

КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ГИЛЬЗ С БЛОКОМ ЦИЛИНДРОВ ГИДРООБЪЕМНЫХ ПЕРЕДАЧ

Введение. Решение контактных задач для тонкостенных элементов машиностроительных конструкций сопряжено с множеством проблем. В частности, основные трудности обусловлены тем, что классические варианты кинематических гипотез теории стержней, пластин и оболочек, будучи положены в основу соответствующих конечных элементов (КЭ), приводят к особенностям в распределении контактных давлений. Этот характер распределения контактных давлений противоречит их физической природе. В связи с этим в ряде работ [1-11] был предложен усовершенствованный конечный элемент, который учитывает эффекты сдвига и поперечного обжатия при моделировании контактного взаимодействия. Этот Shell-элемент продемонстрировал удовлетворительную точность на решении тестовых задач. В связи с этим было предложено применить его для решения прикладных задач, возникающих при проектных исследованиях конкретных изделий.

Постановка задач. Из ряда прикладных задач, для которых можно рекомендовать использование усовершенствованного конечного элемента, одним из наиболее актуальных и важных является расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) гильз цилиндров гидрообъемных передач (ГОП).

Анализ конструкций гидрообъемных передач показывает, что использование аналитических методов при определении напряженно-деформированного состояния их элементов затруднено, а зачастую невозможно из-за сложной геометрической формы, граничных условий и условий нагружения. В связи с этим необходимо основное внимание уделить численным и экспериментальным методам исследований. В частности, наилучшими возможностями среди множества методов обладает метод конечных (МКЭ). Он и был использован, причем с применением созданных авторских Shell-элементов, а также в классической конечно-элементной постановке (в среде ANSYS) [1-11].

Анализ состояния расчетов элементов гидрообъемных передач. Анализ большого количества публикаций, посвященных исследованию гидрообъемных механизмов трансмиссий и гидрообъемных механизмов поворота, позволяет сделать следующие выводы.

1. Перспективы успешного применения гидрообъемных передач в отечественных транспортных средствах, в частности, танках [www.mogozov.com.ua], обусловлены как мировыми тенденциями в этой области, так и особенностями компоновки украинских военных гусеничных машин и их моторно-трансмиссионного отделения.

2. В настоящее время создана достаточно стройная и законченная теория, охватывающая все стороны анализа, структурного и параметрического синтеза элементов ГОП.

3. Практически отсутствуют в научной литературе методики исследования НДС элементов гидрообъемных передач, что обесценивает все положительные результаты, получаемые при обеспечении тактико-технических характеристик (ТТХ) за счет рационального выбора параметров проектируемых передач по критериям минимальных механических и объемных потерь, наилучшей тяговой динамики.

4. Для проектируемых конструкций ГОП военных гусеничных машин характерны растущая напряженность конструктивных элементов (высокие рабочие давления,

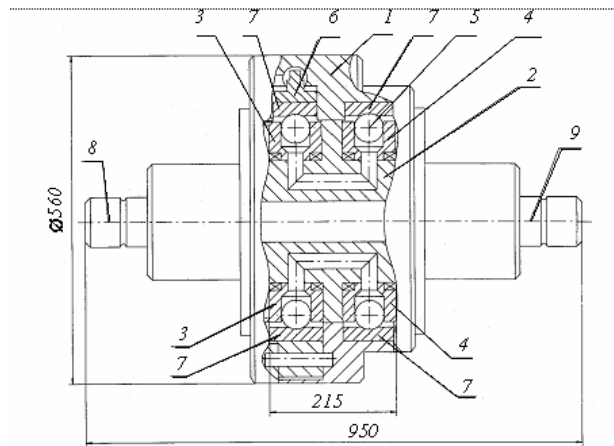
угловые скорости вращения, контактные давления, температура рабочей жидкости), а также самые неблагоприятные сочетания этих факторов.

Таким образом, требуется дальнейшее развитие этих методов и совершенствование моделей, в частности, с ориентацией на применение новых типов КЭ [1-11].

Моделирование контактного взаимодействия втулки гидрообъемной передачи с бандажом. Исследование НДС контактирующих элементов машиностроительных конструкций является одним из наиболее ответственных этапов их проектирования [12-17]. Так, при проектировании радиальных гидрообъемных передач большой удельной мощности перед проектантами возникают чрезвычайно сложные задачи при обосновании конструктивных решений и условий эксплуатации данных передач. В частности, это обусловлено тем, что элементы этих передач (рис. 1) находятся в условиях интенсивных термомеханических нагрузок (рис. 2) при ограничениях на габаритные размеры. Кроме того, от них требуется высокая чистота обработки сопряженных поверхностей для снижения потерь на трение (например, шарового поршня по ротору и статору). Для устранения возникающих противоречивых требований одним из вариантов решения задачи является гильзование цилиндров, т.е. размещение тонкой вставки из высокопрочного материала в рабочие цилиндры гидронасоса и гидромотора.



Рис. 1. Гидропередача ГОП-900 конструкции ВНИИГидропривод и ХКБМ им. А.А. Морозова с шариковыми поршнями [18]



1 – корпус; 2 – блок цапфенных распределителей; 3 – блок цилиндров насоса; 4 – блок цилиндров гидромотора; 5 – шарик-поршень; 6 – статор насоса; 7 – обоймы (реактивные кольца) насоса и гидромотора; 8 и 9 – входной и выходной валы гидропередачи

В этом случае блок цилиндров приобретает вид, представленный на рис. 3. При этом технология установки гильз-втулок предполагает их охлаждение и расположение в канале цилиндра, после чего при выравнивании температур сопряженных деталей реализуется соединение с натягом. Таким образом, тонкостенная втулка находится в условиях действия совокупности факторов: внутреннее давление, предварительный натяг, реализуемый нагревом ее до температуры, соответствующей величине номинального натяга, а также дополнительный нагрев по внутренней поверхности в зоне ниже нижней мертвой точки шарового цилиндра до рабочей температуры масла. В первом приближении окружающий материал можно моделировать в виде жесткого бандажа.

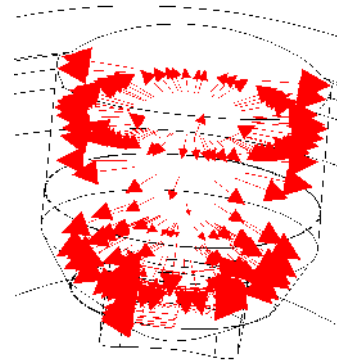
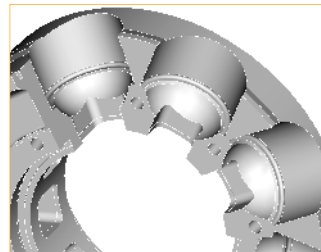


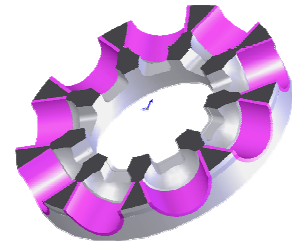
Рис. 2. Давление на стенки цилиндров гидропередачи ГОП-900 – до 35 МПа

Расчетная схема цилиндрической оболочки (втулки) приобретает вид, представленный на рис. 4. На нем показаны точки: 1 – нижняя точка сопряжения втулки с цилиндром; точка 2 – нижняя внутренняя точка втулки; 3 – нижняя мертвая точка движения шарового поршня; 4 – текущая точка расположения шарового поршня при его движении; 5 – верхняя мертвая точка движения шарового поршня; 6 – верхняя внутренняя точка втулки; 7 – верхняя точка сопряжения втулки с цилиндром, а также T_0 – установившаяся температура в периферийной части и T_1 – рабочая температура масла в зоне высокого давления ГОП.

Рис. 3. Исходное и усовершенствованное (с установкой втулок – гильз) исполнение блока цилиндров гидропередачи



Исходный вариант



Вариант со втулками

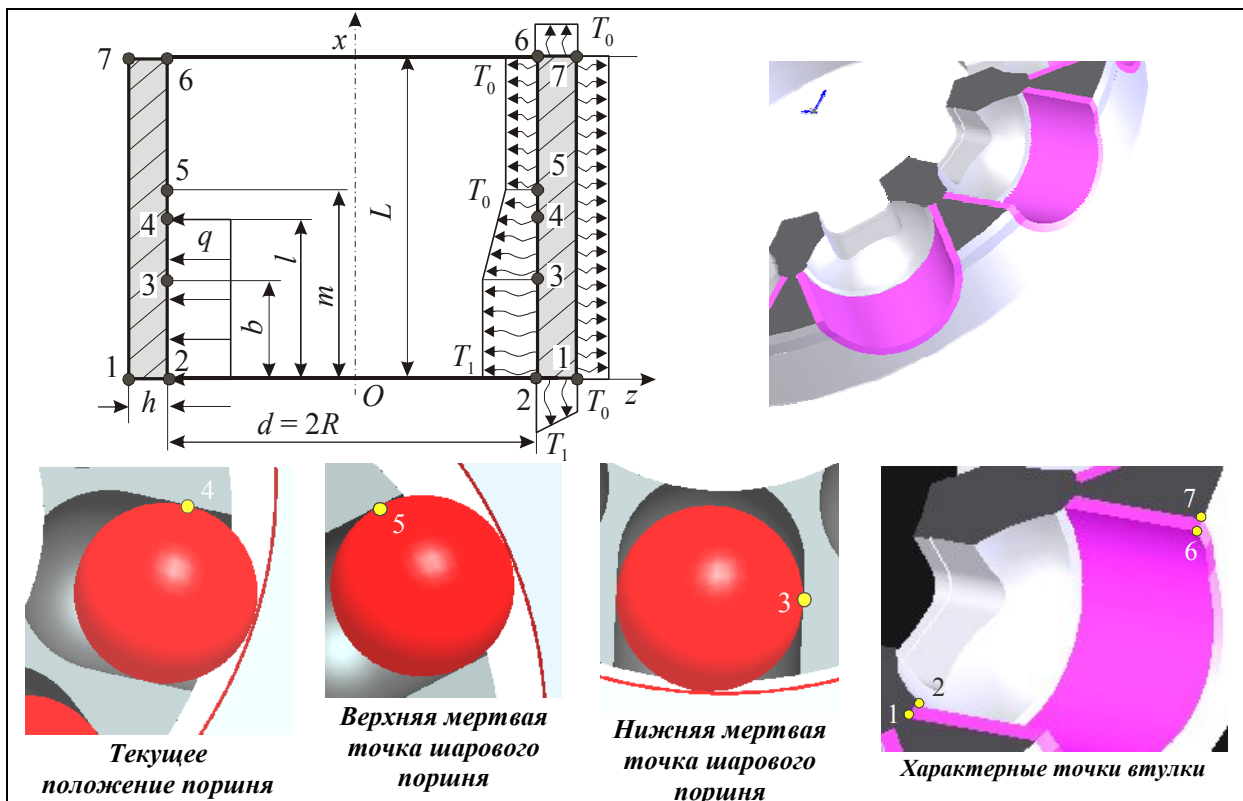


Рис. 4. Расчетная схема цилиндрической оболочки (втулки) цилиндра ГОП

Между параметрами оболочки существуют следующие зависимости: $\Delta = \alpha RT_0$, где α – коэффициент линейного температурного расширения; Δ – натяг. Вводим безразмерные параметры: $\gamma_1 = \Delta/h$; $\gamma_2 = h/R$; $\gamma_3 = m/L$; $\gamma_4 = b/L$; $\gamma_5 = l/L$; $\gamma_6 = (T_1 - T_0)/T_0$. Задавая L и R , можно проводить различные исследования влияния параметров термомеханического нагружения на характеристики прочности и жесткости, в т.ч. распределения температур, контактного давления и напряжений.

Результаты расчетов. Решение одной из возможных задач анализа НДС гильзы цилиндров ГОП-900 осуществлялось при следующих значениях параметров: $R = 32,5$ мм; $p = 35$ МПа; $m = 35$ мм; $b = 30$ мм; $l = 40$ мм; $L = 72$ мм; $h = 3$ мм; $T_0 = 20$ С°; $T_1 =$

= 100С°; материал втулки – Сталь 40ХГС. Интересующие проектантов распределения компонент термоупругого состояния оболочки с учетом термомеханического контакта представлены на рис. 5-7.

Анализ полученных результатов дает основание для следующих выводов.

1. Наибольшие контактные давления наблюдаются в зоне действия высокого давления.
2. Отрыв от бандажа происходит в районе точек 4, 5 (см. рис. 4).
3. Наблюдается качественное и количественное соответствие результатов, полученных с использованием оболочечной (с предложенными в работах КЭ [1-7]) и осесимметричной (ANSYS) конечно-элементных моделей. Распределения контактных давлений, зоны отрыва и зазоры отличаются не более 5-10% (рис. 8).

Заключение. Разработан эффективный инструмент оперативного анализа и синтеза параметров гильз (втулок) на первых этапах проектирования (рис. 9) по критериям конструкционной прочности и жесткости, с помощью которого можно установить сочетание параметров, при которых отрыв гильз от блока цилиндров не наблюдается, а прочность втулок обеспечивается.

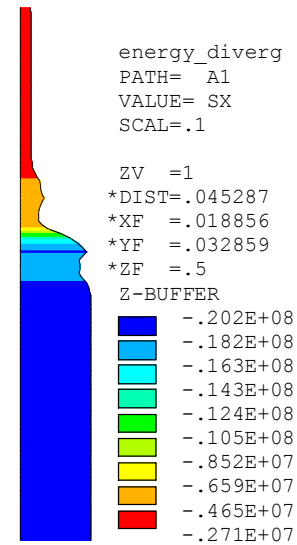


Рис. 5. Распределение контактных давлений в сопряжении втулки с ограничением

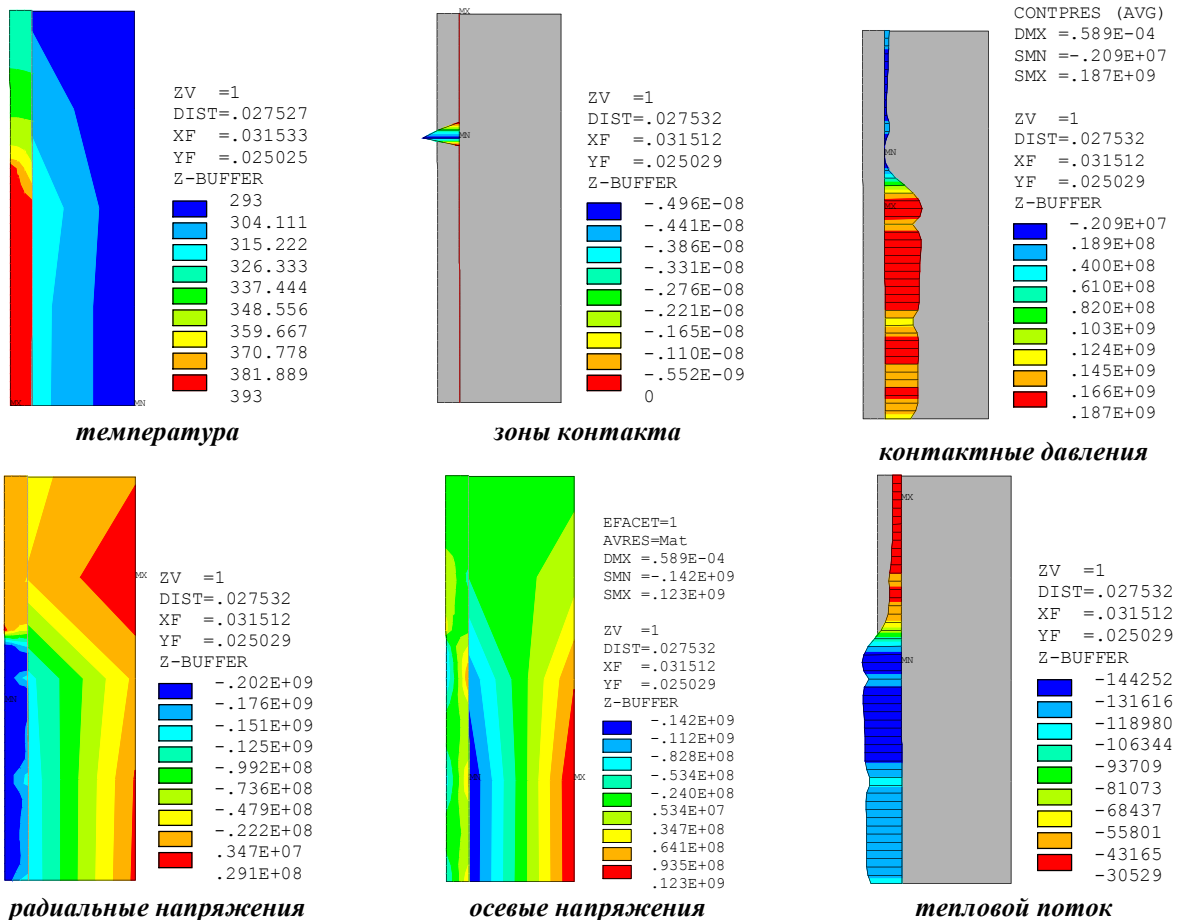


Рис. 6. Результаты моделирования термоупругого состояния втулки в контакте с цилиндром гидропередачи

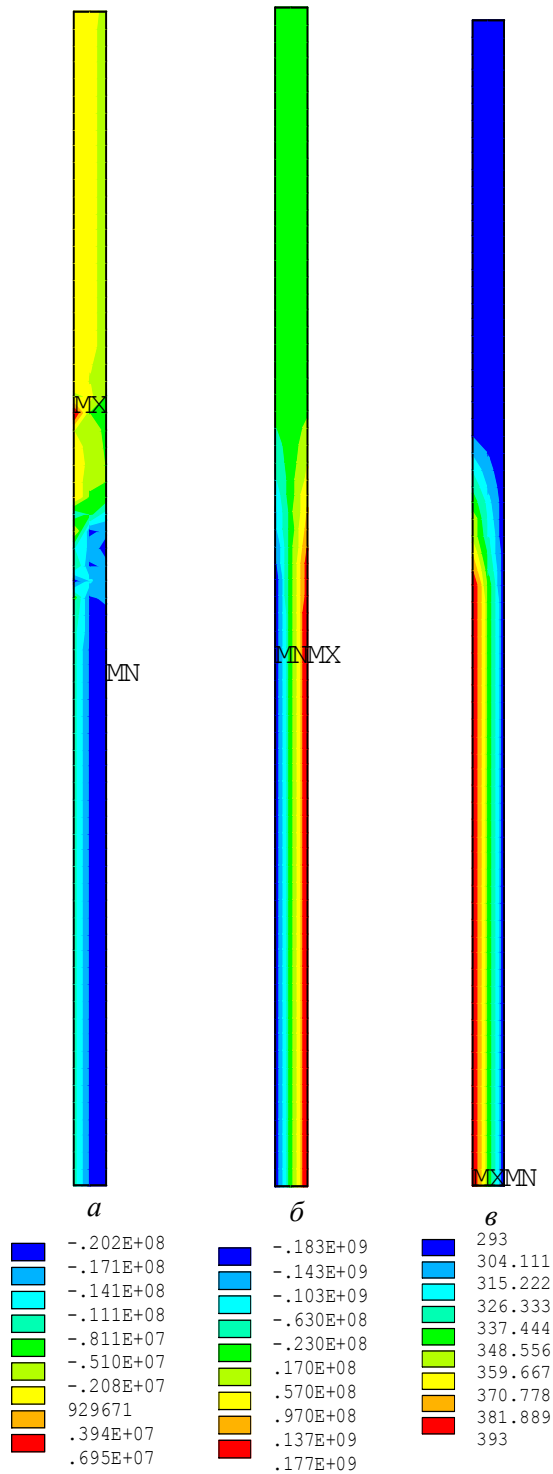


Рис. 7. Результаты моделирования термоупругого состояния цилиндрической оболочки с бандажом:
 а – радиальные напряжения;
 б – осевые напряжения;
 в – температура

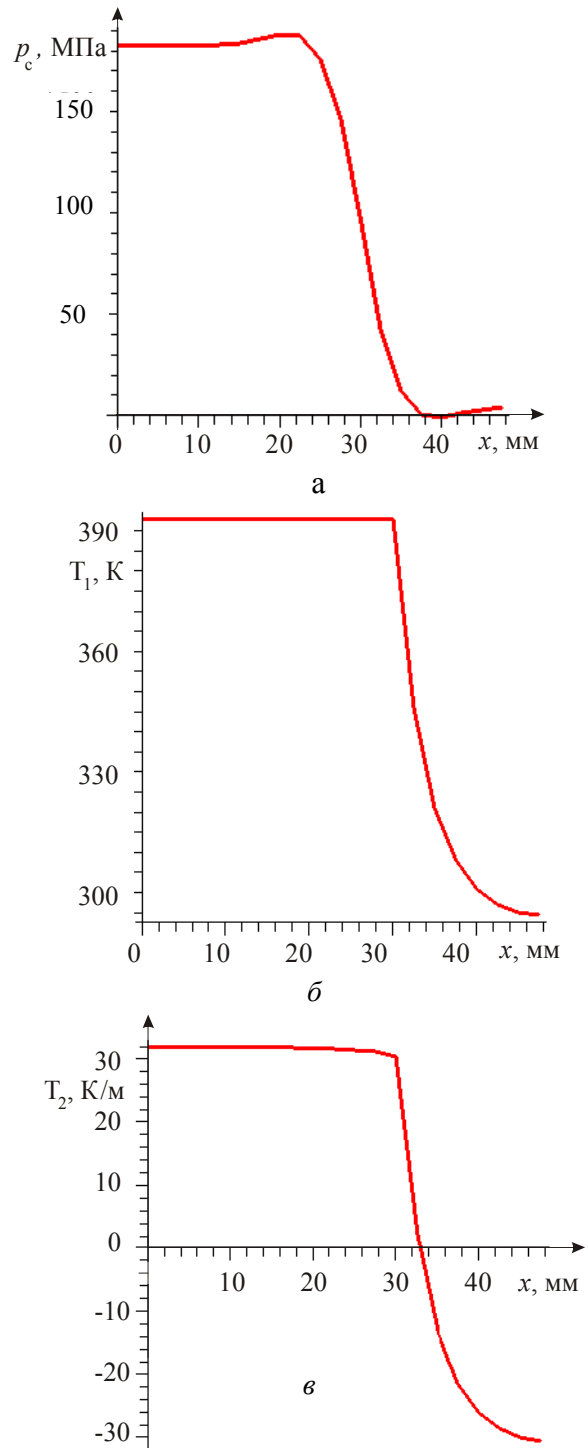


Рис. 8. Результаты моделирования термоупругого состояния цилиндрической оболочки с бандажом при помощи разработанного нового оболочечного конечного элемента:
 а – контактные давления;
 б – температура срединной поверхности;
 в – градиент температуры по толщине

Опыт решения прикладных задач о термоупругом состоянии элементов машиностроительных конструкций с термомеханическим контактом вдоль поверхностей согла-

сованной формы свидетельствует о существенном влиянии многих факторов на конструкционную прочность и жесткость исследуемых элементов. При этом установлено, что учет особенностей в распределении компонент термоупругого состояния очень важен с точки зрения физической постановки. Для физической постановки это полезно как с точки зрения оценочного предсказания, например, зон возможного пластического деформирования, так и с точки зрения учета физических факторов, регуляризирующих решение (например, жесткость поверхностного слоя). С другой стороны (для численных моделей), получаем априорное предсказывание зон требуемого сгущения конечно-элементных разбивок. Важность этих двух факторов проиллюстрирована на примере решения задач о контактном взаимодействии гильзы с телом блока цилиндров ГОП-900.

Построенный оболочечный термоконтатный упругий конечный элемент предоставляет широкие возможности оперативного решения задач многовариантного исследования термоупругого состояния тонкостенных элементов конструкций. Это особенно важно на первых этапах проектирования. В частности, данные возможности продемонстрированы на примере втулок цилиндров ГОП.

Построенные в работе модели базируются на параметрическом описании, адаптированном для их изменения и управления в ходе многовариантных исследований. Это позволяет организовывать решение задачи синтеза в процессе проектирования различных машиностроительных конструкций. С этой целью создается внешняя управляющая программная среда, оболочка или интегрируемый в CAD/CAE код. Кроме того, внедряются средства автоматизированного анализа результатов расчетов термоупругого состояния. Совокупность данных моделей, аналитических и управляющих программ представляют специализированный программно-модельный комплекс, нацеленный на решение проектных задач для того или иного типа элементов машин.

Он планируется для исследования в ходе дальнейших исследований напряженно-деформированного состояния других машиностроительных конструкций.

Литература: 1. Ткачук А.Н. О влиянии кинематических гипотез на характер контактного взаимодействия цилиндрической оболочки с бандажом / Г.И. Львов, А.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПИ”. – Харків: НТУ „ХПИ”, 2006. – № 32. – С.98-104. 2. Ткачук А.Н. Численное решение тестовых термоупругих контактных задач для элементов пресс-форм / А.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПИ”. – Харків: НТУ „ХПИ”, 2008. – № 9. – С.118-124. 3. Ткачук А.Н. Моделирование контактного взаимодействия системы тел при сложном нагружении / А.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПИ”. – Харків: НТУ „ХПИ”, 2009. – № 28. – С.128-132. 4. Ткачук А.Н. Термоупругий осесимметричный конечный элемент для решения контактных задач цилиндрических оболочек / А.Н. Ткачук // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ „ХПИ”, 2009. – № 1. – С.157-163. 5. Ткачук А.Н. Элементы разделительных штампов: методы и модели для исследования напряженно-деформированного состояния / Н.А. Ткачук, А.Я. Мовшиович, Ткачук А.Н. // КШП. ОМД. – М.: ООО „Тисо Принт”, 2009. – № 2. – С. 16-25. 6. Ткачук А.Н. Об аналитическом решении термоупругой контактной задачи о взаимодействии цилиндрической оболочки с бандажом / Г.И. Львов, А.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПИ”. – Харків: НТУ „ХПИ”, 2009. – № 30. – С.88-95. 7. Ткачук А.Н. Термоупругие контактные задачи для элементов штампов и пресс-форм / А.Н.Ткачук, И.Я.Мовшиович, Н.А.Ткачук // КШП. ОМД. – М.: ООО „Тисо Принт”, 2009. – № 12. – С. 25-32. 8. Ткачук А.Н. Термоупругие контактные задачи для элементов штампов и пресс-форм / А.Н.Ткачук, И.Я.Мовшиович, Н.А.Ткачук // КШП. ОМД. – М.: ООО „Тисо Принт”, 2009. – № 1. – С. 19-28. 9. Ткачук А.Н. К вопросу о контактном взаимодействии плоского штампа с полупрост-

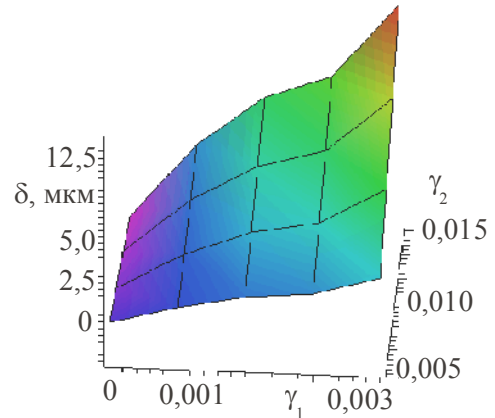


Рис. 9. Максимальный зазор между втулкой и бандажом как функция конструктивных, технологических параметров и свойств материалов

ранством / Н.Н. Ткачук, А.Н. Ткачук // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – Харьков: УДАЗТ, 2010. – Вып. 3/9 (45). – С.50-53. 10. Ткачук А.Н. Моделирование контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки / Н.А. Ткачук, Н.А. Демина, Ю.Д. Сердюк, А.Н. Ткачук [и др.] // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – № 2 (23). – С. 240-248. 11. Tkachuk A. A contact-stabilized Newmark method for coupled dynamical thermo-elastic problem / A. Tkachuk // *Proceedings of the 3d International Conference on Nonlinear Dynamics*. – 2010. – P. 497-500. 12. Александров В.М. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости / В.М. Александров, М.И. Чебаков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 304 с. 13. Аргатов И.И. Основы теории упругого дискретного контакта / И.И. Аргатов, Н.Н. Дмитриев. – С.-Петербург: Политехника, 2003. – 233 с. 14. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. – М.: Машиностроение, 1999. – 544с. 15. Александров В.М. Контактные задачи в машиностроении / В.М. Александров, Б.Л. Ромалис. – М.: Машиностроение, 1986. –174 с. 133. Горячева И.Г. Механика трения при контакте / И.Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 478 с. 16. Казаков К.Е. Плоские контактные задачи для тел с покрытиями переменной толщины / К.Е. Казаков // IX Всеросс. съезд по теоретич. и прикл. мех. Аннот. докл. Т. III. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та им. М.И. Лобачевского, 2006. – С.103. 17. Коваленко Е.В. Контактные задачи для тел с покрытиями / Е.В. Коваленко. – М.: Физматлит, 2001. – С.459-475. 18. Объемная гидropередача с шариковыми поршнями ГОП-900: характеристики и технический уровень / Г.А. Аврунин, И.В. Кабаненко, В.В. Хавиль [и др.] // *Механика та машинобудування*. – 2004. – №1. – С.14-21.

Bibliography (transliterated): 1. Tkachuk A.N. O vlijanii kinematicheskikh gipotez na harakter kontaktного vzaimodejstviya cilindricheskoj obolochki s bandazhom / G.I. L'vov, A.N. Tkachuk // *Visnik NTU „HPI”*. – Harkiv: NTU „HPI”, 2006. – № 32. – С.98-104. 2. Tkachuk A.N. Chislennoe reshenie testovyh termouprugih kontaktnyh zadach dlja jelementov press-form / A.N. Tkachuk // *Visnik NTU „HPI”*. – Harkiv: NTU „HPI”, 2008. – № 9. – S.118-124. 3. Tkachuk A.N. Modelirovanie kontaktного vzaimodejstviya sistemy tel pri slozhnom nagruženii / A.N. Tkachuk // *Visnik NTU „HPI”*. – Harkiv: NTU „HPI”, 2009. – № 28. – S.128-132. 4. Tkachuk A.N. Termouprugij osesimmetrichnyj konechnyj jelement dlja re-shenija kontaktnyh zadach cilindricheskikh obolochek / A.N. Tkachuk // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – Harkiv: NTU „HPI”, 2009. – № 1. – S.157-163. 5. Tkachuk A.N. Jelementy razdelitel'nyh shtampov: metody i modeli dlja issledovanija naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija / N.A. Tkachuk, A.Ja. Movshovich, Tkachuk A.N. // *KShP. OMD*. – М.: ООО „Tiso Print”, 2009. – № 2. – S. 16-25. 6. Tka-chuk A.N. Ob analiticheskom reshenii termouprugoj kontaktnoj zadachi o vzaimodejstvii cilindricheskoj obolochki s bandazhom / G.I. L'vov, A.N. Tkachuk // *Visnik NTU „HPI”*. – Harkiv: NTU „HPI”, 2009. – № 30. – С.88-95. 7. Tkachuk A.N. Termouprugie kontaktnye zadachi dlja jelementov shtampov i press-form / A.N. Tkachuk, I.Ja. Movshovich, N.A. Tkachuk // *KShP. OMD*. – М.: ООО „Tiso Print”, 2009. – № 12. – S. 25-32. 8. Tkachuk A.N. Termouprugie kontaktnye zadachi dlja jelementov shtampov i press-form / A.N. Tkachuk, I.Ja. Movshovich, N.A. Tkachuk // *KShP. OMD*. – М.: ООО „Tiso Print”, 2009. – № 1. – S. 19-28. 9. Tkachuk A.N. K voprosu o kontaktном vzaimodejstvii ploskogo shtampa s poluprost-ranstvom / N.N. Tkachuk, A.N. Tkachuk // *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. – Harkiv: UDAZT, 2010. – Вып. 3/9 (45). – S.50-53. 10. Tkachuk A.N. Modelirovanie kontaktного vzaimodejstviya jelementov shtampovoj osnastki / N.A. Tkachuk, N.A. Demina, Ju.D. Serdjuk, A.N. Tkachuk [i dr.] // *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov*. – Kramators'k: DDMA, 2010. – № 2 (23). – S. 240-248. 11. Tkachuk A. A contact-stabilized Newmark method for coupled dynamical thermo-elastic problem / A. Tkachuk // *Proceedings of the 3d International Conference on Nonlinear Dynamics*. – 2010. – P. 497-500. 12. Aleksandrov V.M. Analiticheskie metody v kontaktnyh zadachah teorii up-rugosti / V.M. Aleksandrov, M.I. Chebakov. – М.: FIZMATLIT, 2004. – 304 с. 13. Argatov I.I. Osno-vy teorii uprugogo diskretnogo kontakta / I.I. Argatov, N.N. Dmitriev. – S.-Peterburg: Poli-tehnika, 2003. – 233 s. 14. Morozov E.M., Zernin M.V. Kontaktnye zadachi mehaniki razrushenija. – М.: Mashinostroenie, 1999. – 544s. 15. Aleksandrov V.M. Kontaktnye zadachi v mashinostroenii / V.M. Aleksandrov, B.L. Romalis. – М.: Mashinostroenie, 1986. –174 s. 133. Gorjacheva I.G. Mehanika frikcionnogo vzaimodejstviya / I.G. Gorjacheva. – М.: Nauka, 2001. – 478 s. 16. Kazakov K.E. Ploskie kontaktnye zadachi dlja tel s pokrytijami peremennoj tolshhiny / K.E. Kazakov // IX Vseross. s#ezd po teoretich. i prikl. meh. Annot. dokl. T. III. – Nizhnij Novgorod: Izd-vo Nizhegor. gos. un-ta im. M.I. Lobachevskogo, 2006. – S.103. 17. Kovalenko E.V. Kontaktnye zadachi dlja tel s pokrytijami / E.V. Kovalenko. – М.: Fizmatlit, 2001. – S.459-475. 18. Ob#emnaja gidropereдача s sharikovymi porshnjami GOP-900: harakteristiki i tehničeskij uroven' / G.A. Avrunin, I.V. Kabanenko, V.V. Ha-vil' [i dr.] // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2004. – №1. – S.14-21.

Ткачук А.М., Ткачук Г.В.

**КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ТОНКОСТІННИХ ГІЛЬЗ З БЛОКОМ
ЦИЛІНДРІВ ГІДРООБ'ЄМНИХ ПЕРЕДАЧ**

У статті для аналізу контактної взаємодії гільз циліндрів радіальної гідрооб'ємної передачі запропоновано використати скінченно-елементні моделі із залученням нового оболонкового елемента, розробленого для більш адекватного урахування умов контактної взаємодії оболонок з іншими тілами. Зокрема, враховується обжаття стінки оболонки у напрямку нормалі, що дає змогу з використанням оболонкового елемента отримувати розподіл контактної тиску без особливостей, наприклад, сингулярностей на границях контактних зон. Результати розрахунків проілюстровано на прикладі дослідження напружено-деформованого стану втулок гільз циліндрів ГОП-900.

Ткачук А.М., Ткачук А.В.

**КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ГИЛЬЗ С БЛОКОМ
ЦИЛИНДРОВ ГИДРООБЪЕМНЫХ ПЕРЕДАЧ**

В статье для анализа контактного взаимодействия гильз цилиндров радиальной гидрообъемной передачи предложено использовать конечно-элементные модели с привлечением нового оболочечного элемента, разработанного для более адекватного учета условий контактного взаимодействия оболочек с другими телами. В частности, учитывается обжатие стенки оболочки в направлении нормали, что позволяет с использованием оболочечного элемента получать распределение контактного давления без особенностей, например, сингулярностей на границах контактных зон. Результаты расчетов проиллюстрированы на примере исследования напряженно-деформированного состояния втулок гильз цилиндров ГОП-900.

Tkachuk A.N., Tkachuk A.V.

**CONTACT INTERACTION OF THIN-WALLED CASES WITH BLOCK
OF CYLINDERS OF HYDRO VOLUMETRIC TRANSMISSIONS**

In the paper it is suggested to use finite-element models with new shell element worked out for more adequate accounting of contact interaction conditions of shells and other bodies for the analysis of contact interaction of cases of cylinders of radial hydro volumetric transmission. In particular, cogging of shell wall in direction of normal is taken into account that gives an opportunity to get distribution of contact pressure without features, for example, singularity on borders of contact zones. The results of calculations are illustrated on example of research of defected mode of cases hobs of GOP-900 cylinders.
