

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ДЛЯ ГЛУБОКОВОДНОЙ ПРОКЛАДКИ

© 2010 г. **В.Е. Костюков**^{1,2}, **С.Ф. Перетрухин**², **С.В. Фотин**³, **К.И. Дикарев**³

¹ Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

² ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», Саров

³ ООО «НПО РФЯЦ–ВНИИЭФ–Волгогаз», Саров

psf@visa44.vniief.ru

Поступила в редакцию 05.04.2010

Представлены результаты практического применения численного моделирования сквозного цикла технологических операций производства труб большого диаметра, предназначенных для глубоководной прокладки. Показано хорошее качественное и количественное совпадение с параметрами реального производственного процесса в рамках действующих стандартов. Представленная модель процесса производства предназначена для внедрения на предприятиях трубной промышленности, что поможет существенно повысить качество выпускаемой продукции и сократить затраты на настройку оборудования при переходе на новые типоразмеры и материалы труб.

Ключевые слова: метод конечных элементов, трубная заготовка, трубы большого диаметра, численное моделирование, сварка, экспандирование, калибровка, штрипс.

Введение

Сегодня в России ведутся национальные проекты «Северный поток» (Nordstream), «Южный поток» (Southstream) и «Восточная Сибирь – Тихий океан» (ВСТО), связанные с прокладкой труб по дну Черного и Балтийского морей или в сейсмически опасных зонах Восточной Сибири. Повышенные требования к безопасности проектов потребовали от российских производителей труб большого диаметра (ТБД) пересмотреть действующие стандарты в сторону ужесточения требований к качеству производимых труб. Одним из наиболее эффективных средств для предприятий трубной промышленности в освоении новых типоразмеров труб, изготавливаемых из новых марок трубной стали (вплоть до X120 по классификации API/5L), является численное моделирование. В данной статье представлен опыт практического применения численного моделирования полного цикла технологических операций производства ТБД, производимых по УОЕ-технологии. Работы выполнялись при совместном участии специалистов РФЯЦ–ВНИИЭФ и ННГУ им. Н.И. Лобачевского [1]. Представленные техно-

логии предназначены для создания аналитических экспертных систем магистральных трубопроводов.

1. Постановка задачи и выбор метода решения

Технология производства ТБД состоит из следующих основных этапов: холодная формовка, сварка, экспандирование, гидравлическое испытание.

Моделирование нелинейного НДС листового штрипса сводится к решению нелинейной термомеханической задачи механики сплошной среды (МСС).

Математическая модель этой задачи включает уравнения движения, соотношения Коши, уравнение сохранения энергии, уравнения Прандтля – Рейсса для приращений полных деформаций, уравнения связи объемных деформаций и шарового тензора, начальные и граничные условия, а также условия непроникания и равенства компонент напряжений с обеих сторон от контактной поверхности [2, 3, 4].

Данная задача может быть решена методом конечных элементов (МКЭ), с использованием

коммерческой программы ANSYS, реализующей его.

Для моделирования процесса пластической деформации стального листового штрипса использовались основные соотношения теории пластического течения упрочняющегося материала, а в качестве критерия пластичности – классическая гипотеза Губера – Мизеса об удельной энергии формоизменения. При расчетах использовалась билинейная диаграмма деформирования трубной стали с изотропным упрочнением.

Кроме этого были задействованы модель трения Кулона с постоянным коэффициентом и модель воздействия гравитации.

2. Моделирование прессового оборудования

Подгибка кромок (U-shape). Моделирование проводилось в 2D-постановке. Для дискретизации КЭ-модели листового штрипса использовался реализованный в ANSYS 8-узловой плоский твердотельный КЭ *PLANE 183*. Элементы инструмента прессового оборудования моделировались как абсолютно жесткие тела в предположении малости их деформирования по отношению к листовому штрипсу. Для создания контактных пар использовались двумерные контактные КЭ *TARGE 169* и *CONTA 172*.

Процесс подгибки кромок моделировался в два этапа: нагрузка и разгрузка. При этом был реализован вспомогательный программный мо-

дуль, обеспечивающий приложение заданного усилия на рабочий инструмент прессы подгибки. Усилие, требуемое для получения необходимой формы подогнутых кромок, задавалось по паспортным данным на оборудование. Также была реализована возможность определения величины необходимого прессового усилия в процессе численного моделирования.

Окончательная формовка (O-shape). Моделирование процесса окончательной формовки проводилось в едином цикле с этапом подгибки кромок при сохранении непрерывной истории НДС. Процесс моделировался в двух вариантах: как пошаговый и как двухэтапный. При циклическом моделировании процесса пошаговой формовки в рамках каждого шага рассматривается три этапа: нагрузка, разгрузка с укладыванием еще не подогнутой части штрипса на технологический стол и дальнейшее перемещение инструмента по горизонтали на следующий шаг гибки.

При моделировании двухэтапной окончательной формовки процесс разделялся на этап загиба штрипса вокруг штампа, имеющего в сечении круглую форму рабочей поверхности, при помощи кулисного или роликового механизма, и на последующее сжатие в O-образной форме. На рис. 1 представлено распределение интенсивности напряжений (в паскалях) для всего сечения трубной заготовки в процессе двухэтапной окончательной формовки трубного профиля.

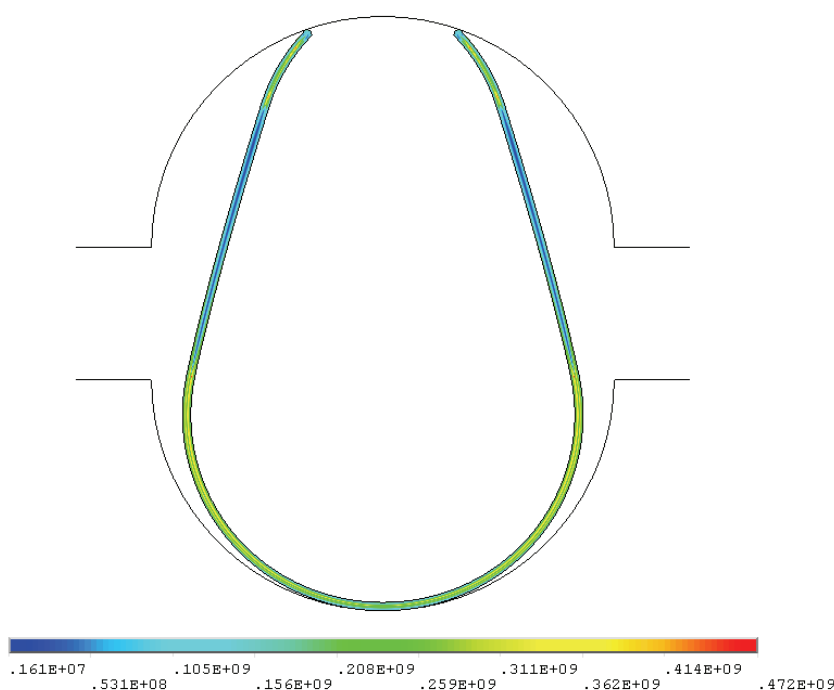


Рис. 1

3. Моделирование сборочно-сварочного стана

Решение задачи моделирования сборочно-сварочной клетки проводилось в плоскодеформированной постановке, предполагающей отсутствие деформаций листового штрипса в продольном направлении трубной заготовки. Прижимные роликовые балки моделировались в виде жестких контактных поверхностей роликов.

Моделирование осуществлялось пошагово в соответствии с основными этапами принятой на производстве технологии сборки.

Целью технологической сборки является сведение друг к другу и последующая фиксация кромок трубной заготовки, что необходимо для нанесения технологического сварочного шва. Этот процесс на трубном производстве осуществляется посредством ряда прижимных роликовых балок, располагающихся радиально по периметру заготовки, на каждую из которых оператором стана задается индивидуальное усилие, пока кромки будущего шва не будут состыкованы и заготовка не примет желаемую кольцеобразную форму.

В процессе моделирования сборки критерием окончания подбора параметров усилий на балки являлось обеспечение зазора между продольными кромками в пределах ≤ 0.5 мм.

Дальнейшее моделирование сквозного цикла производства ТБД было связано с моделированием процессов сварки. Для построения КЭ-модели использовался 8-узловой твердотельный трехмерный «тепловой» элемент *SOLID 70 ANSYS/Thermal*.

Численный анализ трехмерного температурного поля в стенке трубы осуществлялся в результате решения нестационарного уравнения теплопроводности для твердого тела с однородными свойствами [5]:

$$C(T) \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(\bar{x}, T) \cdot \text{grad}(T)) + Q(\bar{x}, T). \quad (3.1)$$

Здесь $C(T)$ – теплоемкость материала трубы; ρ – плотность материала трубной заготовки; T – температура; t – время; λ – коэффициент теплопроводности материала трубной заготовки; $Q(\bar{x}, T)$ – мощность тепловыделения от нагрева в зоне сварки; \bar{x} – трехмерный вектор декартовых координат.

Уравнение решалось методом конечных элементов (МКЭ). На свободных поверхностях трубной заготовки задавалось граничное условие III рода [5].

Мощность внутренних источников теплоты Q определялась из выражения [6]:

$$Q = I \cdot U \cdot \zeta / V. \quad (3.2)$$

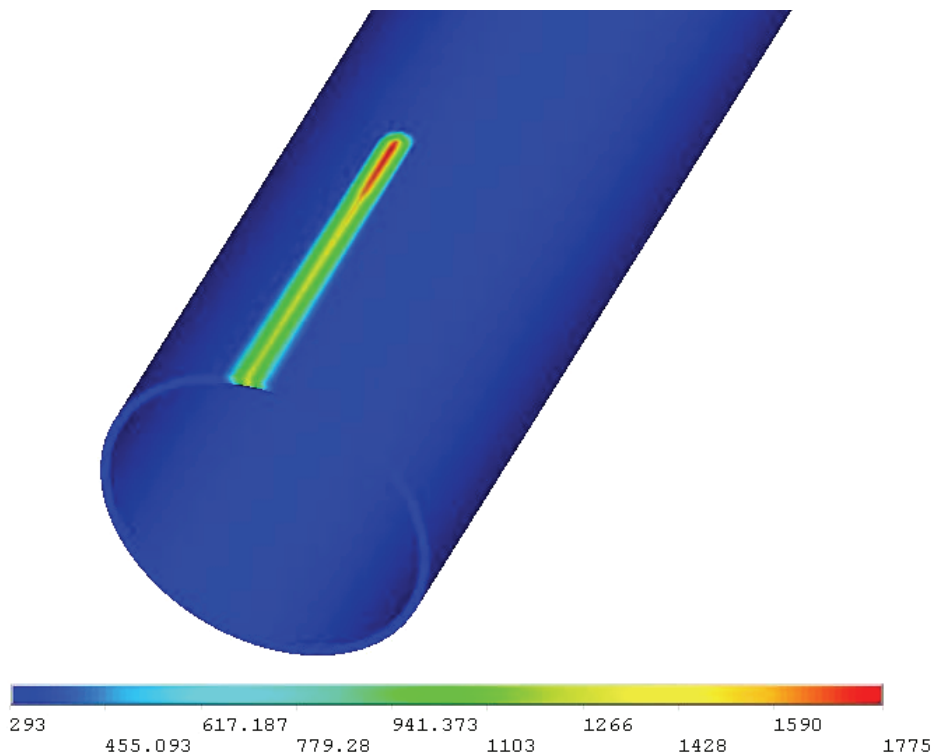


Рис. 2

Здесь I – сила тока; U – напряжение; ζ – коэффициент эффективности сварки; V – объем материала, в котором выделяется тепловая энергия при сварке.

Неравномерное распределение мощности внутренних источников теплоты по толщине стенки обеспечивалось заданием индивидуальных значений Q для технологического, внутреннего и наружного сварных швов. Значение коэффициента эффективности сварки ζ определялось в результате выполнения серии численных экспериментов.

На рис. 2 представлены результаты численного анализа нестационарного неоднородного трехмерного поля температур (в кельвинах) в стенках трубной заготовки в начале процесса сварки внешнего шва. При расчете учитывались заданное тепловыделение в сварном шве, радиационный и конвективный теплообмен с окружающей средой.

Одновременно с расчетом температурной задачи осуществлялся численный расчет НДС, возникающего при нагреве нестационарным неоднородным трехмерным полем температур. Таким образом, выполнялось решение сопряженной термомеханической задачи. Модель трубной заготовки при этом воспринимала реакции опоры от трех роликов, на которые опиралась контактно, и подвергалась воздействию силы тяжести. При прочностных расчетах ис-

пользовался 8-узловой твердотельный трехмерный элемент *SOLID 185* ANSYS/Structural.

По окончании процесса сварки, вследствие нагрева заготовка ТБД обладает характерной «бананообразностью», при которой торцы заготовки находятся выше центрального сечения трубы, и заготовка имеет U-образную форму. На рис. 3 показано распределение интенсивности полной механической деформации после окончания сварки (относительные единицы), включающей в себя суммарно упругие деформации сборки, а также температурные и пластические деформации.

4. Моделирование экспандера

На этапе механического экспандирования трубная заготовка после сварки доводится до поставляемых потребителю геометрических параметров ТБД. При этом достигается исправление искажений геометрии трубной заготовки, возникших на предыдущих этапах (например, овальность сечений, кривизна образующей и т.п.).

В процессе моделирования калибровки заготовка ТБД подается на экспандер, поперечина которого моделировалась при помощи балочного элемента *BEAM* ANSYS/Structural. КЭ-модели рабочих поверхностей головки калибрующего инструмента, а также рабочих поверхностей технологических роликов рассматривались как абсолютно жесткие тела. Связь между

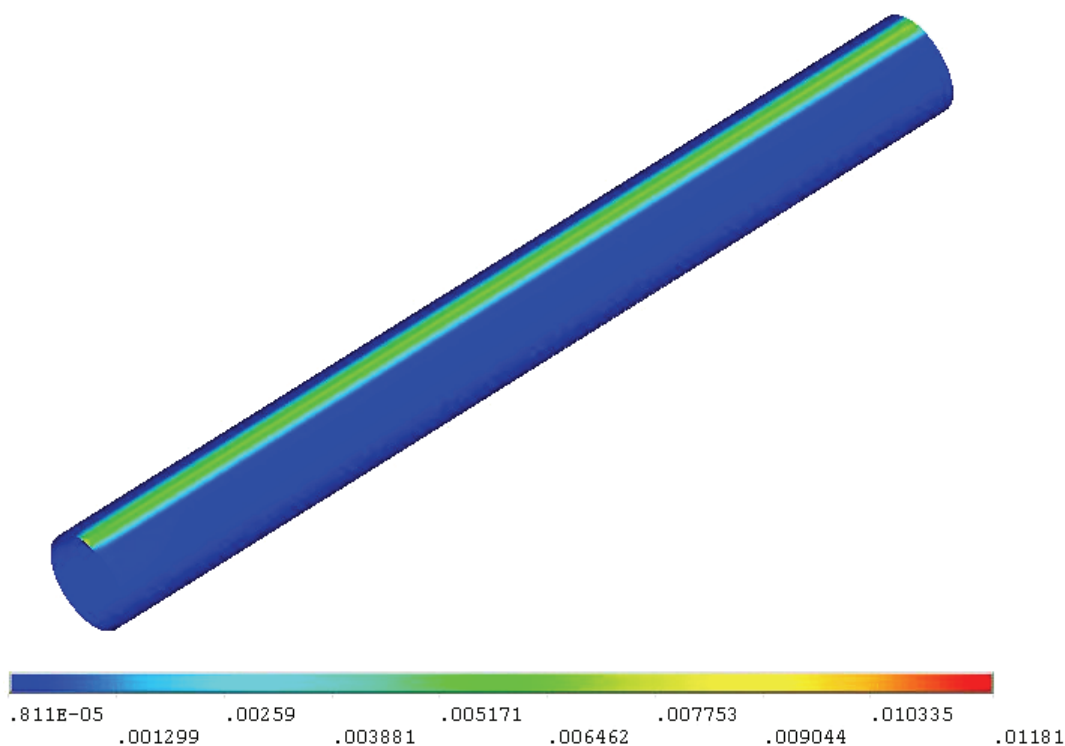


Рис. 3

поперечной экспандера и роликами, а также между поперечной и рабочими поверхностями головки осуществлялась также с использованием балочных элементов. При осуществлении процесса калибровки в балочных элементах, связывающих поперечину и рабочие поверхности инструмента, задавались осевые усилия, соответствующие прикладываемым в реальном оборудовании силам для «раздачи» трубной заготовки до нужного диаметра. Такой подход позволил адекватно моделировать работу экспандирующей установки. При численных расчетах использовался 8-узловой твердотельный трехмерный элемент *SOLID 185* ANSYS/Structural, а также контактные элементы *CONTA 174* и *TARGE 170*.

На рис. 4 приводится распределение поля интенсивности деформаций на одном из шагов калибровки заготовки ТБД (относительные единицы). Заготовка отображена в продольном разрезе.

5. Моделирование процессов гидроиспытания

Гидравлическое испытание является завершающей стадией производства труб, на которой ТБД испытывает силовую нагрузку. Гидравлические испытания выполняются на гидростатическом испытательном прессе, обеспечивающем создание заданного уровня давления воды внутри трубы и поддержание давления не менее 20 сек.

Процесс численного моделирования гидравлических испытаний проводился с сохранением остаточного НДС после процесса экспандирования и, соответственно, от температурного воздействия сварки.

Для данного типа ТБД гидроиспытания выполняются согласно [7] (давление нагружения составляло около 28 МПа). На рис. 5 приведено поле интенсивности напряжений (в паскалях) после снятия давления гидравлического испытания с ТБД.

Полученные в результате расчетов значения геометрических параметров готовых ТБД, определяющих их товарное качество, выявили, что значения данных параметров не превосходят предельно допустимых значений, определяемых действующими техническими требованиями [8]. В табл. для некоторых контролируемых геометрических параметров ТБД приведены процентные отношения их максимальных полученных значений к значениям соответствующих предельно допустимых допусков, определяемых действующими на трубном производстве стандартами.

Таблица

Параметр	Отношение к предельно допустимому значению, %
Овальность	56.3
Кривизна	34.2
Неперпендикулярность торцов	61.5

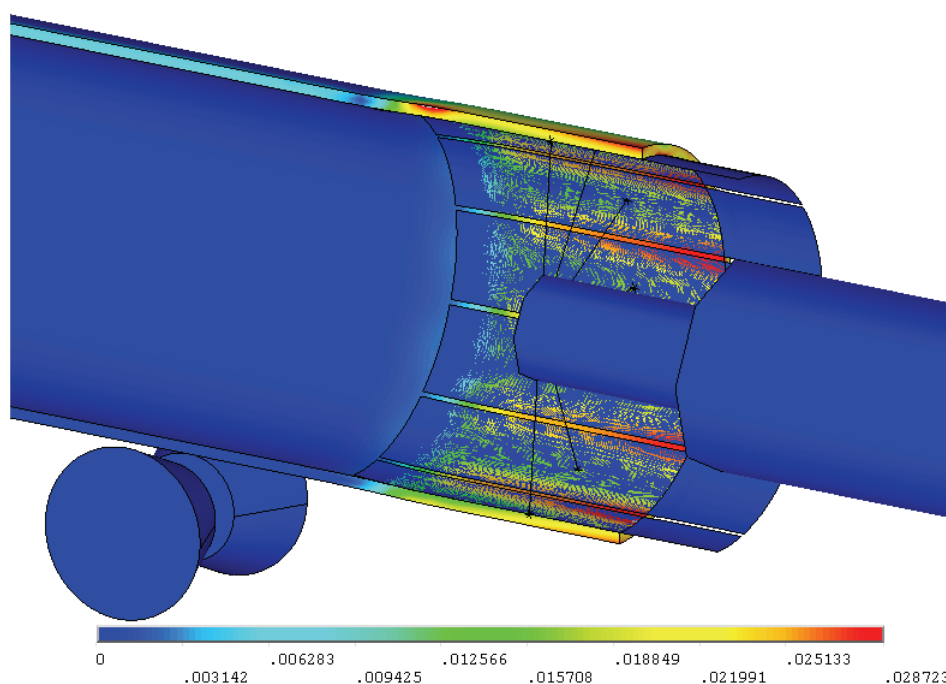


Рис. 4

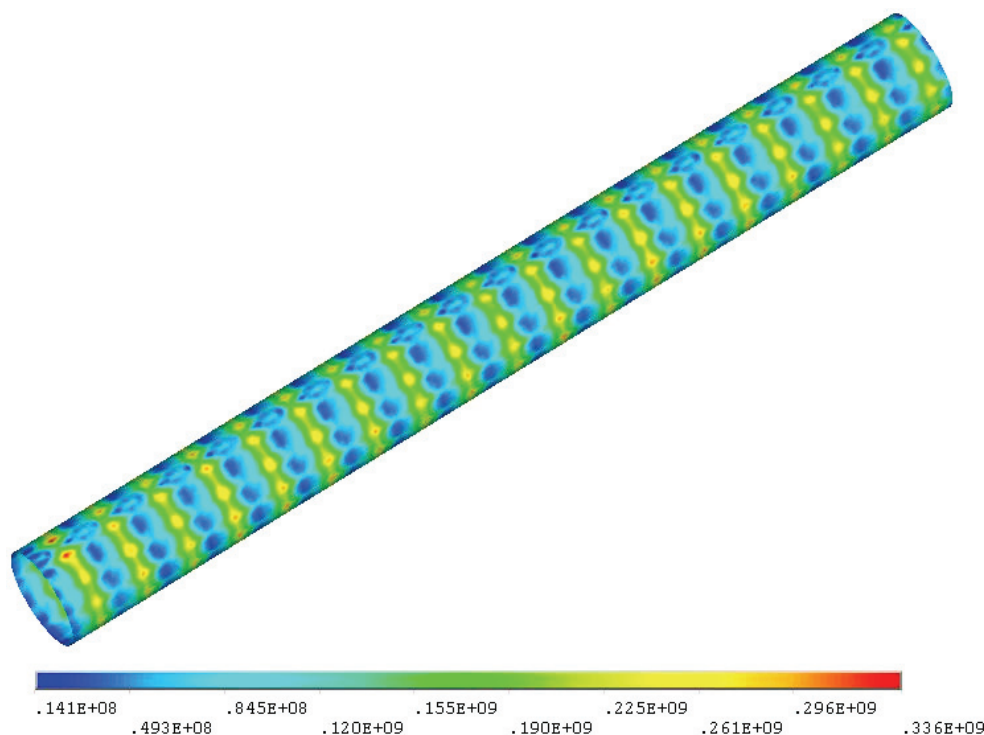


Рис. 5

Выводы

1. Пространственные модели численного моделирования процесса изготовления ТБД показали хорошее качественное совпадение с реальным производственным процессом формовки трубных заготовок.

2. Количественные отклонения результатов моделирования процесса изготовления ТБД от фактических замеров геометрических параметров ТБД не вышли за пределы допусков, установленных действующими на предприятиях трубной промышленности стандартами.

3. Дальнейшая тарировка пространственной модели численного моделирования позволит существенно повысить качество выпускаемой продукции и сократить энергетические и материальные затраты на настройку оборудования при переходе на новые типоразмеры ТБД и материалы листового штрипса.

Список литературы

1. Вашев Ю.В., Вышиваный И.Г., Киселев В.К., Костюков В.Е. и др. Диагностика и мониторинг технического состояния газопроводов при обеспечении надежности, экологической безопасности и управ-

ляемости транспорта газа. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2007. 204 с.

2. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: Учебник для студентов вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.

3. Тарлаковский Д.В., Горшков А.Г., Старовойтов Э.И. Теория упругости и пластичности. М.: Физматлит, 2002. 417 с.

4. Бабкин А.В., Селиванов В.В. Прикладная механика сплошных сред: Учебник для вузов. В 3-х томах. Т.1. Основы механики сплошных сред. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 368 с.

5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 488 с.

6. Structural integrity and fatigue crack propagation life assessment of welded and weld-repaired structures. A Dissertation Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in The Department of Mechanical Engineering by Mohammad Shah Alam B.S., Bangladesh University of Engineering and Technology, 1993 M.S., South Dakota School of Mines and Technology, 2002, December. 2005.

7. ГОСТ 3845-75 Трубы металлические. Метод испытания гидравлическим давлением. Москва, 1975. 4 с.

8. DNV-OS-F101 Submarine Pipeline Systems. Offshore Standard. Det Norske Veritas, Norway, 2000.

**NUMERICAL SIMULATION OF LARGE DIAMETER PIPE PRODUCTION
FOR DEEPWATER PIPELAYING**

V.E. Kostyukov, S.F. Peretrukhin, S.V. Fotin, K.I. Dikarev

The results are presented of the practical application of numerical simulation of a continuous cycle of technological operations to produce large diameter pipes (LDP) designed for deepwater pipelaying. The results have shown good qualitative and quantitative agreement with the parameters of the real production process within the framework of existing standards. The presented model of LDP production process is intended to be implemented in pipe industry plants, which will significantly improve product quality and reduce costs.

Keywords: finite element method, tube stock, large diameter pipes, numerical simulation, welding, expanding, calibration, strip.