

Моделирование остаточного напряженного состояния резьбы на трубах нефтегазового сортамента в условиях поверхностного пластического деформирования

М.В. Песин

к.т.н., доцент, докторант,
первый заместитель директора
по нефтепромысловому оборудованию²
pknm@rambler.ru

¹кафедра «Инновационные технологии машиностроения» ПНИПУ, Пермь, Россия

²ЗАО «ПКНМ», Пермь, Россия

Проведено численное моделирование поверхностного пластического деформирования впадины резьбы путем обкатки роликом с использованием пакета ABAQUS. Определены величины остаточных напряжений при различных значениях вдавливания ролика.

Материалы и методы

Использованы методы математического моделирования, программный комплекс ABAQUS.

Ключевые слова

упрочнение, обкатка резьбы, остаточные напряжения, поверхностное пластическое деформирование

В Российской Федерации широко развивается глубокое бурение скважин в нефтегазодобывающей промышленности, применяется горизонтальное бурение и ремонт скважин. За последние 5 лет объем бурения скважин в РФ увеличен на 34%, с 2008 по 2012 гг. пробурено 82 910 тыс. м., вместе с тем, мировой рынок труб увеличился в 2,1 раза, и составил 179 млрд. руб. С увеличением объема добываемых ресурсов, нарастает проблема повышения надежности буровых установок. В этой связи наиболее актуальной является проблема повышения сопротивления усталости резьбовых соединений бурильных труб, испытывающих в процессе бурения и эксплуатации значительные знакопеременные изгибающие и крутящие нагрузки. Анализ статистических данных показывает, что около 60% всех отказов и аварий бурильных колонн связан с недостаточной прочностью и циклической долговечностью ее соединительных резьбовых элементов [1]. Установлено, что замковые резьбовые соединения являются определяющими в обеспечении работоспособности элементов бурильной колонны [3].

Одним из методов поверхностного упрочнения впадин конической замковой резьбы бурильных труб является обкатывание этих впадины 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. 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. Поэтому целью данной работы являлась оценка с помощью методов математического моделирования распределений остаточных напряжений, возникающих после обкатывания.

Ранее автором уже была сделана математическая постановка задачи определения остаточных напряжений в резьбовой поверхности труб [2]. Для получения приближенного решения поставленной задачи был использован программный комплекс ABAQUS, использующий традиционный для механики деформируемого твердого тела метод конечных элементов.

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

Для исследования распределения остаточных напряжений после обкатки резьбы роликом были проведены вычислительные эксперименты при различных величинах вдавливания ролика U^* от нескольких сотых до нескольких десятых мм.

Анализ распределения остаточных напряжений, приведенных на рис. 1, позволяет заключить, что распределение остаточных напряжений является существенно неоднородным. При этом величина отдельных компонент достигает значений более 100 МПа. Одно из основных ограничений, которым должны удовлетворять остаточные напряжения, является их самоуравновешенность [1]. Это означает, что для любого сечения S тела должно выполняться следующее интегральное соотношение

$$\int_S \sigma_n dS = 0 \quad (1)$$

т.е. интеграл по площади сечения S от нормальных к данному сечению компонент тензора напряжений должен быть равен нулю. Следствием ограничения (1) является то, что в любом сечении тела должны присутствовать как положительные (растягивающие), так и отрицательные (сжимающие) значения компонент остаточных напряжений. Анализируя распределения нормальных компонент ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) тензора остаточных напряжений, действительно можно

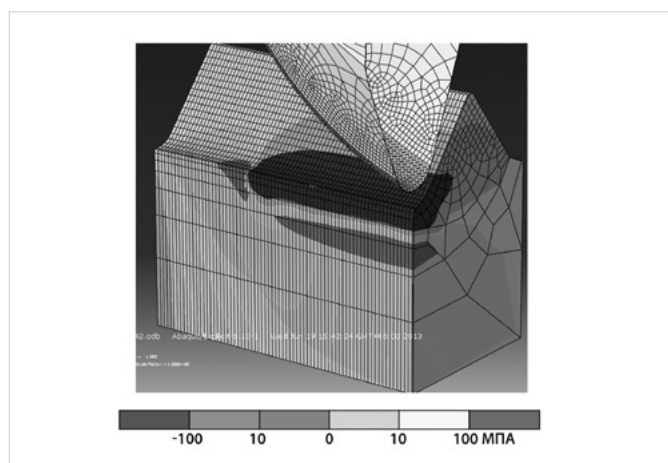


Рис. 1 — Распределения нормальных компонент σ_x тензора остаточных напряжений

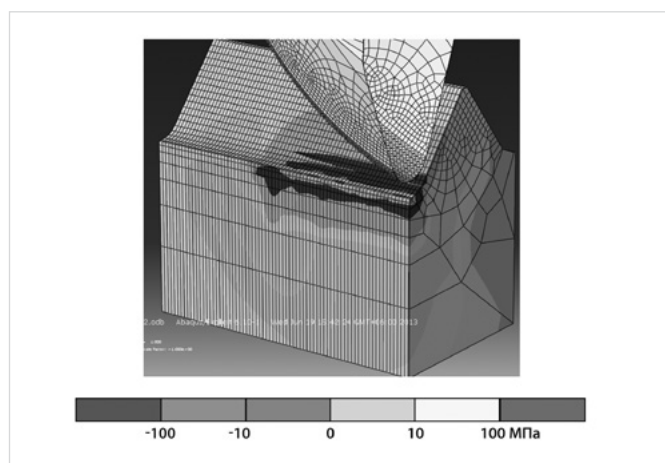


Рис. 2 — Распределения нормальных компонент σ_y тензора остаточных напряжений

отметить наличие как растягивающих, так и сжимающих напряжений.

Для компоненты σ_x (рис. 1, 2 и 3, ось x направлена вправо перпендикулярно направлению обкатки) сжимающие напряжения занимают приповерхностную область, а область значительных (более 100 МПа) растягивающих напряжений расположена под областью сжимающих напряжений. С увеличением вдавливания ролика можно видеть как увеличение глубины области сжимающих напряжений, так и увеличение области растягивающих напряжений. Подобное распределение σ_x можно объяснить различием радиуса профиля ролика и радиуса профиля резьбы. При вдавливании ролика происходит пластическое удлинение волокон материала в приповерхностных к дну впадины слоях материала резьбы в направлении оси x . После разгрузки внутренние пластически недеформированные волокна материала резьбы стараются сжать ставшими более длинными приповерхностные волокна.

Распределение нормальных компонент σ_x тензора остаточных напряжений показано на рис. 1.

В свою очередь приповерхностные волокна вызывают растяжение внутренних областей материала резьбы. При этом, область растяжения охватывает всю внутреннюю часть трубы. Однако, значительной величины растягивающие напряжения достигают только в области, примыкающей к области сжатия.

Для компоненты σ_y (ось y направлена вверх перпендикулярно направлению обкатки) область сжатия охватывает приповерхностные слои. Глубже располагается область незначительных растягивающих напряжений. Появление растягивающих значений σ_y на поверхности впадины резьбы связано с неточностью метода приведения напряжений к узлам конечных элементов от точек интегрирования конечного элемента. На поверхности впадины резьбы в точке выхода оси y значение σ_y должно быть равно нулю. Следует отметить, что при значительных степенях вдавливания ролика внутри витка резьбы начинает формироваться область значительных растягивающих напряжений. Полученное распределение σ_y можно объяснить тем, что ролик вдавливает приповерхностный материал резьбы вниз, стараясь поднять витки резьбы вверх. После разгрузки упругие витки резьбы как бандаж стараются вернуть материал впадины в прежнее

состояние, вызывая в приповерхностных слоях сжатие, а в глубине материал — незначительное растяжение. Возникновение области растяжения внутри витка резьбы можно объяснить пластическим удлинением приповерхностных волокон материала в нижней части боковой поверхности витка резьбы. Вызванная этим несовместность более длинных приповерхностных и оставшимися прежней длины внутренними волокнами вызывает сжатие первых и растяжение вторых.

Для компоненты σ_z , (ось z направлена по направлению обкатки) область сжатия охватывает приповерхностные слои материала. Правда имеется узкий (чуть уже ширины пятна контакта) неглубокий слой на поверхности дна впадины резьбы со значительными растягивающими напряжениями. Подобное распределение σ_z можно объяснить особенностями взаимодействия поверхности ролика с поверхностью резьбы. При данной степени вдавливания скольжение материала поверхности резьбы относительно поверхности ролика практически отсутствует, т.е. реализуется условия так называемого прилипания.

В этом случае приповерхностный слой материала резьбы оказывается в условиях всестороннего сжатия и пластически не деформируется. Пластическая деформация материала в направлении оси z происходит в более глубоких слоях. Волокна материала резьбы на этих глубинах пластически удлиняются в направлении прокатки. После разгрузки данные волокна оказываются сжатыми упругими поверхностными и более глубокими волокнами. На поверхности витков резьбы условия по трению в виде прилипания между поверхностями резьбы и ролика не реализуются, что приводит к формированию областей сжатия в приповерхностных слоях материала резьбы. Внутренние слои материала резьбы в силу условия самоуравновешенности (1) оказываются незначительно растянуты.

Следует обратить внимание, что при больших степенях вдавливания ролика на противоположной стороне витка резьбы вблизи его вершины начинает формироваться область значительных растягивающих напряжений.

На рис. 4 показано распределение интенсивности напряжений $\sigma_{\text{и}}$. Темно-серым цветом (почти вся область) показана область, где $\sigma_{\text{и}}$ не превышает предел текучести $\sigma_{0,2}$.

Таким образом, область пластического деформирования чуть больше пятна контакта и распространяется на 2,5...3 мм в глубину.

Однако приповерхностные слои материала дна впадины резьбы испытывают значительное упрочнение (наклеп). Особенно непосредственно под пятном контакта на глубину менее 1 мм. Хотя за роликом вблизи дна впадины величина интенсивности напряжений выше предела текучести $\sigma_{0,2}$, но она ниже упрочнения материала. Поэтому в этой области материал находится в упругом состоянии.

Итоги

Сделана постановка задачи упрочняющей обработки впадины резьбы, проведен ряд численных экспериментов и определены остаточные напряжения.

Выводы

1. Построенные физическая и математическая модели для расчета упрочняющей обработки впадины резьбы позволили провести численное исследование процесса обкатки резьбы с помощью программного комплекса ABAQUS на трубах различного сортамента.
2. Определено влияние технологических параметров упрочняющей обработки впадины резьбы на величину остаточных напряжений с получением графических зависимостей пластических деформаций, возникающих в резьбе от прикладываемых нагрузок, диаметра ролика и радиуса при его вершине.

Список используемой литературы

1. Песин М.В., Мокронос Е.Д. Повышения надежности бурильных труб на стадии проектирования путем использования математического моделирования процесса упрочнения резьбовой поверхности // Экспозиция Нефть Газ. 2013. №2 (27). С. 56–57.
2. Песин М.В. Научные основы моделирования процесса упрочнения впадины резьбы бурильных труб обкатыванием роликом // Экспозиция Нефть Газ. 2013. №5 (30). С. 68–70.
3. Pesin M.V. Improving the reliability of threaded pipe joints. Russian engineering research, 2012, Vol. 32, issue 2, pp. 210–212.

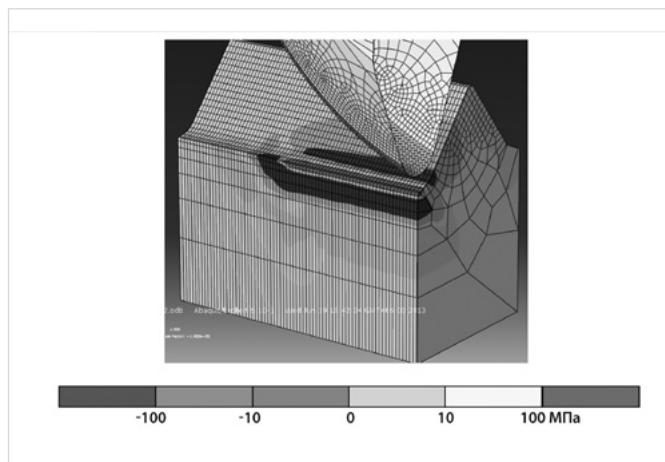


Рис. 3 — Распределения нормальных компонент σ_z тензора остаточных напряжений

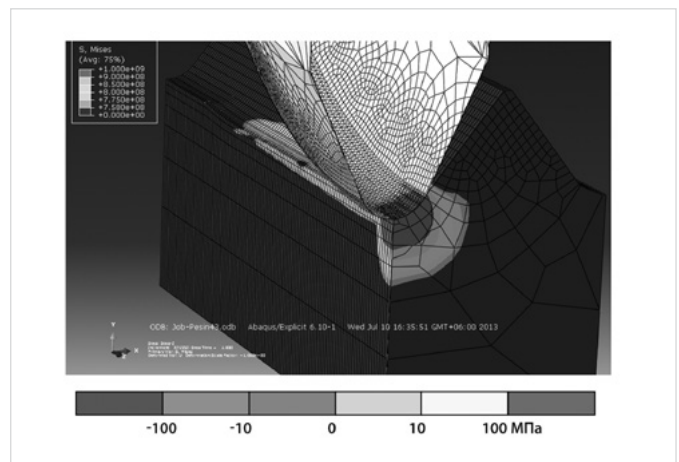


Рис. 4 — Распределение интенсивности напряжений $\sigma_{\text{и}}$

Simulation of the residual stressed state of thread on the pipes of oil and gas assortment under the conditions for the surface plastic deformation

UDC 621.77.07

Authors:

Mikhail V. Pesin — ph.d., associate professor, doctoral¹, deputy director²;

¹Department of “Innovative engineering technology” PNRPU (Perm National Research Polytechnic University), Perm, Russian Federation

²PKNM, Perm, Russian Federation

Abstract

Carried out the numerical simulation of the surface plastic deformation of bottom of thread by deep roll with the use of a packet ABAQUS. Determined the values of residual stresses with the different values of roller depression.

Materials and methods

Methods of mathematical modeling, program set ABAQUS.

Results

Problem formulation of the hardening working of thread bottom is made. It is carried out numerical experiments and determined residual stresses.

Conclusion

1. The constructed physical and mathematical models for calculating the hardening working of bottom of thread made it possible to conduct a numerical study of the deep roll thread with the aid of the program set ABAQUS on the pipes of different

assortment.

2. It is determined the influence of the technological parameters of the hardening working of bottom of thread on the value of residual stresses with obtaining of the graphic dependences of the plastic deformations, which appear in the thread from the applicable loads, the diameter of a roller and radius with its apex.

Keywords

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

References

1. Pesin M.V., Mokronosov E.D. *Povyshenie nadezhnosti buril'nykh trub na stadii proektirovaniya putem ispol'zovaniya matematicheskogo modelirovaniya protsessa uprochneniya rez'bovoy poverkhnosti* [Improve the reliability of the drill pipe at the design stage through the use

of mathematical modeling of the process of strengthening the thread surface]. *Exposition Oil Gas*, 2013, issue 2 (27), pp. 56–57.

2. Pesin M.V. *Nauchnye osnovy modelirovaniya protsessa uprochneniya vpadiny rez'by buril'nykh trub obkatyaniem rolikom* [Scientific bases of modeling the

process of strengthening the depression thread drill pipe roller brake-in]. *Exposition Oil Gas*, 2013, issue 5 (30), pp. 68–70.

3. Pesin M.V. Improving the reliability of threaded pipe joints. Russian engineering research, 2012, Vol. 32, issue 2, pp. 210–212.

9-10 АПРЕЛЯ 2014г.



Ямало-Ненецкий автономный округ

г. НОВЫЙ УРЕНГОЙ
ДЦ “ЯМАЛ”, ул. Юбилейная, 5

Межрегиональная специализированная выставка

ГАЗ. НЕФТЬ. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ - КРАЙНЕМУ СЕВЕРУ

Выставка пройдет в рамках
Новоуренгойского газового форума



Организатор выставки:
Администрация г. Новый Уренгой

Оператор выставки:

СИБЭКС SERVICE

Выставочная компания “СибЭкспоСервис-Н”,
г.Новосибирск

тел.: (383) 335 63 50 - многоканальный,
e-mail: ses@avmail.ru, www.ses.net.ru