УДК 621.643

Развитие цифровых технологий в исследовании остаточных напряжений

М.В. Песин
к.т.н., доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения»[1], первый заместитель директора по нефтепромысловому оборудованию[2]
M.Pesin@mail.ru

В.Ф. Макаров
д.т.н., профессор, заместитель заведующего кафедрой инновационные технологии машиностроения[1]

[1]ПНИПУ, Пермь, Россия
[2]ООО «ПКНМ», Пермь, Россия

Показаны взаимосвязи между конструктивными и технологическими параметрами процесса упрочнения 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 напряженно-деформированного состояния 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, современных аттестованных 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
цифровые технологии, резьба, упрочнение, обкатывание резьбы, остаточные напряжения, поверхностное пластическое деформирование

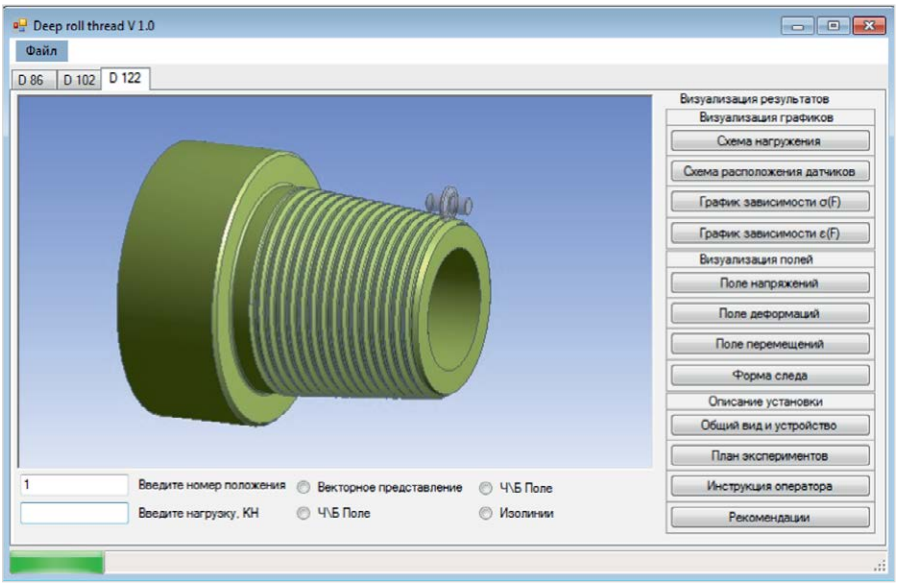


Рис. 1 — Общий вид полной твердотельной модели
Fig. 1 — General view of the complete solid mode

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.

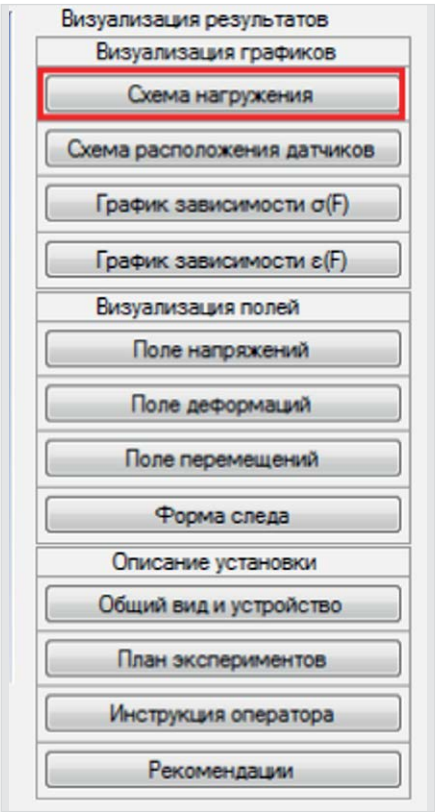
Наиболее эффективным решением проблемы является повышение долговечности резьбовых соединений путем упрочнения поверхности дна впадины резьбы. Среди рассмотренных различных методов упрочнения поверхностей наиболее перспективным является метод поверхностной пластической деформации на основе обкатывания резьбы специальным профильным роликом [1, 3].

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 [2].

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

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

Так программный комплекс (ПК) "PKNM Deep roll thread" содержит банк данных вычислительных экспериментов по поиску остаточных напряжений и перемещений в сечениях резьбы бурильной трубы. Модуль ПК представляет собой структурированный набор результатов численных экспериментов по моделированию контакта ролика и



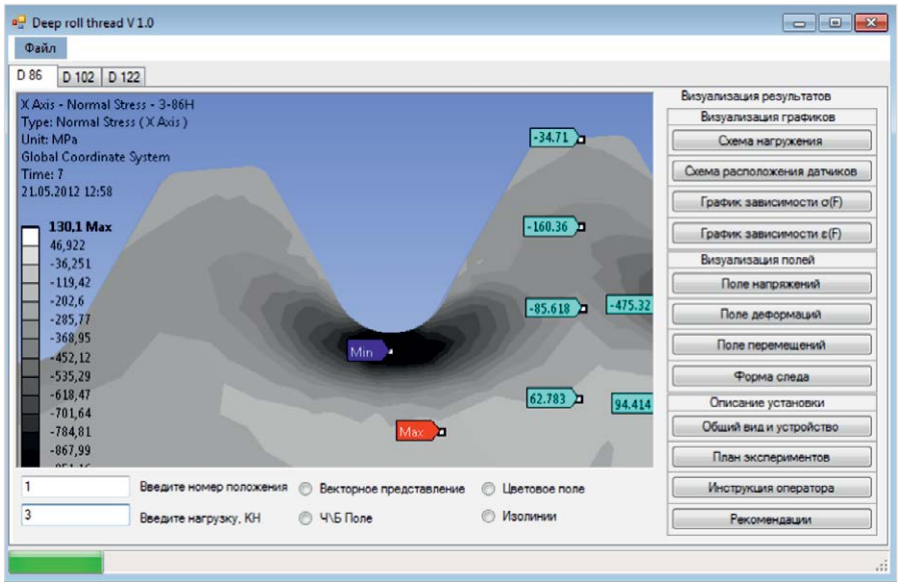


Рис. 3 — Определение месторасположения математического датчика
Fig. 3 — Determination of location of mathematical gauge

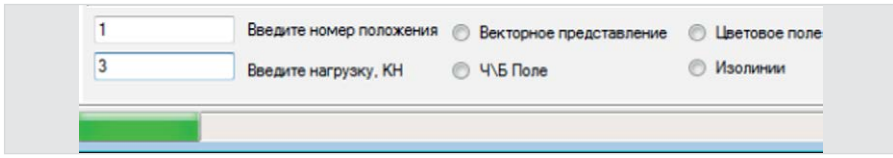


Рис. 2 — Отображение исходных данных
Fig. 2 — Displaying the source data

Рис. 4 — Панель параметров расчета
Fig. 4 — Calculation options pane

впадины резьбы, в результате расчетов остаточных напряжений в замковой конической резьбы 3-86, 3-102, 3-122 после ее обкатки роликом получены визуализации напряжений, блок программы показан на рис. 1.

Методика, предлагаемая инженерам, состоит в определении напряженно-деформированного состояния сформированного в результате технологического процесса обкатывания резьбы бурильных труб роликом:

1. Для визуализации общей расчетной схемы, для модуля Deep roll thread используется Меню визуализации результатов, для отображения, необходимо нажать кнопку «Схема нагружения» (рис. 2).

2. В качестве системы визуализации используется иерархическая топология отображения данных, позволяющая сначала выбрать место расположения математического датчика (рис. 3), а в дальнейшем получить графические зависимости остаточных напряжений в определяемом месте расположения.

3. За этапом выбора месторасположения математического датчика, требуется ввести входные данные процесса, используя панель параметров расчета, в качестве параметров указывается номер математического датчика и сила прижатия ролика в кН (рис. 4).

4. После определения и назначения входных параметров, появляется возможность отображения графических зависимостей (рис. 5).

По результатам статических и динамических моделей разработана инженерная методика (рис. 6), состоящая из методик проведения расчетов и программы для обеспечения технологического процесса подготовки производства.

Программа "Deep roll thread" представляет собой структурированный набор результатов численных экспериментов по моделированию остаточных напряжений в резьбовой поверхности бурильной трубы.

Данный модуль позволят выбирать оптимальные с точки зрения повышения надежности резьбового соединения нагрузки, и, в дальнейшем, получить графические зависимости.

Представлены результаты проведенных экспериментальных исследований повышения 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

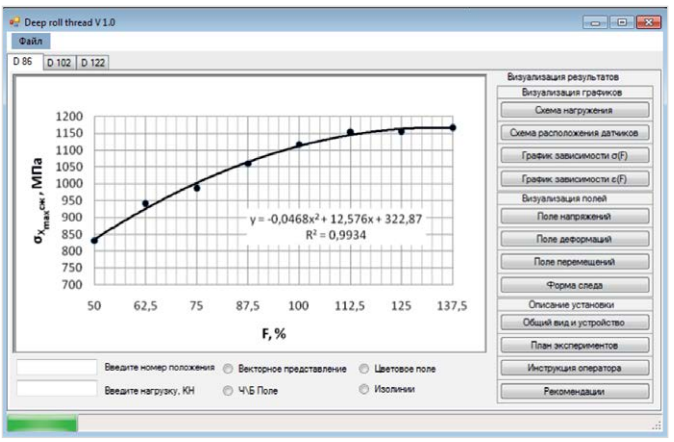


Рис. 5 — Отображение графических зависимостей напряжений от усилия вдавливания ролика
Fig. 5 — Graphic display of voltage dependency of the mounting clip

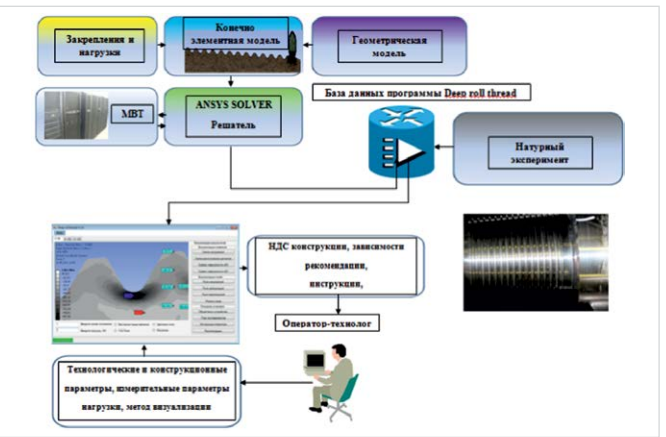


Рис. 6 — Блок-алгоритм схемы инженерной методики расчета остаточных напряжений при обкатке резьбы по впадине
Fig. 6 — Scheme algorithm engineering calculation method of residual stresses during run-in Groove on depression

резьбовых соединений является актуальной научной задачей, а внедрение программы определения остаточных напряжений при изготовлении бурильных труб различного назначения имеет важную практическую значимость для народного хозяйства Российской Федерации.

Резюмируя, можно выделить следующее:

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 установлены 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.

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 разрушение резьбы труб в 3,7 раза, получить значительный экономический эффект от увеличения их долговечности и повысить конкурентоспособность производства бурильных труб в России.

Литература

1. Песин М.В. Научные основы моделирования процесса упрочнения впадины резьбы бурильных 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 // Urgent Problems of Up-to-Date Mechanical Engineering. Intern. Conf., UTI TPU, 2014, Yurga, Russia. Durnten-Zurich: TTP, 2015. P. 476–482. ([Applied Mechanics and Materials; Vol. 770]).
3. Pesin M.V. Improving the Reliability of Threaded Pipe Joints. Russian Engineering Research 2012, vol. 32, issue 2, pp. 210–212.

ENGLISH **PIPES**

UDC 621.643

The development of digital technologies in the study of residual stresses

Authors

Mikhail V. Pesin — Ph.D., assistant professor of department “Innovative manufacturing engineering”[1], deputy director[2]; M.Pesin@mail.ru

Vladimir F. Makarov — Sc.D., professor, deputy head of department of mechanical engineering technology innovation[1]

[1]Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

[2]PKNM LLC, Perm, Russian Federation

Abstract

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.

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 ("Running thread roller PKNM version 1.0) Deep roll thread v1.0.

Keywords

digital technology, carving, hardening, deep roll thread, residual stresses, surface plastic deformation

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 pipe thread 3.7 times, to obtain significant economic benefit from increasing their durability and increase the competitiveness of the production of drill pipes in Russia..

References

1. Pesin M.V. N*auchnye 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. P*esin. 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, 2014, Yurga, Russia. Durnten-Zurich: TTP, 2015. P. 476–482. (*[Applied Mechanics and Materials; Vol. 770]).
3. Pesin M.V. Improving the Reliability of Threaded Pipe Joints. Russian Engineering Research 2012, vol. 32, issue 2, pp. 210–212.