

Исследование остаточных напряжений при упрочнении резьбы бурильных труб

М.В. Песин

к.т.н., доцент¹, первый заместитель директора по нефтепромысловому оборудованию²

M.Pesin@mail.ru

¹кафедра «Инновационные технологии машиностроения» ПНИПУ, Пермь, Россия
²ООО «ПКНМ», Пермь, Россия

Установлены взаимосвязи между конструктивными и технологическими параметрами процесса обкатывания резьбовой конической поверхности бурильной трубы (геометрией упрочняющего ролика, величиной нагрузки, радиусом впадины), величиной и характером распределения остаточных напряжений в резьбовой поверхности, на основе комплекса разработанных математических моделей и серии экспериментальных исследований НДС резьбы и усталостных испытаний.

Материалы и методы

Основные положения теории механики деформирования сплошных сред, технологии машиностроения, основы теории деформации сплошных сред, динамики машин и механизмов, теоретической механики, методики моделирования напряженно-деформированного состояния, теория поверхностно-пластической деформации. Результаты исследований фиксировались с помощью видеосъемки и аттестованных современных приборов и средств измерения. Визуализация и обработка результатов экспериментальных и теоретических исследований выполнена с помощью междисциплинарных инженерных пакетов на высокопроизводительном вычислительном комплексе с использованием программных комплексов ANSYS, ABAQUS и разработанной программы для ЭВМ PKNM Deep Roll Thread v 1.0 («Обкатка резьбы роликом ПКНМ версия 1.0»).

Ключевые слова

упрочнение, обкатывание резьбы, остаточные напряжения, поверхностное пластическое деформирование

В Российской Федерации наблюдается постоянный рост объемов бурения глубоких скважин, причем их глубина достигает 3000–5000 м. Для осуществления процесса бурения применяются специальные буровые, обсадные и насосно-компрессорные трубы, соединенные в многокилометровые колонны весом более 100 тонн с помощью резьбовых соединений в виде муфт и nipple'ов со специальной сложной конической геометрией замковой резьбы. В процессе бурения и подачи энергоносителей на поверхность резьбовые соединения буровых труб испытывают значительные знакопеременные нагрузки от действия растягивающих сил, изгибающих моментов, химического и абразивного воздействий, что приводит к нередким случаям разрушения резьбовых соединений и обрыву колонны в скважинах. В результате анализа характера разрушения бурильных труб в эксплуатации установлено, что 60% отказов связаны с недостаточной прочностью и циклической долговечностью ее соединительных резьбовых элементов. Разрушение резьб носит преимущественно усталостный характер, в основном в зоне впадины резьбы. Сегодня, с усложнением технологии наклонного и горизонтального, более глубокого, бурения нефтяных и газовых скважин с применением повышенного пластового давления и высоких температур, требуются более прочные и надежные с высокими техническими характеристиками бурильные трубы.

В связи с этим проблема повышения сопротивления усталости резьбовых соединений при изготовлении бурильных труб на машиностроительных предприятиях является весьма важной актуальной народнохозяйственной задачей.

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.

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.

Вопросы повышения долговечности деталей машин при упрочняющей обработке рассмотрены в работах таких ученых, как А.Н. Афонин, А.П. Бабичев, В.Н. Блюменштейн, М.С. Дрозд, Е.А. Евсин, А.В. Киричек, А.М. Козлов, Ю.Р. Копылов, И.В. Кудрявцев, В.П. Кузнецов, А.И. Лурье, В.Ф. Макаров, В.П. Матвиенко, Е.Д. Мокроносов, Ю.И. Няшин, А.А. Поздеев, М.Е. Попов, В.И. Семин, Ю.И. Сидякин, В.М. Смелянский, Д.Л. Соловьев, М.А. Тамаркин, В.М. Торбило, П.В. Трусов,

М.З. Хостикоев, Ю.Г. Шнейдер, 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.

Анализ научных исследований и опыта предприятий показал, что метод упрочнения резьбы обкатыванием роликами недостаточно изучен. Не установлены основные закономерности и взаимосвязи между режимами упрочнения и параметрами качества поверхностного слоя. Отсутствует методология математического моделирования контактных явлений и напряженно-деформированного состояния материала резьбы при обкатывании резьбы роликом, позволяющая с научной позиции управлять процессом формирования напряженно-деформированного состояния резьб. Для практического применения технологического процесса обкатывания роликом отсутствуют необходимое специальное промышленное оборудование, научно обоснованные методики и технологические рекомендации для серийного производства бурильных труб на конкурентоспособной и импортозаменяющей основе в Российской Федерации.

Кроме того, не разработана методика и не проведены научные исследования по установлению влияния режимов обкатывания на повышение сопротивления усталости сложных резьбовых конических соединений бурильных труб.

Таким образом, разработка теоретических основ технологического процесса, упрочняющего обкатыванием впадин резьбовых соединений, является актуальной научной задачей, а внедрение упрочняющей обработки на современных машиностроительных предприятиях при изготовлении бурильных труб различного назначения имеет важную практическую значимость для народного хозяйства Российской Федерации.

Цель проводимых исследований: установление теоретических и экспериментальных закономерностей для обоснования повышения долговечности бурильных труб на основе моделирования и управления параметрами упрочняющей обработки резьбы.

Задачи исследований:

1. Провести анализ исследований научных школ и опыта предприятий по решению проблемы разрушения резьбовых соединений, обосновать технологические методы и пути повышения сопротивления усталости и долговечности резьбовых соединений бурильных труб.
2. С использованием компьютерного конечно-элементного моделирования разработать методологию статического и динамического математического моделирования формирования напряженно-деформированного состояния материала резьбы при

поверхностной пластической деформации бурильных труб обкатыванием роликом.

3. На основе разработанных математических моделей, выполненных расчетов и визуализации результатов установить 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.
4. Спроектировать и изготовить специальную промышленную установку (стенд) для исследования и внедрения процесса, упрочняющего обкатывания роликом внутренней и наружной резьбы бурильных труб различной номенклатуры.
5. Разработать комплексную методику и провести экспериментальные исследования по установлению закономерностей влияния технологических параметров упрочняющей обработки резьбы бурильных труб на формирование основных параметров качества поверхностного слоя: остаточных напряжений, шероховатости, наклепа, микроструктуры.
6. Провести сравнительные исследования сопротивления усталости образцов бурильных труб с упрочненной и неупрочненной резьбой в зависимости от режимов процесса обкатывания и режимов циклического нагружения.
7. Разработать технологические рекомендации по внедрению нового технологического процесса обкатывания с использованием созданной инженерной методики назначения рациональных режимов обкатывания в цеховых условиях, обеспечивающих формирование благоприятных сжимающих напряжений и повышение сопротивления усталости резьбовых соединений.

Для проведения обкатывания разработаны специальные конструкции роликов. Для выполнения сравнительных экспериментальных исследований параметров качества поверхностного слоя резьбы вырезаны образцы труб с упрочненной и неупрочненной резьбой (рис. 1).

Для экспериментального исследования остаточных напряжений во впадине и на боковых поверхностях резьбы выбран неразрушающий метод на рентгеновском дифрактометре XStress3000G3R. Этот метод контроля показал достаточную хорошую сходимость с результатами сравнительных измерений по методу Давиденкова Н.Н. на глубине до 0,15–0,20 мм поверхностного слоя при предварительных исследованиях. Измерения остаточных напряжений проводились рентгеновским методом в 4-х точках вдоль одного витка резьбы согласно схеме, показанной на рис. 2а и по 4-м впадинам резьбы — на рис. 2б. Каждая точка измерения кодировалась по номеру расположения по окружности и по номеру витка резьбы (например, 1.1 и 1.2 и т.д.).

Представлены результаты и проведен анализ экспериментальных исследований влияния технологических режимов и условий обкатывания на величину остаточных напряжений в поверхностном слое резьбы, сопротивление усталости и долговечность бурильных труб.

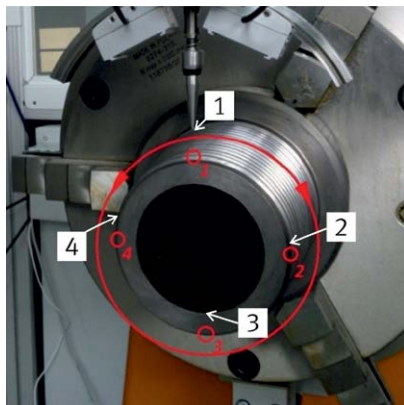


а)

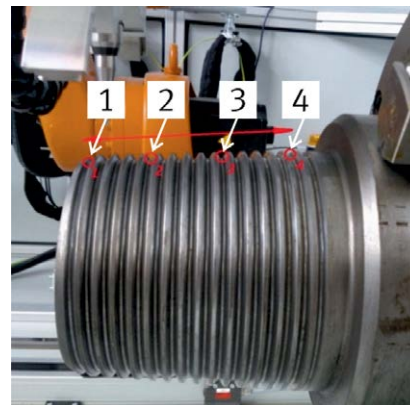


б)

Рис. 1 — Общий вид бурильных труб (а) и образцов (б) для исследования параметров качества поверхностного слоя резьбы
Fig. 1 — General view of the drill pipe (a) and (b) to study the surface layer quality of thread on the sample



а)



б)

Рис. 2 — Схема измерения остаточных напряжений на поверхности резьбы на рентгеновском дифрактометре
Fig. 2 — Diagram measurements of residual stresses on the surface of the thread on the X-ray diffractometer

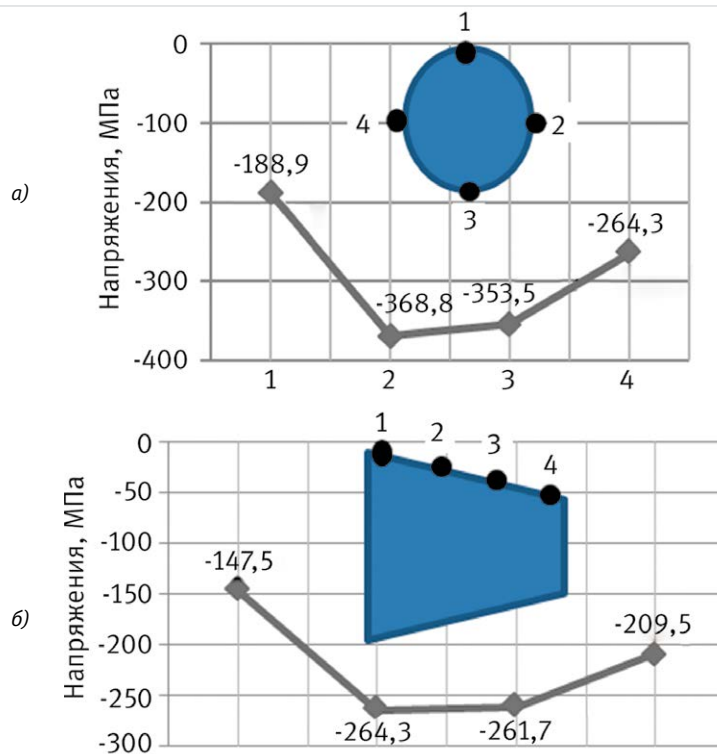


Рис. 3 — Значения остаточных напряжений в образце резьбы после обкатывания:
а) — точки по виткам резьбы;
б) — точки на окружной поверхности впадины резьбы
Fig. 3 — Values of residual stresses in the sample of thread after folding:
а) — point on the thread revolutions;
б) — points on the circumferential surface hollow carving thread

Установлена допустимая величина максимальной нагрузки на упрочняющий ролик, равная 8 кН, при которой формируется величина смещения профиля резьбы 0,11 мм и образуются рациональные сжимающие остаточные напряжения, обеспечивающие при усталостных испытаниях максимальное число циклов нагружения резьбового соединения до его разрушения. Выявлено, что в процессе обкатывания роликом на критических режимах в поверхностном слое резьбы образуются сжимающие тангенциальные остаточные напряжения с максимальной величиной до 360–400 МПа. Установлено, что после упрочняющей обработки сжимающие остаточные напряжения формируются как по окружности впадины (рис. 3а), так и по всем виткам резьбы (рис. 3б). При этом максимальные значения сжимающих напряжений в резьбовых поверхностях совпадают с результатами

теоретических исследований на 10–15%.

Показано, что обкатывание поверхности впадин при силе прижатия 8 кН устраняет практически все дефекты первоначальной обработки, при этом высота микронеровностей снижается с $Ra=3,2$ мкм до $Ra=0,4$ мкм.

В результате сравнительных усталостных исследований образцов труб с упрочнением резьбы и без упрочнения на специальном стенде установлено увеличение наработки обкатанного резьбового соединения над неупрочненным в 3,7 раза: с 700 тыс. циклов до 3,5 млн циклов.

Таким образом, полученные результаты экспериментальных исследований качества поверхностного слоя резьбы после упрочнения подтверждают результаты теоретических исследований и способствуют повышению сопротивления усталости и долговечности резьбовых соединений буровых труб.

Исследования остаточных напряжений выполнены на современном роботизированном комплексе, который успешно освоен специалистами кафедры Инновационные технологии машиностроения ПНИПУ (рис. 4).

Итоги

В результате научных исследований и опыта работы в упрочнении резьб установлены основные закономерности и взаимосвязи между режимами упрочнения и параметрами качества поверхностного слоя, методология статического и динамического математического моделирования и практического применения технологического процесса обкатывания сложнопрофильных конических резьб роликами.

Выводы

Применение обкатывания позволило снизить разрушения труб более чем в 3 раза и получить значительный экономический эффект от увеличения их долговечности и повышения конкурентоспособности производства буровых труб в России.

Литература

1. Песин М.В. Научные основы моделирования процесса упрочнения впадины резьбы буровых труб обкатыванием роликом // Экспозиция Нефть Газ. 2013. №5. С. 68–70.
2. M.V. Pesin Simulation of the Technological Process of the Strengthened Treatment of the Drill Pipes Thread // Applied Mechanics and Materials, 2015, vol. 770, pp. 476–482.
3. Pesin M.V. Improving the Reliability of Threaded Pipe Joints. Russian Engineering Research. 2012, vol. 32, issue 2, pp. 210–212.



Рис. 4 — Общий вид установки для определения остаточных напряжений в резьбечных напряжениях в резьбе образца буровой трубы
Fig. 4 — The installation for the determination of residual stresses in thread of drill pipe

ENGLISH

PIPES

Research of residual stresses in hardening of drill pipe thread

UDC 622.276.53.054

Author:

Mikhail V. Pesin — Ph.D., assistant professor¹, deputy director²; M.Pesin@mail.ru

¹department “Innovative manufacturing engineering” perm national research polytechnic university, Perm, Russian Federation

²PKNM Ltd., Perm, Russian Federation

Abstract

Set the relationship between the constructive and technological process parameters folding 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.

Materials and methods

Basic Theory of mechanics of deformation of continuous media, technology engineering, Foundations of the theory of deformation of continuous media, dynamics of machines and mechanisms, theoretical mechanics,

modeling techniques of stressed-strained state of the theory of surface plastic deformation. The results of the research were recorded using video and certified modern instruments and measurement tools. Visualization and processing of results of experimental and theoretical research done using interdisciplinary engineering packages on high-performance computing complex software systems using ANSYS, ABAQUS, and developed a computer program PKNM Deep Roll Thread v1.0.

Results

As a result of research and experience in strengthening the main thread patterns and the relationship between reinforcement

and quality parameters of the surface layer, the methodology of static and dynamic mathematical modeling and practical application of the technological process of deep roll hard-to-profile tapered threads with rollers.

Conclusions

Application of deep roll made it possible to reduce the likelihood of destruction pipes 3 times, to obtain significant economic benefit from increasing their durability and increase the competitiveness of the production of drill pipes in Russia.

Keywords

hardening, deep roll thread, residual stresses, surface plastic deformation

References

1. Pesin M.V. *Nauchnye osnovy modelirovaniya protsessa uprochneniya vpadiny rez'by buril'nykh trub obkatyvaniem rolikom* [Scientific the bases of the simulation of

- the process of strengthening the bottom of thread of drill pipes by deep roll]. Exposition Oil Gas, 2013, issue 5, pp. 68–70.
2. M.V. Pesin Simulation of the Technological Process of the Strengthened Treatment of

- the Drill Pipes Thread // Applied Mechanics and Materials, 2015, vol. 770, pp. 476–482.
3. Pesin M.V. Improving the Reliability of Threaded Pipe Joints. Russian Engineering Research. 2012, vol. 32, №2, pp. 210–212.