sigma_T$  – предел текучести материала трубы, МПа;  $D$  – наружный диаметр трубы, м;  $d$  – внутренний диаметр трубы, м.

Величина изгибающего момента, приложенного к концу бурильной трубы, определялась по формуле

$$M = F_{и} \cdot 0,5 \cdot l \cdot W_{и} \cdot 0,8 \cdot \sigma_m = F_{и} \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot D^3 \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right] \cdot \sigma_m, \text{ кН}\cdot\text{м}$$

где  $F_{и}$  – величина усилия, приложенного к сварному шву бурильной трубы, кН;  $l$  – расстояние между опорами устройства для испытания изгибающего момента, м;  $W$  – момент сопротивления изгибу,  $\text{м}^3$ .

Момент сопротивления изгибу бурильной трубы определяется по формуле

$$W = \frac{\pi \cdot D^3}{32} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right] = 0,1 \cdot D^3 \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right], \text{ м}^3.$$

Изгибающий момент при известном расстоянии между опорами задается из расчета

$$F_{и} = M : l, \text{ кН.}$$

Длительность приложения нагрузки при растяжении и изгибе образцов труб должна быть не менее 5 минут. После снятия нагрузки образец трубы должен принять форму, какую он имел до приложения нагрузки. Если деформации образца не исчезают, то необходимо определить показатели механических свойств и химический состав стали образца и выбрать нагрузки, соответствующие фактическим параметрам материала труб.

### **Испытание труб на растяжение.**

Основной задачей испытания труб на растяжение является определение допустимого значения осевой нагрузки при бурении скважин вращательным способом.

Испытания проводятся на специальной разрывной машине, выполненной в виде горизонтального гидравлического пресса. Машина имеет стационарную раму со специальными захватами в виде Т-образных упоров для присоединения испытуемых образцов. Машина имеет следующие параметры технической характеристики:

Максимальное усилие растяжения-сжатия, кН(тс)	1100(110);
Длина образцов бурильных труб, м	1,20...3,6;
Диаметр образцов, мм	27...114;
Рабочее давление маслонасоса, МПа(кгс/см <sup>2</sup> )	29(290);
Габаритные размеры, м	4,5x1,2x0,8;
Масса, кг	600.

Растягивающее усилие измеряется электронным манометром, имеющим настройку задаваемого давления (растягивающего усилия), при котором маслонасос отключается. Усилие растяжения задается в соответствии с программой испытаний и выбирается из расчета достижения предела текучести материала  $0,8\sigma_T$  или разрыва трубы или сварного шва.

Испытание проводится на образцах, изготовленных по принятой технологии, в частности, с приваренными замками из материалов с различными механическими свойствами и подвергшимся термохимическому упрочнению и термической обработке. На рис. 1 изображен образец бурильной трубы для горизонтально направленного бурения с замковым соединением (ниппелем и муфтой) приваренными при нагревании за счет трения. Опытное соединение имеет два конструктивных исполнения: в виде тупикового торцевого сварного шва и с наличием полости на контактной поверхности приварной детали замка для размещения в ней части образовавшегося при нагревании грата.

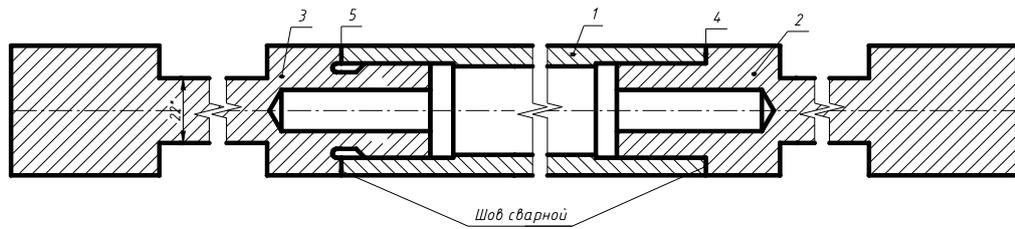


Рис. 1. Образец трубы 45×5 с приварными элементами замка при нагревании за счет трения  
 1 – труба 45×5 из стали 30ХГСА; 2 – приварной упор с образованием сварного шва без зазора между плоскостями; 3 – приварной упор с наличием полости (камеры) для размещения грата; 4 – вид (форма) торцов свариваемых деталей без наличия открытой полости; 5 – вид торцов деталей с наличием полости (камеры) для размещения грата

В качестве материалов для изготовления образца принята горячекатаная труба по ГОСТ 8732-78 диаметром 45 мм с толщиной стенки 5 мм из стали марки 30ХГСА по ГОСТ 8731-87 и приварные замковые детали из круглого проката сталь марки 40Х ГОСТ 4543-71, подвергшиеся термической обработке с твердостью по Бринеллю  $HV = 255...321$ .

Испытания проводились до разрушения образца – разрыва при максимальном усилии растяжения. Разрушение произошло по телу трубы 45х5 в виде уменьшения диаметра и разрыва трубы. Сварные швы оказались прочнее материала трубы и не разрушились. При анализе качества сварных швов оказалось, что тупиковый шов образовался с увеличенным размером наружного грата и незначительным непроваром материала приварного замка. Разрушение трубы произошло при усилии 304 кН (31,0 тс) то есть напряжения растяжения в момент разрушения составили  $\sigma_p = 494 \text{ МПа} = 1,3\sigma_T$ .

### Испытание труб на изгиб

Испытание бурильных труб с приваренными замками является альтернативой испытанию на растяжение. Этот способ дает более надежные результаты и дает возможность вскрыть микротрещины в сварном шве и выявить скрытые дефекты, которые другими способами не определяются. Так при приложении растягивающей нагрузки, соответствующей  $0,8\sigma_T$ , сварной шов не разрушится при наличии микротрещины или недостаточного нагрева металла на площади поперечного сечения до 0,25 от общей площади сварного шва. Однако при бурении скважины при возникновении знакопеременных напряжений в сварном шве произойдет разрушение соединения.

На рис. 2 приведен чертеж приставки к разрывной машине. Приставка состоит из упора 1, закрепленного с помощью болтов на подвижном поршне гидравлического пресса; пространственной опоры 2, закрепленной на неподвижной стенке пресса и крепежных болтов 3. Образец бурильной трубы в горизонтальном положении опирается на выступы опоры при размещении сварного шва на середине опоры.

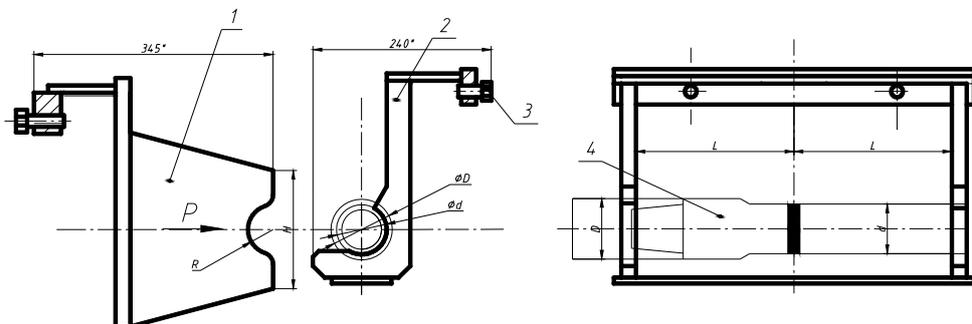


Рис. 2. Приставка к разрывной машине ДЗБО для испытания труб на изгиб  
 1 – упор; 2 – опора; 3 – болты; 4 – испытуемый образец сварного шва

Испытание на изгиб производится следующим образом. На манометре гидравлического пресса устанавливается предельное давление масла в гидроцилиндре, при котором усилие  $P$  равно величине

усилия, определенного из условия достижения напряжений изгиба в теле буровой трубы  $0,8\sigma_T$ . В табл. 1 приведены рекомендуемые значения усилия и давления масла в гидроцилиндре разрывной машины ДЗБО для различных размеров буровых труб при группе прочности материала К (предел текучести  $\sigma_T = 500$  МПа).

Таблица 1 – Рекомендуемые значения изгибающего момента и усилия при испытании буровых труб и сварного шва

Показатель	Ед. изм.	Величина показателя для труб при значениях DхS, мм							
		43×4,5	55×4,5	63,5×4,5	70×4,5	80×4,5	73×9	89×9	102×9
Момент сопротивления W	мм <sup>3</sup>	4850	8480	11780	14400	18430	28900	24670	32900
Изгибающий момент M <sub>и</sub>	Нм	194	326	471	576	884	560	987	1315
Усилие на упоре F	кН	13	22	31	38	59	37	66	88
Давление на насосе p	МПа	34	57	81	100	150	98	170	230

Испытания буровых труб с приваренными замками проводятся путем приложения расчетной нагрузки в точке нахождения сварного шва (наружный грат удаляется в процессе приварки элементов замка) в трех положениях через  $120^0 \pm 5^0$ . Буровая труба не должна разрушаться в месте сварного шва и после снятия нагрузки должна принять первоначальное положение без искривления и перекоса оси трубы.

Способ испытание труб при изгибе в ДЗБО применялся в процессе отработки технологии сварки и выбора оптимальных режимов сварки трением. При испытаниях буровых труб с приваренными замками на оптимальных режимах брак сварного шва выявлен не был.

### Испытание буровых труб на выносливость

Государственным стандартом Российской Федерации ГОСТ Р 51245-99 [2] предусмотрены испытания на выносливость путем определения средней наработки до отказа тела трубы, сварного и резьбового соединения при следующих условиях нагружения:

- вид нагружения – усталостное воздействие путем знакопеременного консольного изгиба с вращением;
- частота вращения нагруженного элемента – 1440 об/мин;
- момент затяжки резьбового соединения перед началом нагружения 700...4700 Нм в зависимости от типоразмера труб;
- изгибающий момент при нагружении 400...3000 Нм в зависимости от типоразмера трубы.

В [3] приведена методика и описание испытательного стенда, применяемых при проведении исследований и заводских испытаний при разработке и испытании новых конструкций буровых труб и их соединений. В качестве объектов испытаний использовались следующие конструкции труб, соединений и среды, в которой они эксплуатируются:

- геологоразведочные стальные буровые трубы муфтово-замкового и ниппельного соединения;
- геологоразведочные трубы с приваренными замками;
- стальные буровые трубы для горизонтально направленного бурения с приваренными замками;
- в качестве рабочей среды (промывочной жидкости) применялись воздух, техническая вода и вода с добавкой серной кислоты.

ООО ДЗБО разработал колонну буровых труб для бурения скважин в условиях АО «Волковгеология» при скважинной добыче твердого полезного ископаемого подземным выщелачиванием. В качестве промывочной жидкости и промышленного агента для растворения солей урана используют сульфатные воды с показателем pH ≤ 4,5...5 [6], то нами проведены испытания с целью определения оптимального соединения буровых труб, обеспечивающего максимальную выносливость.

Испытания проводились при следующих параметрах:

- объект испытаний: труба бурильная 68x7 из стали марки 30ХГСА с приварными элементами замка из стали марки 40ХН, сварка выполнена с нагревом деталей трением; аналог - бурильные трубы 68x7 из стали марки 30ХГСА с замками из стали марки 40ХН свинченными ниппельной резьбой Сп68x5,08;
- частота вращения 1440 об/мин;
- момент изгибающий 1,5 кНм создавался грузом с массой 150 кг.

В процессе испытаний выполнялся контроль водородного показателя рН и периодически добавляли серную кислоту для поддержания кислотного показателя не выше рН = 5,0.

В табл. 2 приведены результаты испытаний.

Таблица 2 – Результаты сравнительных испытаний бурильных труб с различными соединениями

Тип соединения	Среда	рН	Время испытаний, час	Наработка, цикл	Примечание
Резьба Сп68x5,08	Вода	7,0	9,8	0,85·10 <sup>6</sup>	Обрыв ниппеля
	Вода+H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,5...5	4,9	0,42·10 <sup>6</sup>	Обрыв ниппеля
Сварка трением	Вода	7,0	16,2	1,4·10 <sup>6</sup>	Обрыв трубы
	Вода+H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,5...5	13,3	1,1·10 <sup>6</sup>	Обрыв по шву

По результатам испытаний изготовлена партия бурильных труб 68x7 с приварными замками с нагревом трением и высадкой концов. По итогам опытного бурения установлено, что ресурс работы колонны увеличился в 2,0 раза при росте показателей бурения: средняя механическая скорость бурения увеличилась в 2,2...2,5 раза и проходка на долото увеличилась в 1,5...1,8 раза.

### Испытание упрочненной замковой резьбы

С развитием техники и технологии бурения разведочных, технических, технологических и эксплуатационных скважин на твердые, жидкие и газообразные полезные ископаемые выросли требования к качеству и надежности бурового инструмента, в частности повышение средней наработки замковой резьбы до отказа. Нарботка должна быть не менее 800 циклов свинчивания-развинчивания для геологоразведочных труб [2]. Техническими условиями на изготовление замковых резьб предусмотрено упрочнение профиля путем индукционной термообработки токами высокой частоты.

ООО ДЗБО производит замки 3-42, 3-50 и 3-63,5 для геологоразведочных труб с упрочнением профиля резьбы токами высокой частоты до твердости 49...57HRC на глубину 3,3...5,0 мм. Замковые резьбы нефтяного сортамента и труб для горизонтально направленного бурения применяется термохимическое упрочнение - азотирование на глубину 0,3...0,8 мм до твердости  $\geq 450\text{HV}$ .

Для определения фактической наработки резьбы до отказа ДЗБО провел сравнительные испытания образцов замковых резьб 3-35Сп, прошедших различные методы упрочнения профиля резьбы: объемную закалку до твердости НВ = 255..321, индукционную ТВЧ до твердости HRC = 49...57 и термохимическую до твердости 450HV.

На рис. 3 приведен чертеж приставки к трубообороту ПО-49А, входящего в состав стенда для определения средней наработки резьбы на отказ замков 3-42, 3-50 и 3-63,5 в соответствии с требованиями ГОСТ 7918-75. Приставка состоит из стакана 1, закрепленного на опоре нижней 3 с помощью болтов 8 и гаек 9, опора лысками входит в прорези подкладной вилки. К опоре нижней, имеющей муфтовую резьбу 3-35Сп, присоединен ниппель 5, имеющий наружные резьбы на обоих концах, верхний конец соединен с удлинителем 2, имеющим муфтовую резьбу 3-35Сп.

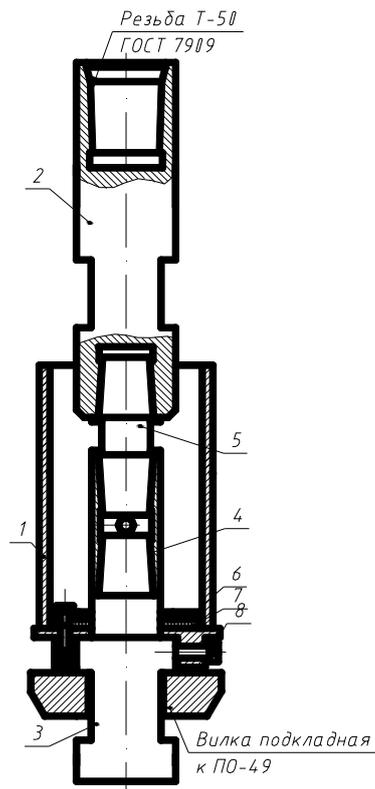


Рис. 3. Приставка к стенду для определения средней наработки замковой резьбы на отказ  
1 – стакан; 2 – удлинитель; 3 – опора нижняя; 4 – муфта; 5 – ниппель; 6 – диск; 7 – прокладка; 8 – болты; 9 – гайки.

В стакан заливают глинистый раствор нормального качества, в который добавляют до 5% кварцевого песка зернистостью 0,1...0,2 мм. К верхнему удлинителю прикреплен груз, равный массе буровой свечи. Испытания проводили путем вращения системы резьб при свинчивании и развинчивании пары резьб, имеющих одинаковую твердость профиля резьбы. Вторая пара резьб ниппеля и муфты были затянуты с большим моментом и не вращались. Затем меняли пару резьб по назначению: первую пару свинчивали с большим моментом, а вторую – свинчивали и развинчивали до окончания испытаний.

Оценку качества упрочнения проводили путем сравнения износа профиля резьб за время испытаний. Количество циклов (время испытаний) было одинаковым, а оценка относительного качества упрочнения принята по остаточному зазору между упорным торцом муфты и упорным уступом ниппеля, то есть изменение натяга резьбы. В качестве аналога принята резьба, подвергшаяся индукционной обработке токами высокой частоты.

В результате испытаний было установлено следующее:

– количество циклов свинчивания-развинчивания было одинаковым для всех образцов резьб (три пары) и составляло 900...940 циклов;

– уменьшение расстояния  $L$  между торцом и уступом составило: для резьб с упрочнением ТВЧ  $L = 32 - 25 = 7$  мм; для резьб с объемной закалкой  $L = 32 - 15 = 17$  мм; для резьб упрочненных азотированием  $L = 32 - 22 = 10$  мм;

– после испытаний все резьбы были изношены незначительно и могут использоваться при бурении скважин.

### Выводы и предложения

1. При разработке бурильных труб с приваренными замками необходимо проводить испытание на изгиб до достижения напряжений изгиба в сварном шве до  $0,8\sigma_T$  вместо растяжения.
2. В результате испытаний образцы должны принять первоначальную форму, что свидетельствует о том, что напряжения в металле не достигли предела текучести и образец выдержал испытание.
3. Термохимическое упрочнение профиля резьбы азотированием незначительно уступает индукционной обработке резьбы ТВЧ и может применяться при изготовлении буровых замков.

### Библиографический список

1. ГОСТ 5286-75 Замки для бурильных труб. Из-во стандартов. 1976, М.;- 24 с.
2. ГОСТ Р 51245-99 Трубы бурильные стальные универсальные. Общие технические условия. Госстандарт России. М.;-12 с.
3. Дудля Н.А., Викторов Г.Н., Кириченко Г.Н., Островский И.Р. Бурильные трубы геологоразведочного сортамента. Монография. Днепродзержинск, «Издательский дом «Андрей», 2007. -207 с.
4. Госгортехнадзор России. «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности». Утверждены Госгортехнадзором России 14.12.1992. – М.: НПО ОБТ, 1993. – 130 с.
5. Мислюк М.А., Рибичч І.Й., Яремійчук Р.С., Буріння свердловин. Том перший. Загальні відомості. Бурові установки. Обладнання і інструмент. – Київ, «Інтерпрес ЛТД», 2002.- 540 с.
6. Калавин А.И. Добыча полезных ископаемых подземным выщелачиванием. - М.: Атомиздат, 1996. – 369 с.

© Островский И. Р., Сирик В. Ф., Самков В. Н., 2011.

### Анотація

Випробування бурильних труб проводять з метою визначення експлуатаційних показників: допустимого навантаження розтягування-стискання, міцності зварного шва, витривалість бурильної колони, стійкість до зношення замкової різьби. Критерієм допустимих напружень є гранична текучість матеріалу труб  $[\sigma_T]$ , коефіцієнт запасу міцності  $K = 1,5$ . В якості матеріалу бурильних труб взято сталеві гарячодформовані труби груп міцності за ГОСТом 631-75, матеріал замкових з'єднань – сталь 40Х і 40ХН ГОСТ 4543-71.

Ключові слова: бурильні труби, випробування.

### Abstract

Drill pipe test main purpose is estimating performance parameters: strain load limit, strength of welded seam, drill string durability, wear resistance. Limit load criteria is material yield strength  $[\sigma_T]$ , assurance factor  $K = 1,5$ .

Keywords: drill pipes, test.