

УДК 622.276.53.054

М.В. Песин, В.Ф. Макаров

M.V. Pesin, V.F. Makarov

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

НОВОЕ РЕШЕНИЕ В УПРОЧНЕНИИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ РЕЗЬБ

THE NEW DECISION FOR HARDENING THE HIGH LOAD THREADS

Показаны взаимосвязи между конструктивными и технологическими параметрами процесса упрочнения резьбовой конической поверхности бурильной трубы, величиной и характером распределения остаточных напряжений в резьбовой поверхности на основе комплекса разработанных математических моделей и серии экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния резьбы и усталостных испытаний резьбового соединения.

Ключевые слова: цифровые технологии, резьба, упрочнение, обкатывание резьбы, остаточные напряжения, поверхностное пластическое деформирование.

Showing the relationship between the constructive and technological process of hardening threaded conical surface drill pipe (geometry of a strengthening of the movie, the size of the load, radius of hollow), magnitude and distribution of residual stresses in a threaded surface based on complex mathematical models developed and a series of pilot studies stress-strain state threads and fatigue tests.

Keywords: digital technology, carving, hardening, deep rolling thread, residual stresses, surface plastic deformation.

В процессе эксплуатации резьбовые соединения испытывают значительные знакопеременные нагрузки от действия растягивающих сил, изгибающих моментов, химического и абразивного воздействия, что приводит к нередким случаям разрушения резьбовых соединений. Разрушение резьб носит преимущественно усталостный характер, в основном в зоне впадины резьбы, где зарождаются трещины, что в процессе эксплуатации при знакопеременных нагрузках приводит к поломке трубы [1–5].

К примеру, конструкторско-технологические требования к резьбовым поверхностям бурильных труб согласно ГОСТ Р.50864–96 достаточно высокие, при этом шероховатость резьбы не должна превышать $Ra = 3,2$ мкм, а точность шага резьбы $\pm 0,04$ мм [6].

Обрыв труб при бурении и эксплуатации скважин по резьбовым соединениям является основной технической проблемой, ведущей к значительным

экономическим затратам, измеряемым десятками миллионов рублей на одну аварию. В связи с этим повышение качества, надежности и долговечности бурильных труб является актуальной задачей современного машиностроительного производства. Решение этой задачи возможно путем введения дополнительной операции упрочняющей обработки наружной и внутренней резьбы бурильных труб [7].

Вопросы повышения долговечности деталей машин при упрочняющей обработке рассмотрены в работах таких ученых, как А.Н. Афонин, А.П. Бабичев, В.Ю. Блюменштейн, Р.В. Гуров, М.С. Дрозд, Е.А. Евсин, А.В. Киричек, А.М. Козлов, Ю.Р. Копылов, И.В. Кудрявцев, В.П. Кузнецов, В.Ф. Макаров, В.П. Матвиенко, Е.Д. Мокронос, Ю.И. Няшин, А.А. Поздеев, М.Е. Попов, А.Н. Прокофьев, А.Н. Прокофьев, В.И. Семин, Ю.И. Сидякин, В.М. Смелянский, Д.Л. Соловьев, А.Г. Суслов, М.А. Тамаркин, В.М. Торбило, П.В. Трусов, М.З. Хостикоев, Ю.Г. Шнейдер, Н.Д. Щербюк, Patrick de Baets, Wim de Waele, Jan de Pauw и др. Анализ результатов исследований показал, что применение поверхностного пластического деформирования приводит к образованию в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений, упрочнению поверхности, что способствует повышению сопротивления усталости и долговечности деталей машин.

При рассмотрении современных методов математического моделирования напряженно-деформированного состояния при проведении упрочняющих процессов обработки установлено, что сложная геометрия моделируемой конической замковой резьбы бурильных труб исключает возможность использования аналитических методов для решения подобной задачи. В данном случае применительно к теории механики деформируемого твердого тела рассматривается трехмерная нестационарная контактная задача упругопластического деформирования. Решение этой задачи возможно на основе применения компьютерного конечно-элементного моделирования как современного инструментария для инженерного и научного анализа численного математического моделирования.

Решением практических проблем повышения надежности бурового оборудования занимаются специалисты таких предприятий Российской Федерации, как ООО «ПКНМ», ООО «ПКНМ-Урал», ОАО «Мотовилихинские заводы», ОАО «ТМК-Премиум Сервис», ООО «ВНИИБТ-Буровой инструмент» и др. Анализ производственного опыта показал, что, по мнению А.Н. Прокофьева, Н.А. Прокофьева, А.Г. Суслова, возможной причиной поломки резьбы может быть коррозионное разрушение, для повышения долговечности бурильных труб предлагается применять термодиффузионное цинкование, азотирование, фосфатирование и др.

Однако проведенные научные исследования и производственный опыт в области упрочнения резьб поверхностным деформированием являются недостаточными и не в полной мере обеспечивают долговечность труб.

Из рассмотренных методов упрочнения применительно к резьбовой поверхности наиболее рациональным выбран метод обкатывания роликом.

Изучение остаточных напряжений во впадине резьбы теоретически и экспериментально затруднено, так как профиль резьбовой конической поверхности весьма сложен. В связи с этим исследование такой резьбы возможно преимущественно методами математического моделирования характера и величины распределения остаточных напряжений, возникающих после обкатывания. Анализ технических требований по точности и допусков на резьбу показал, что основным показателем и критерием выбора допустимой максимальной величины силы прижима ролика с целью формирования рациональной величины остаточных сжимающих напряжений, обеспечивающих повышение сопротивления усталости, является допуск на глубину впадины. Превышение этого значения не обеспечивает требуемое качество соединения резьбы труб.

Анализ научных работ и опыта предприятий показал, что не полностью изучены и не представлены в комплексе научные и методологические основы технологического процесса упрочнения резьбовых соединений обкатыванием роликом, направленные на повышение надежности бурильных труб, отсутствуют математические модели процесса деформирования впадины резьбы, нет численных решений этой задачи, определяющей взаимосвязь режимов упрочняющей обработки с основными параметрами качества поверхностного упрочненного слоя, а именно: величина и характер распределения остаточных напряжений, шероховатости, микротвердости, наклепа и микроструктуры; отсутствует промышленная установка для обкатывания резьб бурильных труб. Выдвинута гипотеза о формировании сжимающих напряжений рациональной величины, обеспечивающих повышение сопротивления усталости резьбовой поверхности, обкатанной роликом, при взаимодействии его с дном впадины резьбы, расположенной ниже среднего диаметра резьбы.

Таким образом, проведенный анализ научно-технической литературы и опыта предприятий показал, что разработка методологических основ и практических рекомендаций технологического процесса упрочняющей обработки впадин резьбовых соединений является весьма актуальной научной и производственной задачей.

Для теоретических исследований процесса упрочнения материала резьбы применен метод компьютерного конечно-элементного моделирования как современный инструмент для инженерного и научного анализа численного математического моделирования.

Разработанная методология теоретических численных исследований включает создание физических и математических моделей для расчета остаточных напряжений, упругих и пластических деформаций резьбы в статической и динамической постановках. Решение поставленных задач моделирования предусматривает следующие этапы: построение физической модели деформирования, выбор типа конечного элемента, определение механических параметров исследуемого материала, назначение граничных и определение начальных условий в физической модели, построение конечно-элементной сетки и уплотнение ее в зоне контакта, приложение граничных и начальных условий к модели, задание параметров расчета, выполнение блока решателя и анализ результатов расчета. Результаты расчетов и анализа представляются в виде графиков и визуализаций величины и характера распределения остаточных напряжений, позволяющих на этапе проектирования технологии обкатывания резьбы назначать рациональные режимы упрочнения резьбы.

При создании высокоэффективного машиностроительного производства неотъемлемой его частью является использование цифровых технологий. Так, в высокопроизводительных предприятиях Российской Федерации нашли широкое использование программы, разработанные на основе конечно-элементного моделирования технологических процессов.

Применение данных программных продуктов позволит обеспечить улучшение качества обработки деталей и тем самым значительно повысить долговечность изделий.

В случае изготовления специальных бурильных, обсадных и насосно-компрессорных труб, а также других высоконагруженных деталей нефтепромыслового и бурового оборудования важным является выполнение технологических требований и прогнозирование выходных параметров процесса.

Опыт эксплуатации высоконагруженного оборудования показал, что разрушение резьб носит преимущественно усталостный характер, в основном в зоне впадины резьбы. На современном этапе развития технологий наклонно-направленного и горизонтального бурения нефтяных и газовых скважин с применением повышенного пластового давления и высоких температур требуются более прочные и надежные с высокими техническими характеристиками изделия.

Наиболее эффективным решением проблемы является повышение долговечности резьбовых соединений путем упрочнения поверхности дна впадины резьбы. Среди рассмотренных различных методов упрочнения поверхностей наиболее перспективным является метод поверхностной пластической деформации на основе обкатывания резьбы специальным профильным роликом [8].

Предполагается, что при обкатывании резьбы роликом повышается долговечность и надежность резьбовых соединений путем формирования рациональных сжимающих остаточных напряжений, увеличивается микротвердость и снижается шероховатость впадины резьбы.

Разработанная методика и проведенные научные исследования по установлению влияния режимов обкатывания на повышение сопротивления усталости сложных резьбовых конических соединений бурильных труб подтверждают важную роль цифровых технологий в машиностроении.

Представлены результаты проведенных экспериментальных исследований по повышению надежности резьбового соединения на основе сравнительных усталостных испытаний образцов труб с упрочнением резьбы и без упрочнения на специальном стенде.

Таким образом, разработка теоретических основ технологического процесса упрочняющего обкатывания впадин резьбовых соединений является актуальной научной задачей, а внедрение программы определения остаточных напряжений при изготовлении бурильных труб различного назначения имеет важную практическую значимость.

Сделаем следующие выводы:

1. С использованием компьютерного конечно-элементного моделирования разработана методология математического моделирования формирования напряженно-деформированного состояния материала резьбы при поверхностной пластической деформации бурильных труб обкатыванием роликом.

2. На основе разработанных математических моделей, выполненных расчетов и визуализации результатов установили взаимосвязи и закономерности влияния контактных нагрузок и геометрии деформирующего ролика на величину и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое при напряженно-деформированном состоянии материала резьбы с целью возможности управления их формированием для дальнейшего обеспечения повышения сопротивления усталости и долговечности резьбовых соединений.

3. Проведение сравнительных исследований сопротивления усталости образцов бурильных труб с упрочненной и неупрочненной резьбой в зависимости от режимов процесса обкатывания и режимов циклического нагружения позволило прогнозировать долговечность деталей с резьбой.

4. Комплексный подход к технологическому процессу упрочнения позволил разработать технологические рекомендации по внедрению цифровых подходов и определению рациональных режимов обкатывания в цеховых условиях, обеспечивающих формирование благоприятных сжимающих напряжений и повышение сопротивления усталости резьбовых соединений.

Список литературы

1. Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования на стадиях жизненного цикла ответственных деталей машин // Энциклопедия поверхностного пластического деформирования / под ред. д-ра техн. наук, проф. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. – С. 46–52.

2. Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Моделирование остаточных напряжений на стадиях жизненного цикла изделий // Вестник машиностроения. – 2014. – № 12. – С. 21–25.

3. Блюменштейн В.Ю., Киричек А.В., Бабичев А.П. Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Справочник. Инженерный журнал. – 2011. – № 5. – С. 47–52.

4. Афонин А.Н., Мартынов Е.М. Упрочнение крупногабаритных резьб деталей машин горно-металлургического оборудования // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы XII всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Старый Оскол, 2015. – Т. II. – С. 79–82.

5. Афонин А.Н., Саввин В.В., Киричек А.В. Моделирование накатывания с полнопрофильной схемой деформирования внутренних трапецеидальных резьб методом конечных элементов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 4 (300). – С. 61–67.

6. Песин М.В. Научные основы моделирования процесса упрочнения впадины резьбы бурильных труб обкатыванием роликом // Экспозиция «Нефть Газ». – 2013. – № 5 (30). – С. 68–70.

7. Pesin M.V. Improving the reliability of threaded pipe joints // Russian Engineering Research. – 2012. – Vol. 32, № 2. – P. 210–212.

8. Pesin M.V. Simulation of the Technological Process of the Strengthened Treatment of the Drill Pipes Thread // Urgent Problems of Up-to-Date Mechanical Engineering: Intern. Conf., UTI TPU, December 11–12, 2014, Yurga, Russia. – Durnten – Zurich: TTP, 2015. – P. 476–482.

Получено 9.09.2019

Песин Михаил Владимирович – доцент, д-р техн. наук, профессор кафедры инновационных технологий машиностроения, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, первый заместитель директора по нефтепромысловому оборудованию ООО «Пермская компания нефтяного машиностроения», e-mail: m.pesin@mail.ru.

Макаров Владимир Федорович – профессор, д-р техн. наук, заместитель заведующего кафедрой инновационных технологий машиностроения, Пермский национальный исследовательский политехнический университет.