

Таким образом, устойчивость параметров технической системы „прокатный стан” в режиме непосредственного автоматического управления АСУ ТП в полной мере определяется стабильностью набора преобразований  $E_n^i \begin{pmatrix} n \\ e_i \\ 1 \end{pmatrix}$ .

Корректировка обобщенной функции управляющего воздействия  $f(^nW)$  АСУ ТП в режиме непосредственного автоматизированного управления в соответствии с (3) была выполнена для условий ШСГП 2000 ОАО НЛМК (РФ) при прокатке полосового проката из стали 08 пс размером 8,0 x 1680 мм. Сравнение параметров прокатки по схеме без корректировки и с корректировкой показало в, последнем случае, снижение отклонения кинематических параметров от оптимальных на 28%, что обеспечило снижение продольной разнотолщинности на 8,3%.

Вывод: корректировка обобщенной функции управляющего воздействия  $f(^nW)$  АСУ ТП прокатного стана в виде выражения (3) делает возможным повышение эффективности АСУ ТП за счет обеспечения устойчивости параметров прокатного стана при выработке и реализации оперативного управляющего воздействия в режиме непосредственного автоматизированного управления.

**Список литературы:** 1. Гладчук Е.А., Анализ переходного процесса в клетке 2000//Производство проката – 2003.- № 4. – С. 31- 34. 2. Гладчук Е.А. Многоуровневое прогнозирование параметров технической системы дискретного действия на примере прокатного стана. В. сб. Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2003. Вып. 25. – С. 77 – 81. 3. Гладчук Е.А. Возможности управления геометрией и механическими свойствами толстого раската в общем случае процесса прокатки// Металлы и литьё Украины. – 2001.- № 1-2. – С. 35 - 38. 4. Гладчук Е.А. Целевое формирование показателей продукции технической системы дискретного действия на примере широкополосного проката. В. сб. Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2004. Вып. 27. – С. 65 – 70.

Сдано в редакцию 20.04.05

Рекомендовано д.т.н., проф. Михайлов А.Н.

## РАСЧЕТ ПОЛУЖЕСТКОЙ ДИСКОВОЙ МУФТЫ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСКОВ И ТРЕНИЯ МЕЖДУ НИМИ

Гондляр А.В., Чемерис А.О., Васильев В.С. (НТУУ «КПИ», г. Киев, Украина)

*The development and numerical realization of a technique of the improved calculation of semifixed disk couplings by a finite element method is considered in view of the complex decision of geometrically nonlinear task of contact frictional interaction of elastic elements at operation loadings. The importance of the account of a contact zone between disks of a elastic elements package of a clutch is marked.*

Постоянно растущие мощности машин и аппаратов, скорости движения механизмов приводят к необходимости усовершенствования существующих и разработке новых соединительных устройств приводов – муфт. Правильный выбор

типа муфты и оптимальный подбор ее параметров в приводе существенно увеличивает надежность, долговечность, эффективность, а также экономические показатели и рабочий ресурс соединяемых механизмов.

В настоящее время широкое распространение в практике проектирования машин и аппаратов химической промышленности получили муфты с различными конструкциями упругих элементов [1]. Такие муфты наилучшим образом позволяют передавать крутящий момент, при радиальном и осевом смещении валов, а также гасить крутильные колебания валов.

Среди муфт с упругими элементами в тяжелом машиностроении, и в частности в реверсивных приводах и механизмах с дистанционным управлением, широкое применение нашли дисковые полужесткие муфты (ДПМ). Ценным качеством таких муфт является возможность работы при значительных осевых и угловых смещениях валов без существенного увеличения радиальной нагрузки на валы. При передаче крутящего момента ДМП наиболее нагруженным является пакет упругих дисков. При этом прогиб диска может в несколько раз превышать толщину самого диска, а условия их контакта в пакете могут быть достаточно неоднородными. Не менее важным является вопрос учета сил трения между дисками при угловом и осевом смещении соединяемых валов. Однако несмотря на успехи достигнутые в отрасли создания систем виброзащиты, проблема обеспечения условий равномерности вращения и компенсации угловых и радиальных смещений соединяемых валов еще требует дальнейшего развития.

Решение этой проблемы требует в первую очередь усовершенствования методов расчета и рационального определения характеристик конструкций. Однако инженерные методы определения податливости ДПМ не могут охватить полный спектр особенностей их работы, который включает в себя необходимость комплексного решения геометрически и физически нелинейной задачи контактного фрикционного взаимодействия упругих элементов, исследование переходных и установившихся режимов работы, исследование колебательных процессов в приводных системах с ДПМ. Это, в свою очередь, приводит к значительным погрешностям по определению основных параметров работы проектируемых машин и, как следствие, к существенному снижению сроков их службы.

Для детального решения этой проблемы необходимо задействовать численные методы расчета, ведущее место среди которых занимает метод конечных элементов (МКЭ) [2,3]. Выбор МКЭ обусловлен тем, что он позволяет на базе специально разработанного конечного элемента естественным образом моделировать все особенности деформирования пакета дисков муфты в результате действия на нее эксплуатационных нагрузок с учетом больших перемещений, контактного взаимодействия упругих элементов и трения между ними.

Поэтому разработка уточненных моделей, направленных на создание прогрессивных методик расчета муфт и на определение их эксплуатационных характеристик имеет большое значение для улучшения условий работы существующих и проектирования новых видов конструкций. В связи с этим в настоящей работе для анализа процессов деформирования упругих элементов муфт используется итерационно-аналитическая теория оболочек [4], позволяющая на базе построения специальной процедуры, определять физически обоснованные функции приведения, естественным образом реагирующие на возможные изменения напряженного состояния в процессе контактного взаимодействия и отслоения упругих элементов муфты, а также получение

на их основе разрешающей системы трехмерных уравнений, порядок которой не зависел бы от числа слоев пакета.

В этом случае формально представим компоненты  $u_i$  вектора перемещений в виде:

$$u_i = \sum_{s=1}^S F_s^i(x^3, t) v_i^s(x^1, x^2, t), \quad (1)$$

где  $v_i^s$  - компоненты обобщенного вектора перемещений поверхности приведения,  $x^1 x^2$  оболочки, определенные из решения краевой задачи в рамках трехмерного оператора теории упругости;

$F_s^i$  - функции приведения.

Используя вариационного принципа Гамильтона-Остроградского, получаем уравнение:

$$\begin{aligned} & \int_{t_0}^{t_1} \left\{ \int_V A_j^r \left( V_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; \frac{\partial^2 v_i^s}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; \frac{d^2 F_s^i}{(dx^3)^2}; p_j^r \right) \delta v_j^r dV + \right. \\ & + \int_V B_j^r \left( V_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; \frac{\partial^2 v_i^s}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; \frac{d^2 F_s^i}{(dx^3)^2}; p_j^r \right) \delta F_r^j dV - \\ & - \int_s a_j^r \left( V_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; q_j^r \right) \delta v_r^j dS - \\ & \left. - \int_s b_j^r \left( V_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; q_j^r \right) \delta F_r^j dS \right\} dt = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь обозначение типа  $\delta_{v_i^s}$  и  $\delta_{F_s^i}$  означает, что варьирование функционала производится по  $v_i^s$  или  $F_s^i$ , соответственно.

Учитывая независимость вариаций  $\delta v_j^r$  и  $\delta F_r^j$ , на основании (2) запишем интегралы, для получения разрешающей системы уравнений

$$\int_{t_0}^{t_1} \left\{ \int_V A_j^r \left( V_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; \frac{\partial^2 v_i^s}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; \frac{d^2 F_s^i}{(dx^3)^2}; p_j^r \right) \delta v_j^r dV \right\} dt = 0; \quad (3)$$

$$\int_{t_0}^{t_1} \left\{ \int_V B_j^r \left( V_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; \frac{\partial^2 v_i^s}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; \frac{d^2 F_s^i}{(dx^3)^2}; p_j^r \right) \delta F_r^j dV \right\} dt = 0$$

с соответствующими интегралами для получения уравнений, описывающих граничные условия

$$\int_{t_0}^{t_1} \left\{ \int_s a_j^r \left( v_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; q_j^r \right) \delta v_r^j dS \right\} dt = 0;$$

$$\int_{t_0}^{t_1} \left\{ \int_s b_j^r \left( v_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; q_j^r \right) \delta F_r^j dS \right\} dt = 0. \quad (4)$$

Отличительная особенность выражения (2) от известных из литературных источников функционалов, используемых для построения математических моделей деформирования оболочек, заключается в том, что решение разрешающей системы уравнений, полученных на основе (3) обеспечивает определение не только вектора обобщенных неизвестных  $v_i^s$ , но также и физически обоснованных функций приведения  $F_s^i$ , независимо от физических процессов, протекающих в материале оболочки в любой момент времени (изменение условий контакта между слоями, расслоение, отрыв, пластическое деформирование, либо разрушение слоев).

Таким образом, решив систему дифференциальных уравнений (3), и, определив обобщенные неизвестные  $v_i^s$  и функции приведения  $F_s^i$ , приходим к непосредственному трехмерному представлению вектора перемещений  $u_i$  на основании формул (1), тождественно удовлетворяющему с любой заданной точностью трехмерным уравнениям движения. Выполнение этой процедуры прямыми методами может оказаться затруднительным. В то же время использование в данном случае итерационных методов, заключающихся в последовательном уточнении компонент  $v_i^s$ , либо функций  $F_s^i$ , исходя из условия минимизации вектора невязки трехмерного оператора теории упругости, позволяет существенным образом упростить получение искомого решения в связи с тем, что система уравнений (3) в этом случае представляется в виде двух подсистем:

- системы уравнений движения упругих дисков муфты, сформулированной в смысле метода разложения в ряды относительно обобщенных перемещений при фиксированных (полученных на предыдущей итерации) функциях приведения

$$C_j^{r(n-1)} \left( V_i^{s(n)}; \frac{\partial v_i^{s(n)}}{\partial x^\alpha}; \frac{\partial^2 v_i^{s(n)}}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}; p_j^r \right) = 0 \quad (5)$$

с граничными условиями типа

$$c_j^{r(n-1)} \left( V_i^{s(n)}; \frac{\partial v_i^{s(n)}}{\partial x_\alpha}; q_j^r \right) = 0 \quad (6)$$

- системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка относительно функций  $F_s^i$  в смысле метода Крылова-Канторовича при фиксированных функциях обобщенных перемещений, т.е.:

$$D_j^{r(n-1)} \left( F_s^{i(n)}; \frac{dF_s^{i(n)}}{dx^3}; \frac{d^2 F_s^{i(n)}}{(dx^3)^2}; p_j^r \right) = 0 \quad (7)$$

с соответствующими граничными условиями

$$d_j^{r(n-1)} \left( F_s^{i(n)}; \frac{dF_s^{i(n)}}{dx^3}; q_j^r \right) = 0 \quad . \quad (8)$$

Коэффициенты в уравнениях (5) и (7) представляют собой интегральные характеристики, зависящие от компонент напряженно-деформированного состояния, полученного на n-1 итерации, а именно:

$$\begin{aligned} C_j^{r(n-1)} &= C_j^{r(n-1)} \left\{ \int_h (F_s^{i(n-1)}; p_j^{r(n-1)}) dh \right\} \\ D_j^{r(n-1)} &= D_j^{r(n-1)} \left\{ \int_S (V_j^{r(n-1)}; p_j^{r(n-1)}) dS \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Такая методика решения основной уравнений (3) существенно упрощает решение задачи, поскольку соотношения (7) представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, которая может быть легко разрешима известными численными методами математической физики, а при соответствующей группировке неизвестных допускает также и аналитическое решение.

Как указывалось выше, процесс деформирования дисков в пакете упругих элементов муфты носит существенно геометрически нелинейный характер. При этом, отдельные участки исследуемых объектов могут претерпевать существенные смещения и жесткие повороты. В связи с этим при расчетах конкретных конструкций методом конечных элементов особо актуальными становятся вопросы, связанные с выбором формы конечных элементов (КЭ), назначением аппроксимирующих функций, удовлетворением условий совместности деформаций при смещениях тела как жесткого целого. Следует отметить, что пренебрежение последним обстоятельством приводит к появлению в теле "фиктивных" деформаций, наличие которых существенным образом сказывается на ухудшении сходимости численных решений.

В настоящее время наиболее эффективным аппаратом устранения "фиктивных" деформаций при жестких смещениях элементарных объемов является моментная схема метода конечных элементов (МСКЭ), предложенная в работах. [5]. Этот метод базируется на неявном учете жестких смещений за счет улучшения свойств матрицы жесткости путем коррекции частей выражений для вычисления ее коэффициентов, определяющих сходимость и устойчивость приближенных решений.

В настоящей работе для исследования физически нелинейных процессов, протекающих в пакете дисков муфты, применяются четырехугольные криволинейные КЭ с полилинейным законом восполнения функций перемещений. Как отмечается в [6] такие элементы не уступают другим при описании физически нелинейного поведения конструкции, и в тоже время являются более эффективными при описании напряженно-деформированного состояния зон упругой работы материала.

Коэффициенты линейризованной матрицы жесткости оболочечного многослойного КЭ определяются в соответствии с формулой:

$$\begin{aligned}
 G_{fsrt}^{t'p'} &= \tilde{G}_{fsrt}^{t'p'} + G_{fsrt}^{\approx t'p'} = \\
 &= \frac{1}{4} \sum_{m=1}^M \int_{h_m} \left[ c_{cm}^{ijkl} \left( \tilde{B}_{klf(r)}^{mt'} \tilde{B}_{ijs(t)}^{mp'} + \frac{1}{3} \tilde{D}_{klvf(r)}^{mt'} \tilde{D}_{ijvs(t)}^{mp'} \omega_{ij}^{vv} + \right. \right. \\
 &+ \left. \frac{1}{9} \tilde{A}_{klv\mu f(r)}^{mt'} \tilde{A}_{ijv\mu s(t)}^{mp'} \delta_{ij}^{33} \omega_{\mu}^v \right) + \\
 &+ g_m^{kp} \left\{ \sigma_{n-1^m}^{oij} \tilde{B}_{ijkpSftr}^{mt'p'} + \frac{1}{3} \sigma_{n-1^m}^{ij} \tilde{D}_{ijkpvSrt}^{mt'p'} \omega_{ij}^{vv} + \right. \\
 &+ \left. \frac{1}{9} \sigma_{n-1^m}^{ij} \tilde{A}_{ijkpv\mu Srt}^{mt'p'} \delta_{ij}^{33} \omega_{\mu}^v \right\} \left. \right] \sqrt{g_m} dx^3
 \end{aligned} \tag{10}$$

На основании вышеизложенных принципов была разработана конечно-элементная модель ДПМ (рис.1).

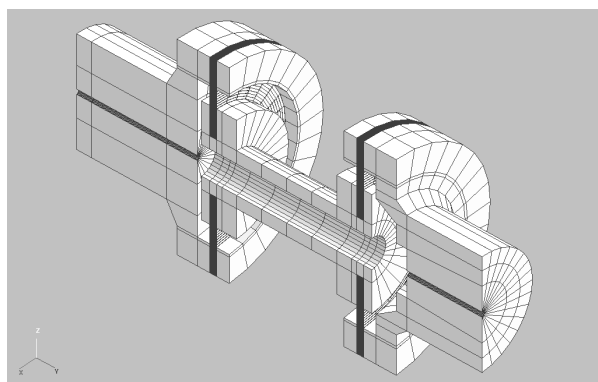


Рис.1 Конечно-элементная модель муфты

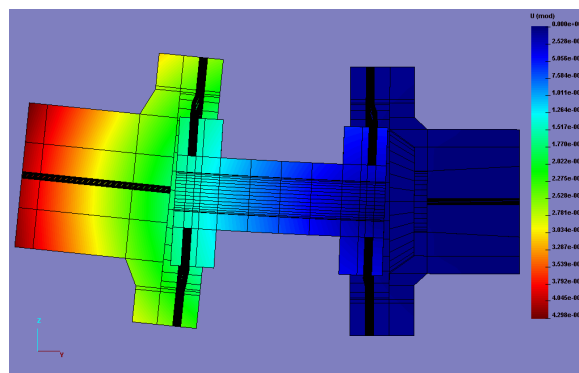


Рис.2. Деформированная схема муфты

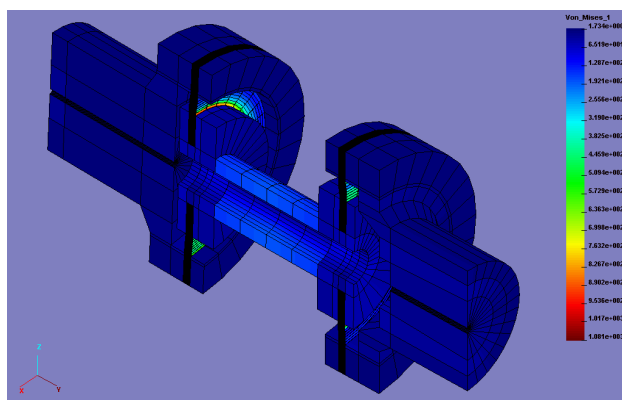


Рис.3. Распределение эквивалентных напряжений в ДПМ

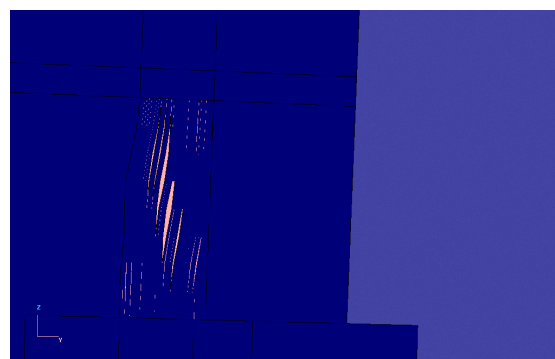


Рис. 4. Зоны расслоения и сдвига в дисковом пакете муфты

В этой модели конечные элементы в пакете дисков позволяют моделировать контактное взаимодействие и отслоение дисков муфты с учетом трения между ними. Деформированная схема ДПМ при угловом смещении валов на 0.5 градуса представлена на рис 2 (коэффициент увеличения деформаций 50).

На рис.3. представлено распределение эквивалентных напряжений по 4-й теории прочности, а на рис. 4 зоны расслоения и сдвига между дисками в пакете.

Таким образом, с помощью предложенной методики были исследованы особенности деформирования ДПМ при угловом смещении соединяемых валов с учетом контактного взаимодействия предельно нагруженных упругих элементов в дисковом пакете муфты.

Установлено, что пренебрежение фактором учета контактного геометрически нелинейного взаимодействия упругих элементов дисковой полу жесткой муфты приводит к количественно неверным результатам и, как следствие, к нерациональным проектным решениям муфт.

На базе проведенных исследований разработана новая конструкция ДПМ, с радиусом дисков меньшим, чем у существующих аналогов, при сохранении ее прочностных и динамических характеристик.

**Список литературы:** 1. Поляков В.С., Барбаш И.Д., Ряховский О.А. Справочник по муфтам // Л.: Машиностроение. 1979. 2. Die Methode Der Finiten Elemente In Der Festkorpermechanik. Unter der Gesamtedaktion von J. Altenbach und A.S. Sacharov. Leipzig VEB Fachbuchverlag, 1982. 3. Сахаров А.С., Кислоокый В.Н., Киричевский В.В. и др. Метод конечных элементов в механике твердых тел.// . Киев: Вища школа, 1982. 4. Бате К., Вилсон В. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – Москва. 1982. 5. Сахаров А.С. Моментная схема конечных элементов (МСКЭ) с учетом жестких смещений // Сопротивление материалов и теория сооружений. – 1974. -Вып. 24. -С. 147-156. 6. В.А. Баженов, А.С. Сахаров, А.В. Гондлях, С.Л. Мельников. Нелинейные задачи механики многослойных оболочек. Киев, 1994.

Сдано в редакцию 27.04.05

Рекомендовано д.т.н., проф. Параскив Д.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ ТОНКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ ПРИРОДНОГО КАМНЯ**

**Горобец И.А., Михайлов А.Н. (ДонНТУ, Донецк, Украина)**

*Factors which determine productivity of grinding of products from a natural stone are revealed. The estimation of influence of factors on productivity is executed. Circuits of tool systems of grinding of a stone are offered.*

В настоящее время изделия из природного камня используются как престижный, долговечный и неприхотливый, с точки зрения ухода, материал для облицовки фасадов сооружений. Заготовки из природного камня используются и в монументальном строительстве, а также и как художественно-прикладной материал. Особенностью процесса получения изделий из камня является не только продолжительный по времени, но и разнообразный по характеру цикл удаления значительного поверхностного слоя материала торцевым алмазным шлифованием.