

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОКРЫТИЙ ПРЕССОВЫХ ВАЛОВ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН С УЧЕТОМ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА

Санников А. А., Королев А. В.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», Екатеринбург, Россия (620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37), e-mail: general@usfeu.ru

В статье исследовано влияние различной геометрии технологического скоса на напряженно-деформированное состояние на краях покрытий. Исследование проводилось на имитационной модели контакта двух валов методом конечных элементов. В модели использовались материалы с твердостью 95 Шор А и 70 Шор D, которые используются для облицовки прессовых валов бумагоделательных машин. Физико-механические свойства материалов задавались на основе данных диаграммы «напряжение-деформация». Определены нормальные напряжения и напряжения сдвига, величина деформации на краях покрытия при линейном давлении 100 кН/м. Установлено, что наличие скоса приводит к снижению напряжений и деформаций по краям покрытий. Выявлено, что геометрическая форма скоса влияет на величину действующих напряжений и деформаций в покрытии. Показано, что правильно подобранная геометрия скоса дает существенное снижение напряжений и деформаций по краям покрытий, что повышает долговечность покрытия.

Ключевые слова: покрытие, полиуретан, напряженно-деформированное состояние, краевой эффект, технологический скос.

DEVELOPMENT OF NUMERICAL CALCULATION METHODS OF PRESS ROLL COATINGS OF PAPERMAKING MACHINES WITH CONSIDERING OF EDGE EFFECT

Sannikov A. A., Korolev A. V.

The Ural state forest engineering university, Yekaterinburg, Russia (620100, Yekaterinburg, street Siberian Route, 37), e-mail: general@usfeu.ru

In the article investigated the influence of various geometry of technological bevel on the stress-strain state at the edges of coatings. The research was conducted on a simulation model of the contact between two rolls by finite element method. In the model used materials with a hardness of 95 Shore A and 70 Shore D, which are used for lining of press rolls of papermaking machines. Physical and mechanical properties of the materials were specified to according to data of diagram "stress-strain". Determined the normal stress and shear stress, the strain at the edges coating at a line pressure of 100 kN / m. Established, that the presence of bevel reduces stress and strain on the edges of coatings. Revealed, that the geometric shape of the bevel effect on the value of the effective stress and strain in the coating. Shown, that properly chosen geometry bevel provides a significant reduction of stress and strain on the edges of coatings, which increases the durability of the coating.

Key words: coating, polyurethane, stress-strain state, edge effect, technological bevel.

Введение

В бумагоделательной машине широко применяются валы с полимерными покрытиями. Покрытия изготавливаются из эластомерных материалов, в частности, полиуретана и резины.

Валы прессовой части наиболее нагружены, вследствие чего покрытия имеют минимальный срок службы из-за появления дефектов, которые снижают качество вырабатываемой продукции, увеличивают вибрацию валов, поддерживающих конструкции (станин) и прессовую часть в целом [5].

Наиболее опасным дефектом, приводящим к останову машины и замене вала, является разрушение адгезионного соединения полиуретанового покрытия и рубашки вала. Различается несколько видов разрушения адгезионного соединения. Общепринятой считается сле-

дующая классификация видов разрушений: адгезионное, когезионное и смешанное. При скоростях деформирования, превышающих скорости релаксационных процессов, полимер ведет себя как твердое тело с высоким модулем упругости. В этом случае характер разрушения будет по границе раздела металл-полимер, то есть адгезионный [1]. Доля такого рода дефекта составляет порядка 90 % [6].

Разрушение может возникнуть в любом месте покрытия. Опыт эксплуатации показывает, что наиболее вероятное место разрушения – край покрытия. Такое явление принято называть краевым эффектом. Причиной любого отслоения является недостаточная адгезия покрытия с рубашкой вала. Краевой эффект возникает вследствие повышенных напряжений и больших деформаций в материале покрытия. Для снижения напряжений и деформаций покрытий по краям многие зарубежные фирмы предусматривают технологический скос.

Отсутствие уточненных методов расчета краевого эффекта не позволяет многим отечественным производителям принимать обоснованную геометрию скоса покрытия, поэтому приходится заимствовать форму скоса у иностранных компаний, что не всегда приводит к нужным результатам. Угол и длина скоса не постоянны и зависят от физико-механических характеристик материала, от толщины покрытия и других условий.

Для разработки методов расчета покрытий с учетом краевого эффекта в зависимости от условий нагружения, физико-механических свойств покрытия, наиболее актуальными представляются исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) покрытий. Данная методика позволит обоснованно выбирать геометрические параметры скосов по краям покрытий и устанавливать причины разрушений покрытий из полиуретана в условиях эксплуатации валов.

При разработке методов расчета покрытий с учетом краевого эффекта проводим анализ параметров НДС в зоне контакта по краям валов, путем постановки следующих задач:

определения зависимости твердости и геометрии скоса покрытия при нагружении;

определения величины деформаций, максимального напряжения сдвига, нормальных напряжений на краях покрытия при различной геометрии скоса.

На основании проведенных исследований сформулировать рекомендации по рациональной геометрии скоса.

Моделирование контакта двух цилиндров с покрытием реализуем в конечно-элементном пакете Ansys (в рамках обучающих лицензий и студенческих версий программ).

Вследствие симметрии модели для сокращения времени расчета и повышения точности результатов целесообразно использовать $\frac{1}{4}$ часть геометрической модели (рис. 1).

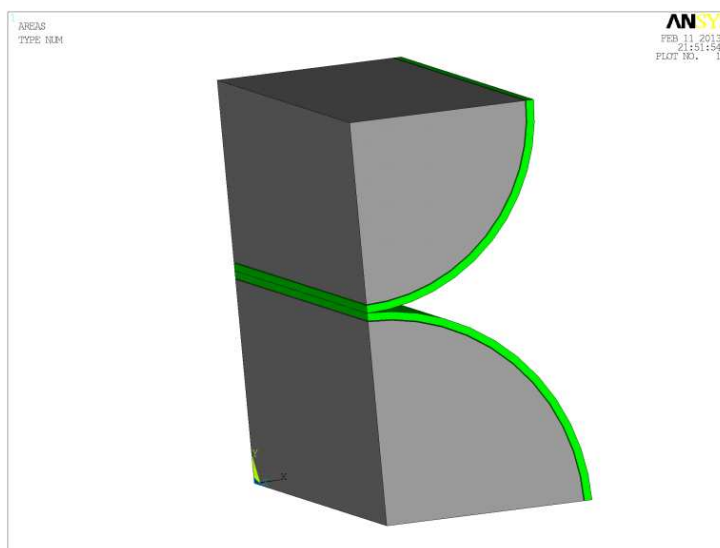


Рис. 1. Геометрическая модель контакта валов

Задача контакта двух цилиндров, имеющих эластомерные покрытия, относится к классу контактных задач *flexible-to-flexible*, когда жесткости контактируемых тел близки и происходит деформирование обоих тел [3]. В предположительной зоне контакта валов моделируется симметричный контакт (так как свойства контактирующих тел подобны) без трения, с использованием 3D конечных элементов (КЭ) *CONTA 174* и *TARGE 170* (для контакта типа *surface - to - surface*). На валы наносятся элементы *PLANE 82*, на покрытия наносятся элементы *SOLID 185* с назначением соответствующего материала. Покрытие крепится к рубашке вала с помощью связующего слоя, элементами типа *LINK11*. Оба вала имеют соответствующие закрепления: нижний вал зафиксирован во всех трех направлениях. Верхнему валу назначена одна степень свободы вдоль вертикальной оси *OY* и приложена нагрузка в виде давления, которое создает линейное давление в зоне контакта 100 кН/м . Конечно-элементная модель валов представлена на рис. 2.

В качестве исследуемых покрытий были приняты полиуретаны с твердостью 95 ШорА и 70 ШорD. Данные материалы широко используются для покрытий валов бумагоделательных машин. Для моделирования гиперупругих материалов, к которым относятся полиуретаны, необходимо выбрать модель поведения материала на основе данных диаграммы «напряжение-деформация», полученной на разрывной машине.

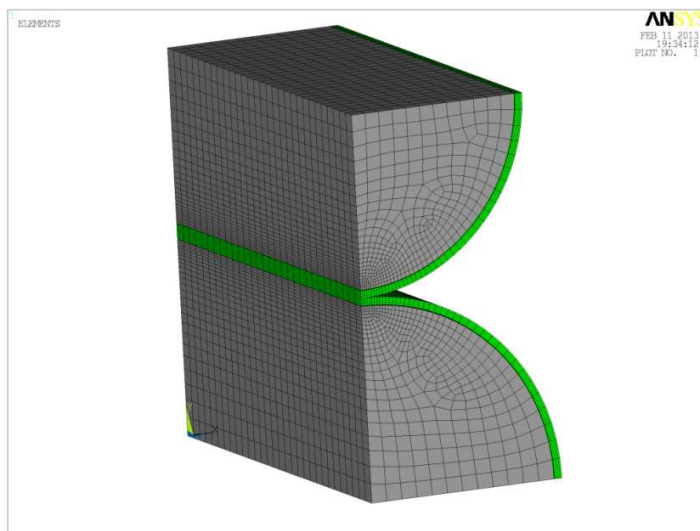


Рис. 2. Конечно-объемная модель контакта валов

Диаграммы «напряжение-деформация» для используемых материалов показаны на рис.

3.

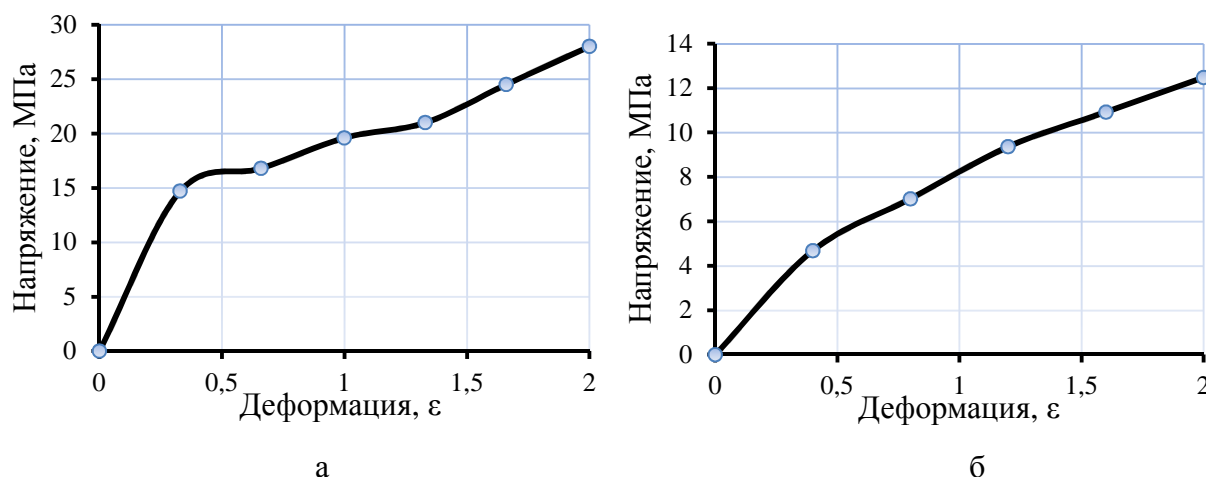


Рис. 3. Диаграмма «напряжение-деформация»:

а – полиуретан твердостью 70 ШорD, б – полиуретан твердостью 95 ШорA

Данные модели поведения материалов хорошо аппроксимируются моделью Муни-Ривлина с тремя параметрами (рис. 4).

Плотность энергии деформации для материала Муни-Ривлина с тремя параметрами имеет вид [7]:

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + C_{11}(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3) + \frac{K}{2}(J - 1)^2, \quad (1)$$

где C_{10} , C_{01} , C_{11} – константы материала, характеризующие девиатор деформации материала, \bar{I}_1 , \bar{I}_2 – первая и вторая инварианты девиатора деформаций, $K=2/d$, d – параметр сжимаемости материала, J – относительное изменение объема.

Константы материала с твердостью 70 шорD: $C_{10} = -8,64 \cdot 10^6$ Па, $C_{01} = 2,33 \cdot 10^7$ Па, $C_{11} = 1,08 \cdot 10^6$ Па.

Константы материала с твердостью 95 шорА: $C_{10} = 1,64 \cdot 10^6$ Па, $C_{01} = 1,34 \cdot 10^6$ Па, $C_{11} = 1,59 \cdot 10^4$ Па.

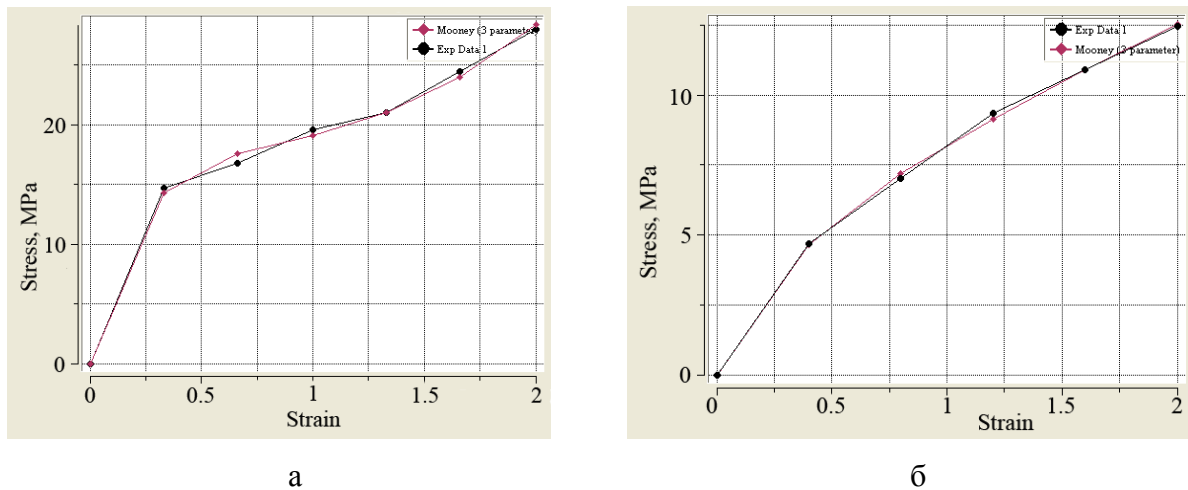


Рис. 4. Аппроксимация поведения материала моделью Муни-Ривлина с тремя параметрами: а – полиуретан твердостью 70 ШорD, б – полиуретан твердостью 95 ШорА

Геометрия скосов, используемых в исследовании, приведена на рис. 5, а геометрические размеры в таблице 1.

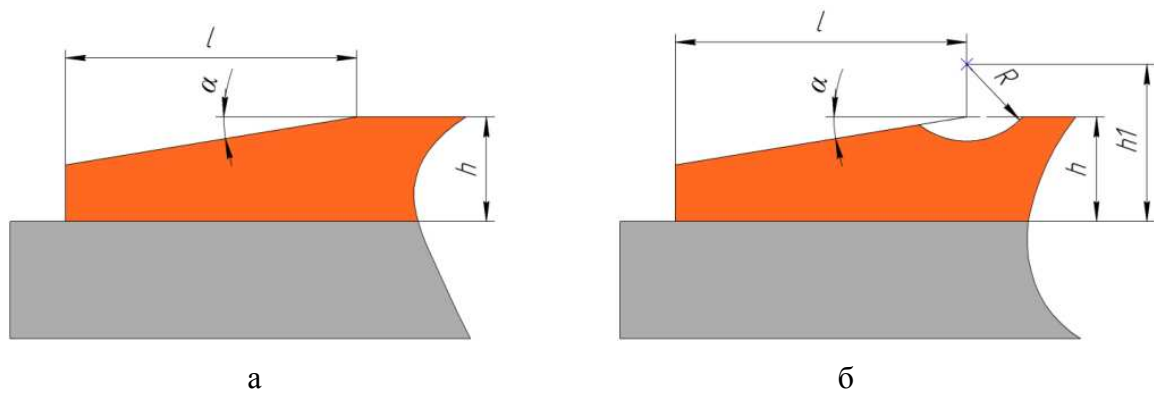


Рис. 5. Геометрии скоса покрытия: а – скос № 1, б – скос № 2

Таблица 1

Размер	Скос №1	Скос №2
Толщина покрытия h , мм	20	20
Угол наклона α , град	5	20
Длина скоса l , мм	20	20
Радиус R , мм	–	10
Расстояние до центра окружности h_1 , мм	–	20

Для расчета напряжений и деформаций используем основные соотношения теории упругости в матричном виде [2].

Связь перемещения $\{q\}$ в узлах конечно-элементной модели с деформацией определяется выражением:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{q\}, \quad (2)$$

где $\{\varepsilon\}$ – деформации узлов конечных элементов; $[B]$ – матрица перехода от перемещений узлов к деформациям в произвольной точке [4].

Напряжения определяются по формуле:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}, \quad (3)$$

где $\{\sigma\}$ – напряжения узлов конечных элементов; $[D]$ – матрица модуля упругости материала.

Результаты расчетов напряжений и деформации сведены в таблицу 2, картины напряжений и деформаций для материала с твердостью 70 ШорD показаны на рисунке 6, для материала с твердостью 95 ШорА рисунке 7.

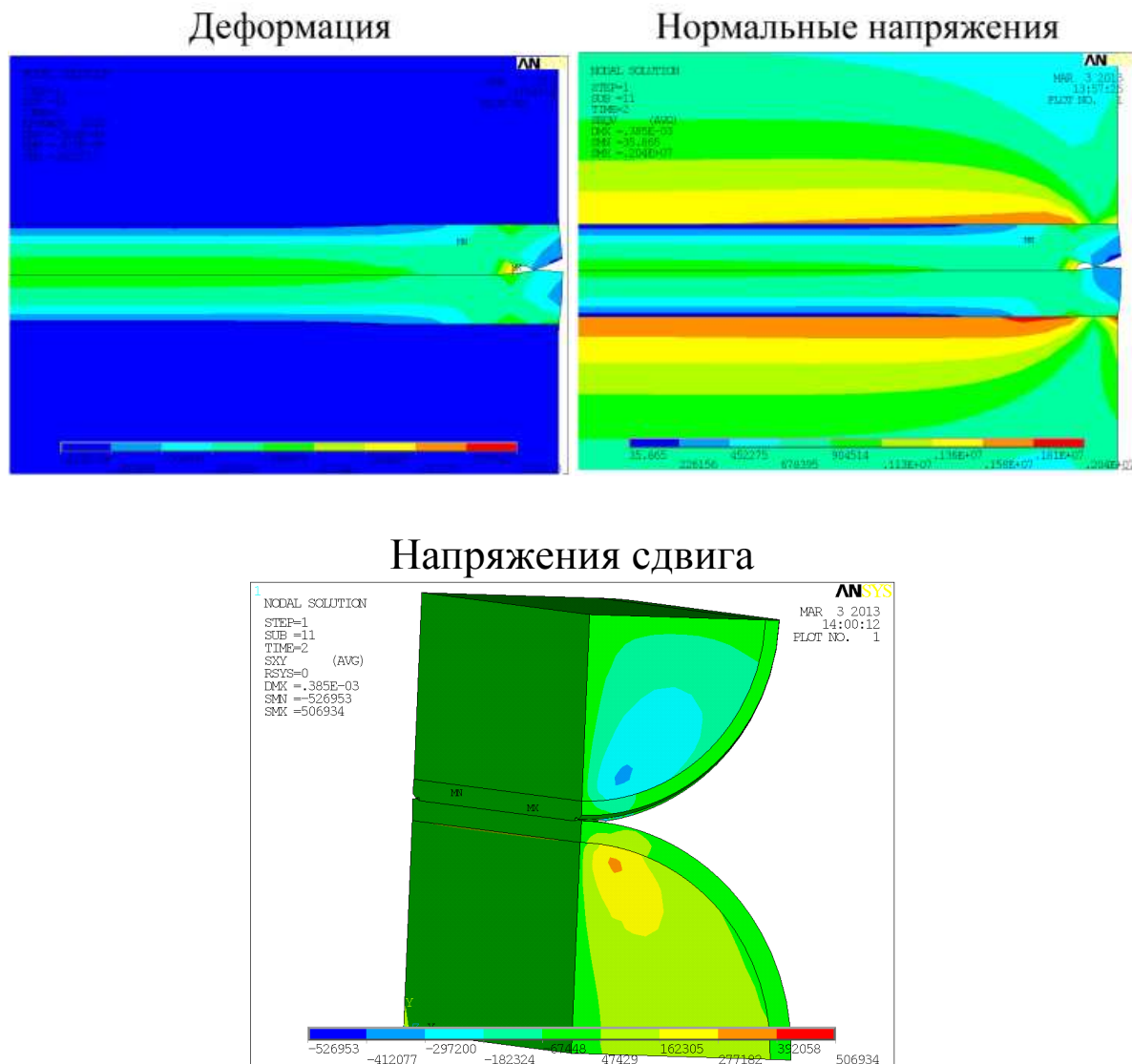


Рис. 6. Результаты численных расчетов

Таблица 2

Параметры	Твердость покрытия	Скос № 1	Скос № 2	Без скоса
		Линейное давление 100 кН/м		
Макс. нормальные напряжения, МПа	70D	4,6	2,4	4,9
Макс. напряжения сдвига, МПа		0,57	0,27	0,63
Макс. деформации в покрытии		0,027	0,022	0,029

Макс. нормальные напряжения, МПа	95A	4,7	2,02	5,03
Макс. напряжения сдвига, МПа		0,57	0,43	0,62
Макс. деформации в покрытии		0,132	0,103	0,138

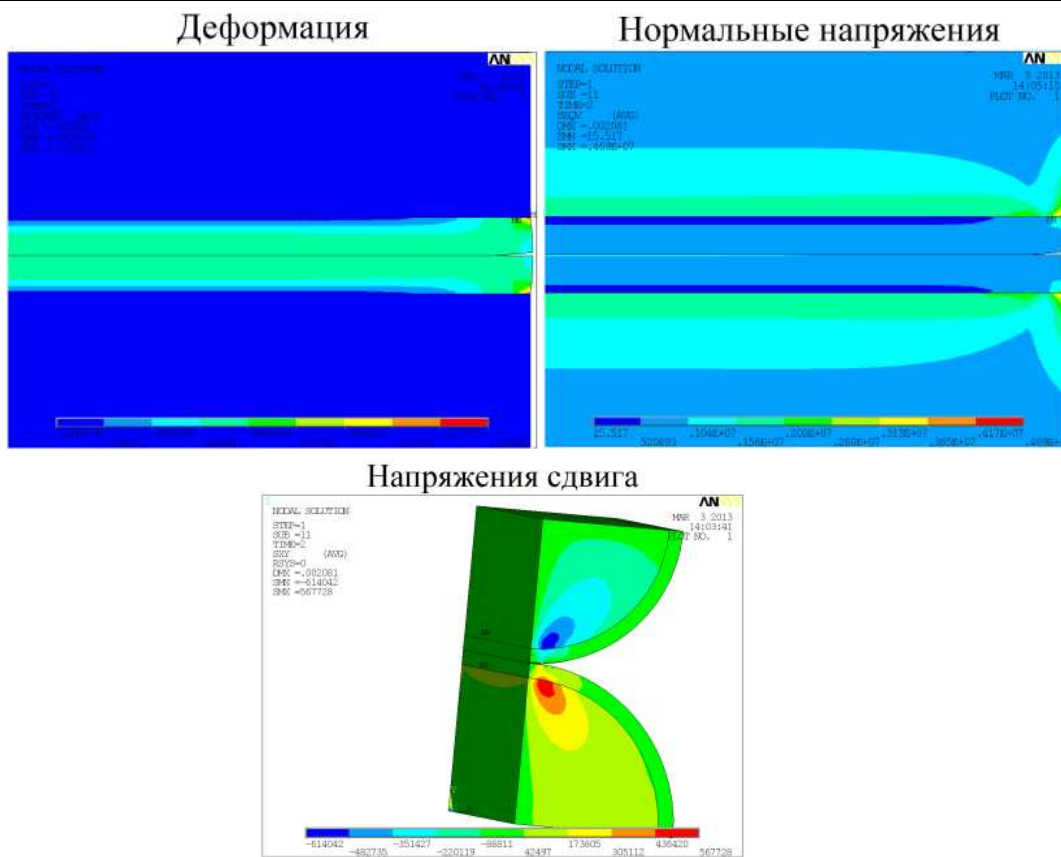


Рис. 7. Результаты численных расчетов

В статье приведены количественные и качественные результаты моделирования напряженно-деформированного состояния покрытий валов по краям. Было установлено, что увеличение угла скоса приводит к снижению напряжений и деформаций по краям покрытий. Форма скоса также влияет на величину действующих напряжений и деформаций в покрытии. Расчет показал, что значения напряжений в покрытии для скоса № 2 в два раза меньше, чем в покрытии без технологического скоса. Величина деформации снижается на 25 %. Величина напряжений и деформаций в покрытии для скоса № 1 незначительно меньше, чем в покрытии без скоса. Это показывает, что данная геометрия неудачна и не дает желаемого результата. Таким образом, правильно подобранная геометрия скоса дает существенное снижение напряжений и деформаций по краям покрытий, что повышает долговечность покрытия.

Результаты расчетов показали необходимость индивидуального выбора формы скоса для каждого конкретного вала, с учетом физико-механических свойств материала покрытия и величины линейного давления между валами.

Данная методика может помочь при выборе геометрии скоса на полимерных покрытиях валов и может быть рекомендована производителям полимерных покрытий.

В дальнейшем планируются расширить исследования напряженно-деформированного состояния покрытий по краям путем увеличения номенклатуры геометрических форм ско-сов.

Список литературы

1. Берлин А. А. Основы адгезии полимеров /А. А.Берлин, В. Е. Басин. – М.: Химия», 1974. 392 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 540 с.
3. Королев А. В. Исследование напряженного состояния покрытий прессовых валов бумагоделательных / А. В. Королев, А. А. Санников // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/107-8490>.
4. Лихнов П. П. Динамика системы цилиндр – оболочка / П. П. Лихнов. – М.: Машиностроение, 1988. – 152 с.
5. Санников А. А. Современные проблемы технической эксплуатации оборудования. Вибродиагностика, триботехника, вибрация и шум: монографический сборник / Под ред. А. А. Санникова, Н. В. Куцубиной. – Екатеринбург: Уральск. гос. лесотехн. ун-т, 2009. – 416 с.
6. Санников А. А. Структурные параметры технического состояния покрытий / А. А. Санников, А. В. Королев // Новые материалы и технологии в машиностроении / Под общ. ред. Е. А. Памфилова. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. – Брянск: БГИТА, 2012. – Вып. 16. – С. 91–93.
7. Macdonald, Bryan J. Practical Stress Analysis With Finite Elements, Cambridge: Cambridge University Press, 2010. – 185 p.

Рецензенты:

Сиваков Валерий Павлович, доктор технических наук, профессор кафедры машин и оборудования ЦБП, УГЛТУ, г. Екатеринбург.

Кашенко Михаил Петрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики, УГЛТУ, г. Екатеринбург.