

УДК 622.676

**Finite element modeling for the hardening drill pipe thread****Конечно-элементное моделирование упрочняющей обработки резьбы бурильных труб***M. V. Pesin* \*, *V. F. Makarov**М. В. Песин* \*, *В. Ф. Макаров*

Perm National Research Polytechnic University, Komsomolskiy Avenue 29, Perm, 614990, Russia  
\*m.pesin@mail.ru

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, Пермь,  
Комсомольский проспект, 29  
\*m.pesin@mail.ru

**ABSTRACT**

In this paper, showing the relationship between the constructive and technological process of hardening threaded conical surface drill pipe, 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 of threaded connection are presented.

Performed computer simulations of the hardening of the hollow carving deep roll. The conceptual and mathematical formulation of the problem is determined. As a result of a series of numerical experiments using ABAQUS package evaluation of residual stresses distributions are obtained depending on the degree mounting of the roll.

From the point of view of the mechanics of a deformable solid, the problem of modeling the process of thread rolling to three-dimensional non-stationary contact problems of elastic-plastic deformation.

The complex geometry of the simulated bodies excludes the possibility of using analytical methods to solve such a problem, so a system of hypotheses for constructing a mathematical model is introduced.

The area of the pin thread material for the modeling object is selected.

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.

**KEYWORDS**

Hardening of deep roll thread; drill pipe; thread; residual stresses; finite element method.

**АННОТАЦИЯ**

Показано взаимодействие между конструктивными особенностями и технологическим процессом упрочнения поверхности конических резьб бурильных труб, величиной и распределением остаточных напряжений в резьбовой поверхности, которые основаны на комплексном математическом моделировании и серии опытных исследований напряженного состояния резьб и испытаний резьбовых соединений. Представлено компьютерное моделирование упрочнения впадины обкатыванием ролика. Определены концептуальные и математические постановки задач. В результате серии численных экспериментов с применением программного комплекса ABAQUS определен характер распределения остаточных напряжений, полученных в зависимости от нагрузки на ролик.

С точки зрения механики деформируемого твердого тела задача моделирования процесса обкатывания резьбы относится к трехмерным нестационарным контактным задачам упругопластического деформирования. Сложная геометрия моделируемых тел исключает возможность использования аналитических методов для решения подобной задачи. Введена система гипотез для построения математической модели.

В качестве объекта моделирования выбрана область материала ниппеля трубы с резьбой.

Установлено взаимодействие между конструктивными и технологическими параметрами процесса замковых резьб (параметрами перемещения ролика, размерами, нагрузкой, радиусом), величиной и характером распределения остаточных напряжений в резьбовой поверхности, основанной на полученных комплексных математических моделях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

Упрочнение обкатыванием роликом; бурильная труба; резьба; остаточные напряжения; метод конечных элементов.

## Введение

Одним из основных методов поверхностного упрочнения впадин конической замковой резьбы бурильных труб является обкатывание этих впадин роликом. В этом процессе приповерхностные слои материала впадины резьбы трубы испытывают пластические деформации, а возникающие при этом остаточные напряжения и поверхностное упрочнение материала (наклеп) повышают усталостную прочность труб, увеличивая срок их эксплуатации [1–7]. Экспериментальное изучение остаточных напряжений вблизи впадины резьбы затруднено в силу сложного профиля поверхности резьбы и сильной неоднородности остаточных напряжений в малом по толщине слое материала резьбы [8–14].

### 1. Методика исследований

Целью данной работы является разработка и постановка задачи для последующей оценки распределений остаточных напряжений, возникающих после обкатывания с помощью методов математического моделирования. Рассмотрен метод конечно-элементного моделирования контактной задачи [15–21]. Для определения областей моделирования на рис. 1 приведена резьбовая часть ниппеля бурильной трубы, а также показан профиль и параметры резьбы на рис. 2.



Рис. 1. Трехмерная модель ниппеля резьбовой части бурильной трубы

Fig. 1. 3D-model of pin drill pipe thread

Для проведения исследований была взята утяжеленная бурильная труба. Ролик имеет диаметр  $D_r$ , радиус профиля  $R_r$  и угол рабочей стороны. Ролик устанавливается во впадине резьбы без наклона к оси обрабатываемой детали и прижимается усилием  $P$ . Затем труба начинает вращаться, заставляя прижатый ролик катиться по впадине резьбы [22–24].

С точки зрения механики деформируемого твердого тела, задача моделирования процесса обкатывания резьбы относится к трехмерным нестационарным контактным задачам упругопластического деформирования. Сложная геометрия моделируемых тел исключает возможность использования аналитических методов для решения подобной задачи. Введем систему гипотез для построения математической модели.

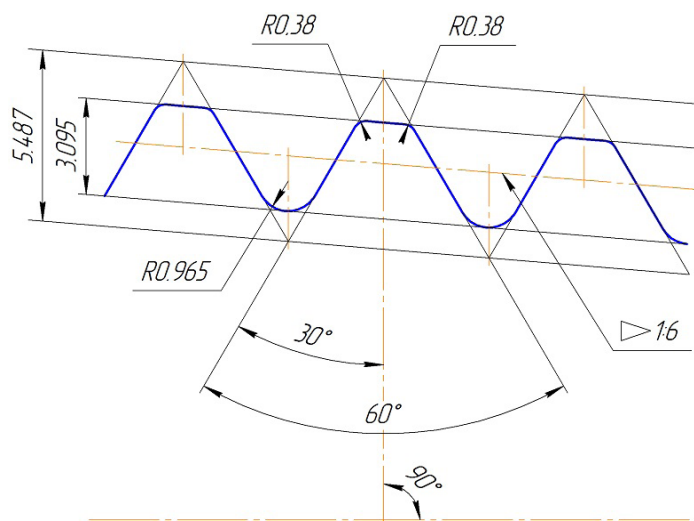


Рис. 2. Профиль и размеры резьбы бурильной трубы

Fig. 2. The profile and dimensions of drill pipe thread

В качестве объекта моделирования выбираем область материала ниппеля трубы с резьбой. Введем некоторые упрощения, так как нагрузки при обкатывании вызывают только локальные пластические деформации во впадине резьбы под роликом, то в качестве моделируемого объема можно рассмотреть впадину с двумя витками резьбы. При этом будем рассматривать резьбу не на конической, а на цилиндрической поверхности. Учитывая достаточно большой (по сравнению с глубиной впадины резьбы) диаметр трубы, локальность деформирования и оценочный характер расчетов можно развернуть моделируемый объем с цилиндрической поверхности на плоскость. Все эти упрощения позволяют представить моделируемый объем в виде фрагмента одного витка длиной 20 мм так, как показано на рис. 3 и 4.

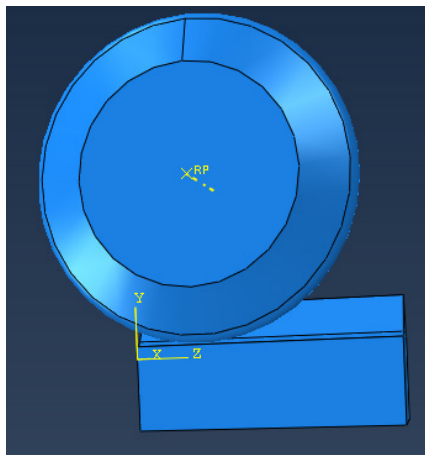


Рис. 3. Вид сбоку модели обкатки резьбы

Fig. 3. Side view of the thread rolling model

1. В начальном положении ролик располагается над канавкой резьбы в 5 мм от левого торца витка (см. рис. 3).

2. Ролик считаем абсолютно твердым телом.

3. Деформации материала резьбы считаем малыми, а физико-механические свойства материала – изотропными.

4. В начальном состоянии материал резьбы принимаем находящимся в естественном состоянии (ненапряженным и ненагруженным).

5. Процесс нагружения принимаем изотермическим.

6. Влияние массовых сил пренебрегаем.

7. Принимаем гипотезу об аддитивности скоростей упругих и пластических деформаций.

8. Задача рассматривается как контактная, причем контактные условия постоянно уточняются в процессе решения.

9. Нагружение выполняется в 2 шага.

На первом шаге ролик вдавливаются во впадину резьбы на величину  $U^*$ . На втором шаге весь фрагмент резьбы смещается влево (см. рис. 4) на 10 мм.

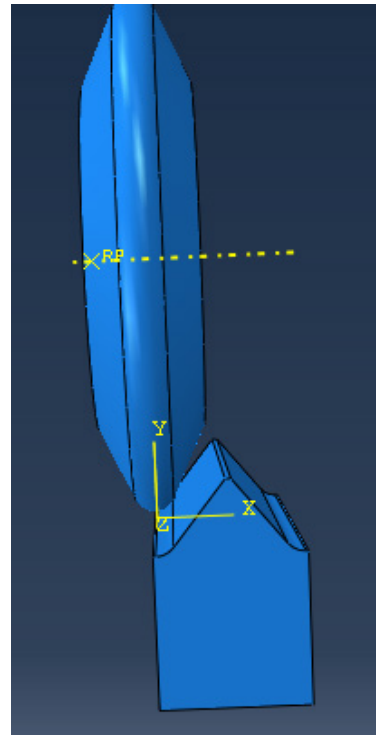


Рис. 4. Вид с вершины оси z на модель обкатки резьбы

Fig. 4. The view from the top of the z axis on the thread rolling model

При этом вдавленный ролик катится по впадине, вращаясь относительно своей неподвижной оси.

## 2. Результаты и их обсуждение

В процессе исследования была поставлена задача математического моделирования обкатки резьбы и проведено конечно-элементное моделирование процесса обкатывания резьбы роликом.

Пусть в некоторый момент времени  $t \in (0, \infty)$  деформируемое тело занимает область:

$$r \in \Omega^t, \Omega^t \in R^3.$$

Это трехмерное пространство с границей:

$$S^t = S_v(t) \cup S_{free}(t) \cup S_{cont}(t),$$

где  $S_v(t)$  – часть границы, подвергающаяся кинематическому воздействию;  $S_{free}(t)$  – свободная граница;  $S_{cont}(t)$  – граница контакта (смешанные граничные условия),

$$\overline{\Omega^t} = \Omega^t \cup S^t.$$

Далее были определены поля скоростей перемещений  $v$ , напряжений  $\sigma$  и деформаций  $\varepsilon$  для любого  $t \in (0, \infty)$ .

Данная задача является существенно нелинейной, в частности – вследствие наличия контактных граничных условий.

Заметим, что  $S_c(t_1)$  представляет собой область «геометрического контакта», в которой возможны подобласти отсутствия «физического контакта» (т.е. отсутствия взаимодействия геометрически касающихся поверхностей друг с другом).

Для получения приближенного решения поставленной задачи был использован программный комплекс *ABAQUS*, использующий традиционный для механики деформируемого твердого тела метод конечных элементов [3, 4].

В частности, в силу существенной нелинейности задачи был использован модуль *Abaqus/Explicit*. Для описания исследуемой области конечными элементами была построена конечно-элементная сетка (см. рис. 5).

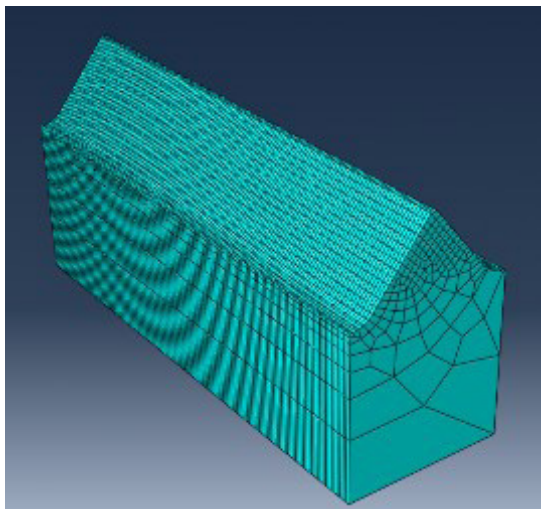


Рис. 5. Конечно-элементная сетка элемента резьбы

Fig. 5. Finite element mesh of a thread element

Для исследования распределения остаточных напряжений после обкатки резьбы роликом будут проведены вычислительные эксперименты при различных величинах вдавливания ролика  $U^*$ .

Для исследования распределения остаточных напряжений после обкатывания резьбы роликом были проведены вычислительные эксперименты при различных величинах вдавливания ролика  $U^*$  во впадину резьбы исследуемого объема бурильной трубы.

### Выводы

Выполненные исследования показали следующее:

1. Разработана математическая постановка задачи определения остаточных напряжений в материале межвитковой впадины резьбы в результате обкатывания резьбы роликом.
2. Полученная модель позволит провести численный эксперимент и определить значения и характер распределения остаточных напряжений, формируемых при обкатывании впадины резьбы.
3. Использование разработанной методики обеспечит получение технологических параметров (геометрические параметры ролика и силу прижатия) для упрочнения резьб бурильных труб.

### Список литературы

1. Metrisin J. T. Guidelines for Obtaining Contact Convergence // 2008 International ANSYS Conference. Turbomachinery. Florida Turbine Technologies, Inc., 2008. P. 29.
2. Bentull R. H., Johnson K. L. Slip in the Rolling Contact of Two Dissimilar Elastic Rollers // Int. J. Mech. Sci. 1967. V. 9, No. 6. P. 389–404. DOI: 10.1016/0020-7403(67)90043-4.
3. Plastic Deformation Nonuniformity and Localization during Metal Forming / G. S. Burkhanov et al. // Russian Metallurgy (Metally). 2012. V. 2012, No. 7. P. 592–598. DOI: 10.1134/S0036029512070051.
4. Development of ultrasonic thread root rolling technology for prolonging the fatigue performance of high strength thread / M. Cheng et al. // J. of Mat. Proc. Tech. 2014. V. 214, No. 11. P. 2395–2401. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2014.05.019.



5. Chumakov R. Optimal control of screwing speed in assembly with thread-forming screws // *Int. J. Man. Tech.* 2008. V. 36, No. 3–4. P. 395–400. DOI: 10.1007/s00170-006-0839-1.
6. Three-dimensional Finite Element Analysis of the Mechanical Properties of Helical Thread Connection / G. Yang et al. // *Chin. J. of Mech. Eng.* 2013. V. 26 (3). P. 564–572. DOI: 10.3901/CJME.2013.03.564.
7. Metrisin J. T. Guidelines for Obtaining Contact Convergence // 2008 International ANSYS Conference. Turbomachinery. Florida Turbine Technologies, Inc., 2008. P. 29.
8. Macdonald K. A., Bjune J. V. Failure analysis of drillstrigs // *Engineering Failure Analysis.* 2007. V. 14, No. 8. P. 1641–1666. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.073.
9. Moorthy V., Shaw B. A. Magnetic Barkhausen emission measurements for evaluation of depth of grinding damage // *Proc. 7th Int. Conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing (ICBM7)*. Aachen, Germany: Published by Stresstech Oy, Finland, 2009. P. 7.
10. Moorthy V., Shaw B. A., Brimble K. Testing of Case Depth in Case Carburized Gear Steels Using Magnetic Barkhausen Emission Technique // *Materials Evaluation.* 2004. V. 62, No. 5. P. 523–527.
11. Magnetic Barkhausen emission technique for evaluation of residual stress alteration by grinding in case-carburised steel / V. Moorthy et al. // *Acta Mater.* 2005. V. 53. P. 4997–5006. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.06.029.
12. Reynolds O. On Rolling Friction // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London.* 1976. V. 166. P. 155–174. DOI: 10.1098/rstl.1876.0006.
13. Slavsky K., Moravski D., Prybylski W. Analysis of contact elastic -plastic strains during in the process of burnishing // *Int. J. Mech. Sci.* 1995. No. 5. P. 461–472. DOI: 10.1016/0020-7403(94)00083-V.
14. Zhu X.-H. The parameter sensibility analysis for fishing box tap based on the overall process of elastoplasticity in oil and gas wells // *Mathematical and Computer Modeling.* 2013. No. 58. P. 1540–1547. DOI: 10.1016/j.mcm.2013.06.004.
15. Песин М. В. Научные основы моделирования процесса упрочнения впадины резьбы бурильных труб обкатыванием роликом // *Экспозиция Нефть Газ.* 2013. № 5 (30). С. 68–70.
16. Pesin M. V. Improving the Reliability of Threaded Pipe Joints // *J. Russian Engineering Research.* 2012. V. 32, No. 2. P. 210–212. DOI: 10.3103/s1068798x12020232.
17. Pesin M. V. Simulation of the Technological Process of the Strengthened Treatment of the Drill Pipes Thread // *AMM.* 2015. V. 770. P. 476–482. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.476.
18. Справочник технолога–машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / В. Н. Андреев и др. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 818 с.
19. Киричек А. В., Афонин А. Н. Резьбо-накатывание. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2009. 312 с.
20. Блюменштейн В. Ю., Махалов М. С. Моделирование остаточных напряжений на стадиях жизненного цикла изделий / *Вестник машиностроения.* 2014. № 12. С. 21–25.
21. Песин М. В. Повышение надежности резьбовых соединений изделий горных машин, нефтегазопромыслового и бурового оборудования // *Фундаментальные проблемы техники и технологии.* 2012. № 4 (294). С. 75–79.
22. Песин М. В. Технологическое обеспечение повышения надежности изделий нефтегазодобывающей и горной промышленности // *Экспозиция Нефть Газ.* 2012. № 4 (22). С. 54–55.
23. Песин М. В. Повышения надежности машин и оборудования для нефтегазодобывающей и горной промышленности конструктивными и схемными решениями в взаимосвязи с техническими условиями эксплуатации // *Экспозиция Нефть Газ.* 2012. № 4 (22). С. 102–105.
24. Песин М. В. Научные основы моделирования процесса упрочнения впадины резьбы бурильных труб обкатыванием роликом // *Экспозиция Нефть Газ.* 2013. № 5 (30). С. 68–70.