

УДК 621.7

## ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ И ОЦЕНКИ РИСКОВ ЗАТОРМОЖЕННОСТИ В ИЗВИЛИСТОЙ ТРАЕКТОРИИ СКВАЖИНЫ

*Али Фархан Мутер Аль-Шаббани,  
Попов М. Е.*

Донской государственный технический  
университет, Ростов-на-Дону, Российская  
Федерация

Исследование направлено на оценку усталости и риска блокировки бурильных труб на извилистой траектории, поскольку циклическая нагрузка, возникающая при вращении изогнутых бурильных труб в резком искривлении, более опасна, чем вращающиеся изогнутые бурильные трубы. Благодаря внедрению бурильных труб из алюминиевого сплава 2024 в бурильную колонну можно ускорить операцию бурения, не оказывая вредного влияния на целостность бурильной колонны. Полученные результаты показали, что стальные бурильные трубы имеют лучшие механические свойства, по сравнению с бурильными трубами из алюминиевого сплава 2024. Последние имеют лучшее сопротивление усталости даже при одновременном наличии высокого приложенного крутящего момента и осевой нагрузки, а также при сильных искривлениях ствола.

**Ключевые слова:** бурильная колонна, усталость, отказ сплава 2024, изгиб, циклическая нагрузка, влияние, механические свойства, бурильная труба, напряжение, глубина, алюминий, прочность, анализ, вращающегося.

**Введение.** Стальные бурильные трубы, составляющие значительную часть бурильной колонны для бурения на нефтяном месторождении, при работе в сложных условиях нагрузки подвергаются комбинированному растяжению, сжатию, кручению и изгибу (рис. 1). Они работают и при различных условиях окружающей среды. Отказ бурильной трубы из-за усталости, коррозии, в том числе под напряжением, очень распространены в полевых условиях.

Точно так же тяжелые усталостные отказы бурильных труб часто происходят на нефтяных месторождениях, потому что бурильные трубы несут постоянно меняющиеся растягивающие, скручивающие и ударные нагрузки, а также внутренние давления во время бурения. Ученые всегда

UDC 621.7

## ASSESSMENT OF FATIGUE FAILURE OF THE DRILL STRING AND RISK ASSESSMENT OF INHIBITION IN THE WINDING WELL TRAJECTORY

*Ali Farkhan Matar Al Shabbani,  
Popov M.E.*

Don State Technical University, Rostov-on-Don,  
Russian Federation

The aim of this paper is to assess the risks of failure due to fatigue and the risk of blocking of drill pipes on a winding path, because the cyclic load arising from the rotation of curved drill pipes in sharp curvature is more dangerous than rotating curved drill pipes. By integrating 2024 aluminum alloy drill pipes into the drill string, you can extend the drilling operation without adversely affecting the integrity of the drill string. The results showed that, although steel drill pipes have better mechanical properties compared to aluminum alloy drill pipes 2024, the latter have better fatigue resistance even with the simultaneous presence of high applied torque and axial load, as well as at strong bending of the barrel.

**Keywords:** drill string, fatigue, failure, alloy 2024, bending, cyclic load, influence, mechanical properties, drill pipe, stress, depth, aluminum, strength, analysis, rotating.

видели, что при использовании бурильных труб из алюминиевого сплава, вместо стальных бурильных труб, эти проблемы могут быть уменьшены. Например, (Legarthand Lehner) (2015) заявили, что по опыту легкие бурильные трубы при правильном использовании могут привести к снижению нагрузки на бурение, снижению крутящего момента и сопротивления, что делает возможным более расширенные глубины бурения. Алюминиевые бурильные трубы не такие прочные, как стальные бурильные трубы, имеют более низкий предел изгиба и значительно более длительный срок службы усталости, потому что их низкий Модуль (Юнга) снижает номинальное напряжение изгиба в три раза.

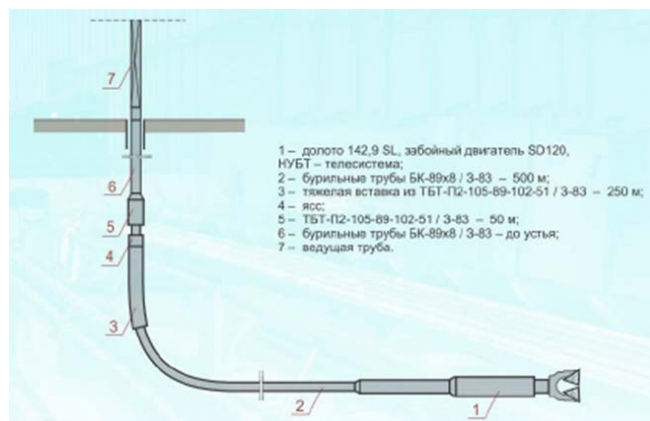


Рис. 1. Бурильная колонна

Хотя такой подход к использованию бурильных труб из алюминиевого сплава интересен, он, тем не менее, не учитывает износ и коррозию в дополнение к высоким температурам.

В этом контексте данная работа — это попытка представить новый подход к выбору нового материала — алюминиевого сплава 2024 (Abdelbakiand Atmani, 2002), который подвергается поверхностной обработке, чтобы обеспечить хорошую износостойкость и устойчивость к коррозии при высокой температуре. Предлагаемый материал был поверхностно обработан (плазма) и подвергнут электролитическому окислению (PEO), благодаря чему он улучшал свои механические свойства, с одной стороны, и уменьшал крутящий момент и сопротивление нагрузки, сохраняя при этом хорошее сопротивление осевым, скручивающим и боковым нагрузкам, с другой.

**Методология.** Новый материал (поверхностно обработанный алюминий 2024) был применен в бурильной колонне. Исследовано его поведение во время бурения отверстий диаметром 0,2159 м и длиной от 2926 до 5400 м. С использованием программного обеспечения (SoftModelingDecisionSpaceWell), были определены границы, в которых алюминиевая бурильная труба может бурить без сбоев в этом интервале. Соответственно, был рассмотрен технический обзор проблем получения сечений скважин диаметром 0,2159 м сначала в скважине, пробуренной в Алжире, а затем дан краткий обзор неисправностей с использованием стальной бурильной колонны, по сравнению с бурильными трубами из алюминиевого сплава 2024. Проведен анализ их поведения во всем интервале бурения с использованием (StiffModellingDecisionSpaceWellEngineeringSoftware). Полученные результаты проанализированы, дана их интерпретация с целью выявления оптимального решения проблемы.

#### Технический обзор бурения отверстий с диаметром сечения 0,2159м

В рамках программы бурения планировалось установить 7-футовый (0,1778 м) эксплуатационный вкладыш в основании силурского блока В2 на (5,420) м, где ранее на этом интервале встречались такие серьезные проблемы, как нестабильность ствола скважины, а также дифференциальное прилипание, промывка скважины и обвалы. Это было одной из основных проблем, с которыми можно столкнуться при бурении этого раздела. Кроме того, исследования

структуры пласта Trias (Триас) показали тенденцию к пустотам для всей исследуемой фазы. Чтобы предотвратить это, рекомендуется бурить пласт Trias с ламинарным потоком, который достигается путем увеличения предела текучести до примерно 200–8640 МПа и снижения расхода примерно до 84 м<sup>3</sup>/ч. Это должно обеспечить надлежащую очистку скважины, если только не происходит обрушение и возникновение проблем. В этом случае расход должен быть увеличен до более обычного 108 м<sup>3</sup>/ч. В разрезе скважины использовано около 3557,45 м бурильных труб с номинальным диаметром 0,127 м для бурильной трубы класса G и ВНА выше к поверхности. Это должно обеспечить 375 692,76 Н избыточного запаса, в зависимости от условий сопротивления отверстия. Температура может превышать 7 773,15 К, а давление — 51,71 МПа.

## 2.2 Метод анализа данных нагрузки

Нормальный анализ включает в себя расчет крутящего момента, сопротивления и нормальной силы, кроме осевых и изгибающих сил, а также других параметров, выполняемых для следующей бурильной колонны. Все расчеты выполняются с долотом в одной позиции в стволе скважины и с одним набором эксплуатационных параметров, с использованием модели жесткой колонны для построения графиков напряжений вдоль бурильной колонны, графика опоры ног, графика боковых сил и вращение на нижнем графике, кроме графика усталости для бурильных труб G105 и поверхностно обработанных бурильных труб из алюминиевого сплава 2024.

### Результаты нагрузки. Напряжения в стальной бурильной трубе

Наиболее замечательный результат (таблица 1), полученной от инженера по скважинам (DSHalliburtonSoftware), который показывает степень наибольшего искривления в зависимости от измеренной глубины (MD), заключается в том, что проблема наибольшего искривления перевешивает отказ других напряжений при вращении на нижних операциях.

Таблица 1

Степень наибольшего искривления (m/30°) для стальной бурильной трубы

Глубина, м	Замеры TVD, м	Степень наибольшего искривления, °/30м
3 051,00	3 049,67	8,004
3 058,82	3 057,26	8,283
3 060,00	3 058,40	8,901
3 067,96	3 066,02	9,933
3 077,11	3 074,62	10,945
3 087,00	3 083,69	11,715
3 095,40	3 091,20	11,153
3 096,00	3 091,74	10,278
3 105,00	3 099,65	9,241
3 113,68	3 107,21	3,511
3 114,00	3 107,49	3,253

Таким образом, ясно видно, что с 3 051,00 м до 3 131,97 м степень наибольшего искривления находится в диапазоне от 8 до 11,71°/30 м. Впоследствии эффект изгиба значительно снижает сопротивление разрушению, а степень наибольшего искривления превышает 10°/9,14 м, как заявлено (Lubinski 1961), что приводит к проблеме усталости.

Кроме того, серьезное искривление ствола может также оказывать боковое усилие на бурильные трубы и соединения инструментов, как показано в таблице 2, которая отображает боковое усилие на единицу длины в колонне во время операций бурения и расположенные точки вдоль скважины, которые могут подвергаться воздействию высоких сил. Отмечено, что, если эти последние

превышают 8 896 Н, как сообщалось ранее (Menand, 2012), это может вызвать проблемы с посадочным местом и поломку отказов инструментальных соединений.

Таблица 2

Боковое усилие для стальной бурильной трубы

Истинная вертикальная глубина, м	Боковое усилие, Н
3 051,08	20 986,231
3 059,90	23 634,026
3 068,60	25 203,090
3 077,12	22 261,095
3 085,43	13 435,110
3 093,55	5 982,056
3 101,55	14 513,842
3 109,47	24 516,625
3 117,15	15 396,440
3 124,53	774,725
3 131,77	1 657,323
3,138,98	1 353,317
3,146,18	3 893,240
3,153,33	9 139,797
3,160,38	10 512,728

### Напряжения в алюминиевой бурильной трубе

Предложенное решение состоит в простой замене соединений стальных бурильных труб на более легкие алюминиевые бурильные трубы при сохранении того же узла забоя скважины и замков, изготовленных из стали. Был проведен анализ крутящего момента и сопротивления с помощью программного обеспечения для проектирования скважин DecisionSpace, чтобы ограничить оптимальное количество соединений вдоль бурильной колонны и минимизировать трение. В таблице 3 представлены детали каждой спецификации бурильной колонны с последующим анализом напряжений при вращении на дне скважины в таблице 4.

Таблица 3

Детали в каждой конкретной бурильной колонне

Параметр	Сталь/Стальная бурильная труба		Алюминий/Стальная бурильная труба	
	класс	класс	класс	класс
Диаметр отверстия 0,127 м	G105	G105	AL2024	S135
Глубина (м)	5 420	600	150	2 988,5
Предел текучести (МПа)	723,94	723,94	359	723,94
Прочность на растяжение (МПа)	792,89	792,89	467	792,89
Модуль Юнга (МПа)	206 842,71	206 842,71	88 763	206 842,71
Предел выносливости к усталости (МПа)	137,89	137,89	160	137,89

Анализ для алюминиевой бурильной трубы 2024 при вращении на дне скважины

Глубина бурильной трубы (м)	отказ Усталость	отказ напряжения	отказ коробление	Отказ вращающего момента	Изгибающее напряжение (МПа)	Коэффициент увеличения напряжения при изгибе	напряжение фон Мизеса (МПа)	фон Коэффициент Мизеса	Коэффициент усталости
3,055.22	-	-	-	-	59.840	8.322	197.121	0.548	0.476
3,063.55	-	-	-	-	64.80	8.252	197.328	0.549	0.514
3,071.88	-	-	-	-	63.97	8.182	193.693	0.527	0.506
3,080.22	-	-	-	-	52.128	8.113	189.572	0.471	0.49
3,088.55	-	-	-	-	29.847	8.044	169.362	0.471	0.235
3,096.88	-	-	-	-	31.521	7.976	169.138	0.471	0.247
3,105.22	-	-	-	-	34.177	7.91	169.420	0.52	0.267
3,113.55	-	-	-	-	66.716	7.843	186.974	0.522	0.52
3,121.88	-	-	-	-	71.696	7.777	187.474	0.447	0.558
3,130.22	-	-	-	-	29.234	7.712	160.525	0.448	0.227

В отличие от результатов, полученных из стальной бурильной трубы, алюминиевая бурильная труба 2024 имеет значительно лучшее сопротивление усталости даже при одновременном наличии высокого крутящего момента и осевой нагрузки в дополнение к тяжелым изгибам. Это было подтверждено значением коэффициента усталости, которое составляет менее 1 примерно 0,558, как показано в таблице 4.

**Выводы.** Даже несмотря на то, что стальные бурильные трубы имеют лучшие механические свойства с точки зрения плотности, модуля Юнга, предела текучести и прочности на разрыв, чем бурильные трубы из алюминиевого сплава 2024, последние имеют хорошее сопротивление усталости даже при одновременном наличии высокого прилагаемого крутящего момента, осевой нагрузки и сильных изгибов, что делает использование других опций (стальная бурильная труба и титановая бурильная труба) нецелесообразным с точки зрения усталостного разрушения.

Кроме того, результаты показывают, что ограничивающим фактором для использования алюминиевой бурильной трубы в таких тяжелых условиях является не сопротивление усталости материала трубы, а высокие контактные силы между стволом скважины и стенкой бурильной трубы. Следовательно, алюминий 2024 испытывает гораздо меньше усталостных повреждений, чем стальная бурильная труба в области изгиба. Это свойство обусловлено низкой жесткостью трубы.

Большие контактные силы на корпусе трубы могут вызвать относительно большие царапины на поверхности трубы. Стальная бурильная труба может сделать характеристики их коррозионной стойкости незначительными. Но алюминиевая бурильная труба 2024 обладает хорошей устойчивостью к износу и коррозии даже при высокой температуре, что приводит к уменьшению загрязнения окружающей среды, по той причине, что материал был поверхностно обработан «plasmaelectrolytioxidationPEO», а это улучшило их механические свойства.

Наконец, можно предположить, что при использовании алюминиевых бурильных труб существует значительная экономия топлива, по сравнению со стальными бурильными трубами, поскольку отношение мощности двигателя, необходимой для подачи бурового раствора под требуемым давлением (ADP), по сравнению со стальной бурильной трубой, оказывается ниже, что приводит к снижению потребления топлива и меньшему загрязнению окружающей среды.

#### Библиографический список

1. Abdel Salam M., Mahmud A., 2016. Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry, Applied thermal engineering journal, Elsevier, ISBN: 9780081001172.



2. Abdelbaki N., Atmani D., 2002. Test of an aluminum alloy treated superficially using oxidation by electrical micro-arc to the fissures formation under tension. 15th International Congress of Chemical and Process Engineering, Prague, 25–29.

3. Legarth B., Lehner H., 2015. Changing the Game from Steel to Aluminum Drill Pipe: Results from Full String Aluminum Alloy Drill Pipe Deployment to Enhance Extended Reach Drilling Performance, Drilling Aluminum Alloy Drill Pipe Deployment to Enhance Extended Reach Drilling Performance, Drilling

4. Lubinski A., 1961. Maximum permissible dog-legs in rotary boreholes, J. Pet Tech 13 -2, 175-194.

5. Lubinski A., 1950. A study on the buckling of rotary strings, API drilling production practice, 178-214.

6. Menand S., 2012. A New Buckling Severity Index to Quantify Failure and Lock-up Risks in Highly Deviated Wells. Drilling and Completions Conference, Galveston, Texas, USA, 20–21 June. SPE 151279.

7. Menand S., Jeffrey L.K., 2014. Successful use of mixed aluminum-steel drill pipe string in complex horizontal wells, Deep water Drilling and Completions Conference, USA, 10-11 September. SPE-170255-MS.