

Выводы

Получено, что модификация в виде круговых канавок на торцах зубчатого колеса при определенных значениях параметров $R_{\text{цк}}$, V_k и $G_{\text{ск}}$ позволяет увеличить податливость зубьев (см. рис.3) и добиться более равномерного распределения нагрузки по контактными линиям между зубьями. Однако, ухудшение напряжений на переходной кривой зуба (см. рис.2) сужает диапазон применения модификации в виде круговых канавок на торцах зубчатого колеса [5].

Список литературы: 1. Александров А.И. Артеменко Н.П. Костюк Д.И. Цилиндрические зубчатые колеса. – Харьков, Изд-во ХГУ им. Горького, 1956. – 318 с. 2. Устиненко В.Л. Напряженное состояние зубьев цилиндрических прямозубых колес. – М.: Машиностроение, 1972. – 91 с. 3. Заблонский К.И. Жесткость зубчатых передач. – Харьков, «Коммунист», 1967. – 260 с. 4. Сухоруков Ю.Н. Модификация эвольвентных цилиндрических зубчатых колес. – Киев, «Техника», 1992. – 200 с. 5. Берестнев О.В., Жук И.В., Неделькин А.Н. Зубчатые передачи с повышенной податливостью зубьев. – Минск: Наука и техника, 1993. – 184 с. 6. Розин Л.А. Основы метода конечных элементов в теории упругости: Пер. с англ. – Ленинград: Машиностроение, 1972. – 438 с. 7. Lashkari M. COSMOS/M USER GUIDE Stress, vibration, buckling, dynamics and heat transfer analyses. – S.P.A.C. 1988. – 1246 p.

Поступила в редколлегию 16.06.2005

УДК 539.3

А.В.МАРТЫНЕНКО; А.В.ТКАЧУК, канд.техн.наук;
А.А.ЗАРУБИНА; А.Ю.ВАСИЛЬЕВ, НТУ «ХПИ»

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРООБЪЕМНЫХ ПЕРЕДАЧ

Запропоновано параметричний підхід до дослідження елементів транспортних машин. Запропоновано теоретичні й експериментальні методи визначення їх напружено-деформованого стану. На основі запропонованого методу був створений алгоритм програмного комплексу. Приведено результати чисельних й експериментальних досліджень.

Parametrical approach to research of transport machines elements is offered. Theoretical and experimental methods of the HVT elements stress-strain state determination are proposed. The algorithm for software complex on its base is created. The computational and experimental results are presented, conclusions are made.

1. Постановка задачи

В настоящее время перспективным направлением в проектировании трансмиссий транспортных средств специального назначения является установка гидрообъемных передач, которые значительно увеличивают удобство управления транспортным средством. Перед внедрением передачи необходимо провести широкий спектр проектно-конструкторских работ, в число которых должны входить подробный анализ условий ее эксплуатации, математическое моделирование физико-механических процессов и определение экс-

плуатационных нагрузок на различные элементы передачи [1-3]. Например, при анализе силовых потоков в гидрообъемной передаче ГОП-900 [4] выяснилось, что одним из наиболее нагруженных и ответственных элементов является блок цилиндров. При передаче мощности на него одновременно действуют: крутящий момент, давление в рабочих цилиндрах, контактная сила от шаровых поршней, давление статической разгрузки, усилие в сопряжении со втулкой, а также объемные силы, вызванных высокими частотами вращения входного вала. В результате этого блок цилиндров находится в сложном напряженно-деформированном состоянии. Характер распределения напряжений по времени в каждой точке блока цилиндров соответствует асимметричному многоцикловому нагружению. Поскольку требуемый заказчиком ресурс ГОП-900 достаточно высок, соответствующее количество пульсаций может достигать десятков и сотен мегациклов.

Так как гидронасос гидрообъемной передачи представляет собой сложную конструкцию, состоящую из большого числа элементов, а законы нагружения, действующие на него, плохо поддаются аналитическому описанию, для определения его напряженно-деформированного состояния целесообразным является использование численных методов. Наибольшее распространение получил метод конечных элементов (МКЭ) [5], который глубоко исследован и реализован в большом количестве доступных инженерных программных комплексов. Именно поэтому он предлагается для анализа напряженно-деформированного состояния блока цилиндров гидронасоса ГОП-900.

Для определения достоверности результатов численных исследований напряженно-деформированного состояния корпуса гидронасоса ГОП-900, проведенных методом конечных элементов, необходимы экспериментальные исследования. В качестве экспериментального метода предлагается воспользоваться методом голографической интерферометрии. [6] Он дает возможность получать с высокой точностью непрерывные поля перемещений, что отвечает предъявляемым требованиям.

2. Методика проведения исследований

Для организации расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем [7] необходимо решить следующие задачи:

- создать программную оболочку, которая позволяет с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР) Pro/ENGINEER и Ansys проводить параметрическое моделирование геометрии, нагрузки, свойств материалов и конечно-элементной разбивки;
- разработать параметрические геометрические и конечно-элементные модели наиболее ответственных элементов гидрообъемной передачи;
- разработать методику экспериментального исследования деформации исследуемых элементов гидрообъемной передачи и оценки точности проведенных экспериментальных исследований.

Все эти этапы были проделаны в ходе выполнения работы.

3. Система параметрического моделирования

Современная технология автоматического проектирования машиностроительных конструкций имеет следующие особенности:

- сжатые сроки проектирования;
- интеграция конструкторских, технологических и исследовательских этапов работ;
- гибкость и возможность оперативного изменения проектов.

В связи с этим этапы исследования прочности и жесткости элементов машиностроительных конструкций неразрывно увязаны как в современных САПР, так и в практике проектирования со всем комплексом проектных работ. Для дальнейшего ускорения данных процессов необходимо максимально упростить интерфейс имеющихся комплексов. Особенно при учете реалий нашего производства, когда большинство конструкторов слабо знакомы с каким-либо из программных продуктов САПР. И наиболее приемлемым выходом из сложившейся ситуации является написание специализированной программной оболочки.

Специальное программное обеспечение создается на основе комплексной автоматизированной системы конструкторско-технологической подготовки производства, базирующейся на связке программных продуктов Pro/Engineer – Ansys. Оно упрощает взаимодействие между системами и берет на себя большую часть «рутинных» операций по изменению требуемых параметров, на которые уходит много времени. Выбор основан на том, что данные программные продукты являются признанными лидерами в своих областях. В результате многолетнего сотрудничества между их производителями была достигнута простота и удобство обмена данными, что облегчает процесс исследований. Также обеспечивается поддержка параметризации моделей с проведением множественных расчетов.

Данная программа используется на этапе проектирования, поэтому технология создания конечно-элементной модели должна обладать гибкостью и оперативностью, что позволяет перестраивать модели в соответствии с новыми значениями конструктивных параметров. При этом дополнительные трудности вызывает то, что итоговая конечно-элементная модель должна удовлетворять следующим требованиям:

- неравномерное расположение узлов конечно-элементной сетки;
- зоны сгущения должны быть расположены в областях резких изменений геометрической формы конструкции;
- необходимо использовать конечные элементы с аппроксимирующими полиномами более высоких степеней, если это возможно;
- необходимо легко варьировать как геометрию, так и действующие на конструкцию нагрузки.

Общий алгоритм работы данной программы и схема взаимодействия систем представлена на рис. 1.



Рисунок 1 – Алгоритм параметрического расчета

4. Параметрические модели фрагментов блока цилиндров

Для отработки методики и проверки работоспособности связи комплексов была построена упрощенная модель блока цилиндров с учетом симметрии и особенностей напряженно-деформированного состояния конструкции. Параметрическая твердотельная модель и созданная на ее основе конечно-элементная модель (КЭ) приведены на рис. 2.

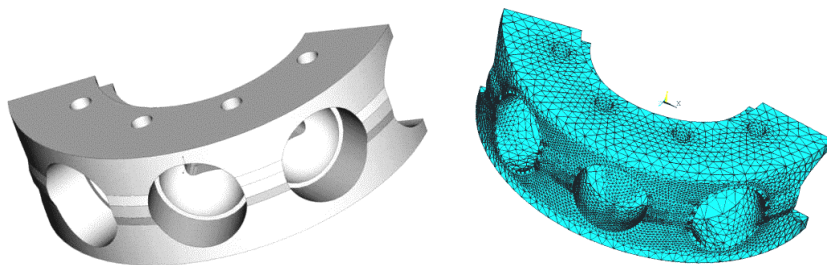


Рисунок 2 – Фрагмент блока цилиндров. Твердотельная и конечно-элементная модели

5. Результаты численного анализа НДС фрагментов блока цилиндров

Наглядное представление НДС в виде графиков в двумерном пространстве или сложных поверхностей в пространствах большей размерности позволяет наиболее точно оценить влияние каждого параметра. Поэтому полученные результаты целесообразно представлять в виде таблиц, рисунков и графиков.

В ходе выполнения тестовых расчетов на основе построенных моделей определялось влияние на напряженно-деформированное состояние фрагмента блока цилиндров следующих параметров, которые варьировались в указанных пределах:

- величина натяга втулки, при ее посадке в корпус насоса (Δ , мкм): от

50 до 200 микрон;

- модуль упругости материала втулки: от $0,1 \cdot 10^{11}$ до $10 \cdot 10^{11}$ Па;
- угловая скорость вращения корпуса насоса (ω , с^{-1}): от 25 до 100 с^{-1} .

Дополнительно втулка нагружалась давлением на внутреннюю поверхность величиной $3,5 \cdot 10^7$ Па.

Всего было проведено 3 серии расчетов с варьированием различных параметров. Общая картина перемещений, характерная для всех расчетов без числовых значений приведена на рис. 3 (суммарные перемещения точек модели) и рис. 4 (эквивалентные напряжения по Мизесу).

Более подробный анализ результатов численных исследований приведен в работе [8].

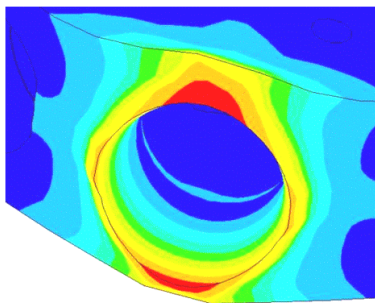


Рисунок 3 – Суммарные перемещения

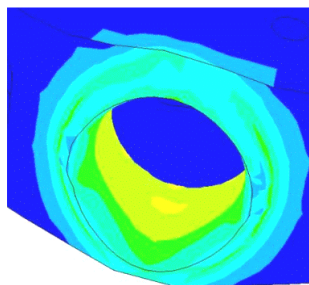


Рисунок 4 – Эквивалентные напряжения по Мизесу

6. Экспериментальная оценка достоверности расчетных моделей

Для экспериментальной оценки достоверности результатов численных исследований напряженно-деформированного состояния корпуса гидронасоса были проведены исследования фрагмента блока цилиндров методом голографической интерферометрии [5]. Данные методы обладают высокой чувствительностью, хорошей разрешающей способностью, большим объемом информации на одном материальном носителе, наглядностью и другими, менее значительными преимуществами. Одной из основных причин, тормозящих процесс широкого внедрения этих методов в производство, является сложность, трудоемкость, в ряде случаев неоднозначность количественной интерпретации интерференционных картин, получаемых при измерениях. Поэтому в последнее время все более широкое применение для измерения полей перемещений и деформаций диффузно отражающих объектов находит спекл-интерферометрия, у которой отсутствуют многие из указанных выше недостатков.

Экспериментальные работы проводились на голографической установке СИН, укомплектованной гелий-неоновым лазером ЛГН–215 (рис. 5, 6). Модель циклического фрагмента блока цилиндров изготовлена из плексигласа (модуль упругости $E = 0,069$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,23$) в реальном масштабе

без воспроизведения отдельных мелких деталей по твердотельной модели, выполненной в САПР SolidWorks (соответственно рис. 7 и рис. 8.) Давление рабочего тела моделировалось при помощи гидронасоса (см рис. 6) и подбиралось из условия четкости и наглядности картин интерференционных полос. Сам объект жестко закреплялся на столе СИИ-1 при помощи специальных призм. Контролировались перемещения точек боковой поверхности, противоположащей отверстию для подачи масла, в котором находится форсунка (см. рис. 8).

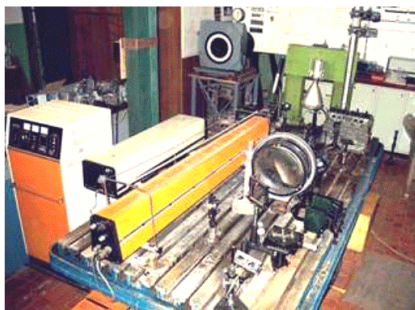


Рисунок 5 – Голографическая установка СИИ-1

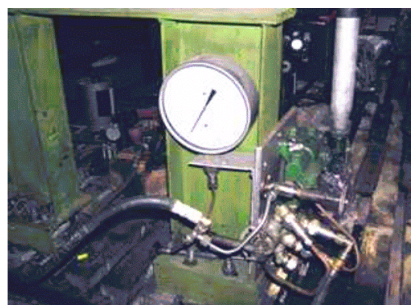


Рисунок 6 – Гидронасос для моделирования давления рабочего тела

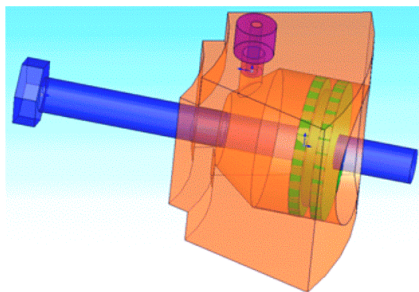


Рисунок 7 – Твердотельная модель исследуемого объекта



Рисунок 8 – Изготовленная модель

Получаемые интерферограммы, приведенные на рис. 9, дают возможность построить распределения относительных перемещений. Ниже находятся результаты численных исследований (рис. 10). На приведенных рисунках хорошо видно качественное совпадение распределений перемещений и удовлетворительное их количественное соответствие. Анализ результатов, полученных в серии численных исследований, позволяет сделать вывод о высокой (7-10 %) точности конечно-элементного моделирования. Численные значения перемещений и напряжений для натурального объекта из какого-либо сплава получаются путем умножения на коэффициент, полученный из численного расчета фрагмента блока цилиндров, изгото-

товленного из данного материала [8].

Парадоксальные особенности деформирования исследуемой поверхности, обнаруженные в ходе экспериментов (прогиб в сторону, противоположную внутреннему давлению рабочего тела в зоне), совпадают с полученными численно. Они обусловлены характером приложенных к исследуемому образцу граничных условий.

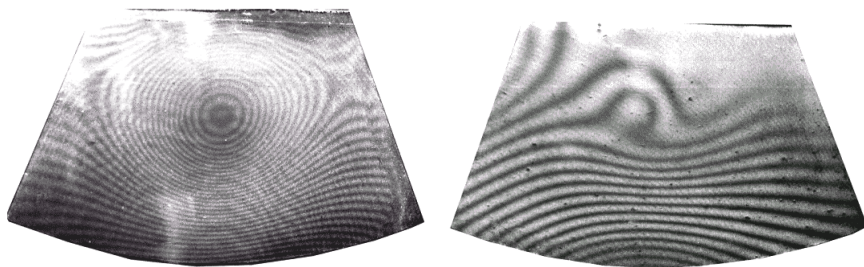


Рисунок 9 – Интерферограммы боковой поверхности, полученные в ходе выполнения эксперимента

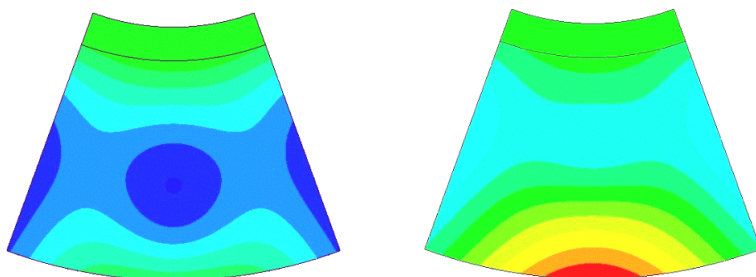


Рисунок 10 – Относительные перемещения модели фрагмента КГН ГОП-900, полученные по результатам численных исследований

7. Заключение

По полученным результатам исследования блока цилиндров ГОП-900 можно сделать следующие выводы:

1. Реализованная технология расчетно-экспериментальных исследований дает широкие возможности параметрического анализа и синтеза различных машиностроительных конструкций, а также построения их достоверных расчетных моделей по результатам экспериментов.
2. Исследования подтверждает высокую точность используемых в процессе выполнения численных исследований конечно-элементных моделей.
3. Напряженно-деформированное состояние блока цилиндров гидронасоса ГОП-900 при принятых граничных условиях можно исследовать

отдельно для каждого цилиндра с погрешностью, не превышающей 10%, в широком диапазоне эксплуатационных нагрузок.

4. При обеспечении адекватных граничных условий моделирование напряженно-деформированного состояния блока цилиндров можно проводить на модели одного цилиндра.

Таким разом описанное в данной статье исследование, включающее расчетный и экспериментальный этапы, позволяет оценить точность конечно-элементного моделирования всего множества различных элементов гидромашин. Данный метод может применяться для моделирования широкого диапазона пневмомеханических, гидромеханических и электромеханических систем.

В дальнейшем планируется разработать САПР элементов гидрообъемных передач с более широкими функциональными возможностями.

Список литературы: 1. *Самородов В.Б.* Математическое моделирование быстроходных объемных радиально-поршневых гидромашин – элементов гидрообъемно-механических трансмиссий // *Механика та машинобудування.* – 1999. – № 1. – С. 181-187. 2. *Самородов В.Б.* Общая постановка параметрического синтеза гидрообъемно-механических трансмиссий // *Механика та машинобудування.* – 2000. – № 1,2. – С. 144-151. 3. *Самородов В.Б., Рогов А.В.* Результаты параметрического синтеза гидрообъемно-механических трансмиссий гусеничных машин // *Механика та машинобудування.* – 2000. – № 1,2. – С. 151-159. 4. *Аврунин Г.А., Кабаненко И.В., Хавиль В.В.* и др. Объемная гидropередача с шариковыми поршнями ГОП-900: характеристики и технический уровень // *Механика та машинобудування.* – 2004. – № 1. – С. 14-22. 5. *Сабонадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л.* Метод конечных элементов и САПР. – М.: «Мир», 1989. 6. *Капустин А.А.* Теория спекл-голографических измерений напряженно-деформированного состояния элементов натуральных конструкций // *Материалы XI Всесоюзной школы по голографии, ЛИЯФ, Ленинград.* – 1979. – С. 137-159. 7. *Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем // *Динамика и прочность машин.* – 2002. – № 10. – С. 126-132. 8. *Ткачук А.В., Васильев А.Ю., Мартыненко А.В., Веретельник Ю.В.* Влияние конструктивных факторов на напряженно-деформированное состояние корпусов гидрообъемных передач // *Механика та машинобудування.* – 2004. – № 1. – С. 78-85.

Поступило в редколлегию 25.04.2005