УДК 622.248.9+621.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАКАПЛИВАЕМЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ КНБК[1] ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ БОКОВЫХ СТВОЛОВ СКВАЖИН

DETERMINATION OF ACCUMULATED DAMAGE IN THE THREADED CONNECTIONS OF THE BHA DURING MILLING OF LATERAL BOREHOLES

Хакимов Денис Азатович
магистрант кафедры механика и конструирование машин,
Уфимский государственный
нефтяной технический университет
den.khakimov.01@mail.ru

Чистов Дмитрий Игоревич
кандидат технических наук,
доцент,
доцент кафедры механика и конструирование машин,
Уфимский государственный
нефтяной технический университет
chistov.mf@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу усталостных повреждений при фрезеровании бокового ствола скважины. Исследования проведены методом конечных элементов и теорией накопленных повреждений. Полученные данные показали значения эквивалентных напряжений. Результаты исследования имеют практическое значение для оценки долговечности фрезерной компоновки.

Ключевые слова: фрезерная компоновка, усталостное разрушение, граничные условия, суммирования повреждений.

Khakimov Denis Azatovich
Master's Student of the Department
of Mechanics and Machine Design,
Ufa State Petroleum Technological University
den.khakimov.01@mail.ru

Chistov Dmitry Igorevich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Mechanics and Machine Design,
Ufa State Petroleum Technological University
chistov.mf@mail.ru

Annotation. The article is devoted to the analysis of fatigue damage during milling of the lateral borehole. The research was carried out by the finite element method and the theory of accumulated damage. The data obtained showed the values of equivalent voltages. The results of the study are of practical importance for assessing the durability of the milling arrangement.

Keywords: milling layout, fatigue failure, boundary conditions, damage summation.

Предотвращение аварийных ситуаций при бурении представляет собой одно из ключевых мероприятий, направленных на увеличение эффективности, снижение затрат на метр проходки и рост коммерческой скорости бурения.

Компании, занимающиеся заканчиванием скважин с использованием технологий TAML, применяют широкий ассортимент конструкций фрез. Они используются как для зарезки «окна» в обсадной колонне, так и для работы в открытом стволе скважины [1, с. 406].

Компоновки для забуривания бокового ствола включают в себя три основных элемента: оконный фрез, расширяющий фрез и калибрующий фрез (рис. 1).

Рисунок 1 – Общий вид фрезерной компоновки для «зарезки» бокового ствола

Элементы компоновки в ходе фрезерования подвергаются воздействию существенных продольных и поперечных нагрузок, а также крутящего момента. Важно отметить, что, помимо статической составляющей, все указанные силовые факторы включают в себя дополнительную динамическую составляющую.

Фрезерная компоновка, применяемая при завершении скважин по технологии TAML, обычно используются совместно с отклоняющим клином. В результате, при выполнении операций по вырезке окна, в элементах компоновок возникают значительные изгибающие напряжения. Наиболее слабыми звеньями фрезов являются замковые резьбовые соединения, поэтому для оценки остаточного срока

[1] КНБК – компоновка низа бурильной колонны.

службы фреза в целом, необходимо располагать информацией о накопленных усталостных повреждениях именно в этих резьбовых участках [1, с. 406].

Решение задачи по оценке напряженного деформированного состояния было выполнено методом конечных элементов в программной среде ANSYS®. На первом этапе были заданы тип и размеры сетки для всей сборки. Метод построения сетки MultiZone, размер сетки для всего фрезерного инструмента составит 10 мм, а в области соединения фрез размер сетки должен соответствовать 5 мм. В результате, финальная окончательный вариант сетки представлен на рисунке 2 [3, с. 10].

Рисунок 2 – Сетка 3D сборки фрезерной компоновки

Создав трехмерную сетку модели сборки, были заданы необходимые граничные условия. В качестве таких условий использовались: remote displacement, remote force, force и moment [3, с. 10]. Условие remote displacement применялось к первой точке касания бурильных труб, расположенных выше фрезерной компоновки и на выступающие фрезерующие элементы с ограничениями по перемещению и вращению относительно оси X (рис. 3).

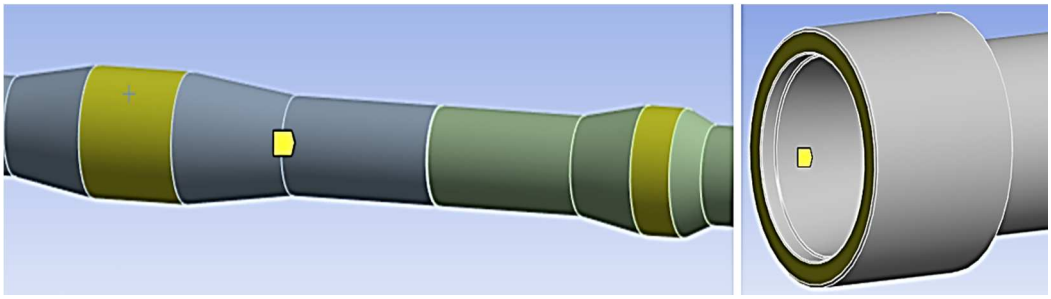

Рисунок 3 – Граничные условия перемещения для фрезерующего инструмента

Граничные условия force и moment применены к первой точке касания бурильных труб, расположенных выше фрезерной компоновки для моделирования реальных условий работы фрезерной компоновки при перемещении по клину-отклонителю (рис. 4). Это позволило учесть воздействие осевых и боковых нагрузок, а также крутящего момента, возникающих в процессе фрезерования и формирования бокового ствола.

На основании этих граничных условия была корректно построена система, подтверждающая реальные эксплуатационные нагрузки, воздействующие на фрезерную компоновку в процессе работы, а также оценено распределение напряжений в ее элементах [3, с. 10]. Это особенно важно для анализа усталостных повреждений в наиболее нагруженных участках, таких как резьбовые соединения.

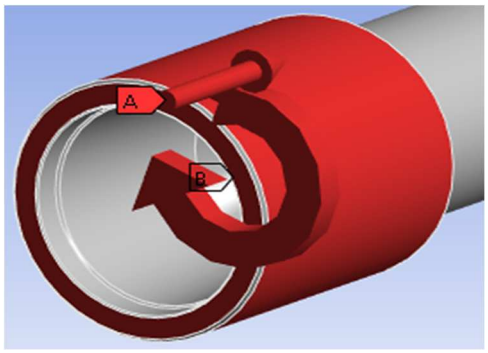

Рисунок 4 – Граничные условия force и moment для фрезерующего инструмента

Далее было рассмотрено граничное условие remote force. Оно моделировало отклоняющую силу, которая обеспечивала подъем всей фрезерной компоновки по оси Z, имитируя действие клина-отклонителя (рис. 5). Величина этой боковой силы варьировалась в зависимости от угла наклона клина. В рамках данной задачи использовался клин с углом наклона 2 градуса, что соответствовало вертикальному подъему компоновки на 6 мм.

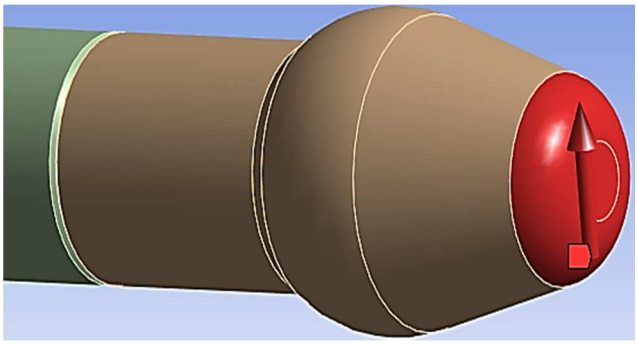

Рисунок 5 – Отклоняющая сила фрезерной компоновки

Для более глубокого понимания влияния таких нагрузок на долговечность оборудования, обратимся к теории накопленных повреждений. Теория накопленных повреждений основывается на том, что каждый цикл напряжений со знакопеременной нагрузкой, превышающей предел усталости, приводит к измеримому необратимому повреждению [2]. Кроме того, предполагается, что полное разрушение, вызванное множеством циклов напряжений, является результатом суммирования повреждений, накопленных от каждого отдельного цикла.

Эта концепция, которая остается широко применяемой и в настоящее время, известна как гипотеза Палмгрена-Майнера или принцип линейного суммирования повреждений [2].

Согласно кривой усталости, если материал подвергается циклическим нагрузкам с постоянной амплитудой σ_1, то разрушение (полное накопление повреждений) произойдет через N_1 циклов. Аналогично, при воздействии нагрузки с амплитудой σ_2, разрушение наступит через N_2 циклов [2].

При воздействии напряжения σ_1 в течение n_1 циклов, где n_1 меньше N_1, происходит частичное повреждение, которое характеризуется величиной D_1. Эта величина называется долей повреждения (или просто повреждением). Если материал подвергается спектру нагрузок с различными уровнями напряжений, то для каждого уровня напряжения σi из этого спектра возникает соответствующее повреждение D_i.

Согласно линейной гипотезе, разрушение материала наступит в тот момент, когда сумма всех накопленных повреждений достигнет единицы [2].

$$D = \sum_{i=1}^{n} \frac{n_i}{N_i} < 1, \quad (1)$$

где n_i – число циклов в течение определенного времени работы, цикл; N_i – число циклов по кривой усталости, цикл.

$$n_i = t * n, \quad (2)$$

где n – скорость работы фрезерной компоновки, об/мин; t – время работы, мин.

В ходе расчетов авторы использовали следующие исходные данные, которые занесены в таблицу 1.

Таблица 1 – Исходные данные

Параметры	Режимы работы		
	1	2	3
Время работы, мин	60	120	180
M, кН*м	3,0	3,5	4,0
P, тонны	2,0	2,5	3,0
n, об/мин	30	50	70

Используя исходные данные и заданные граничные условия, исследователи получили распределение эквивалентных напряжений (табл. 2). Поскольку основной интерес представляет анализ напряжений в области первого витка резьбы, фокус был сделан на сечении первого витка оконного и

расширяющего фреза. Это позволило детально изучить напряженное состояние в наиболее критической зоне, где возникает усталостное разрушение.

Таблица 2 – Эквивалентные напряжения

Число циклов	Режимы работы		
	1	2	3
	Оконный фрез		
N_i	10000000	80000	56000
	Расширяющий фрез		
N_i	90000	56000	50000

Применив формулы (1) и (2), можно будет рассчитать величину накопленного повреждения. Полученные данные позволят оценить оставшийся ресурс фрезерной компоновки до достижения критического состояния.

Список литературы:

1. Хакимов Д.А. Определение остаточного ресурса элементов фрезерной компоновки / Д.А. Хакимов, Д.И. Чистов // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии. – Альметьевск : Альметьевский государственный нефтяной институт, 2023. – С. 402–406.
2. Теория накопленного повреждения // SOLIDWORKS Web Help. – URL : https://help.solidworks.com/2014/russian/SolidWorks/Cworks/c_Theory_of_Cumulative_Damage.htm (дата обращения 10.03.2025).
3. Бруяка В.А. Инженерный анализ в ANSYS WORKBENCH / В.А. Бруяка, В.Г. Фокин, Я.В. Кураева. – Самара : Самарский государственный технический университет. – 2013. – № 1. – Ч. 2. – 149 с.

List of references:

1. Khakimov D.A. Determination of the residual resource of the elements of the milling arrangement / D.A. Khakimov, D.I. Chistov // Youth energy for the oil and gas industry. – Almetyevsk : Almetyevsk State Petroleum Institute, 2023 – P. 402–406.
2. Theory of accumulated damage // SOLIDWORKS Web Help. – URL : https://help.solidworks.com/2014/russian/SolidWorks/Cworks/c_Theory_of_Cumulative_Damage.htm (date of application 10.03.2025).
3. Bruyaka V.A. Engineering analysis in ANSYS WORKBENCH / V.A. Bruyaka, V.G. Fokin, Ya.V. Kuraeva. – Samara : Samara State Technical University. – 2013. – № 1. – Part 2. –149 p.