

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УДК 539.3

А. А. АТРОШЕНКО, асп. НТУ «ХПИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПЛАСТИН, СОЕДИНЕННЫХ БОЛТОВЫМ КРЕПЕЖОМ

Данная работа посвящается экспериментальному исследованию системы пластин, соединенных между собой болтовым крепежом. Особенностью данного эксперимента является учет предварительной затяжки болтового соединения и учет зазора между болтом и внутренней поверхностью отверстия, а также определение теоретической и экспериментальной зависимости сдвигающей силы от поперечного усилия и характера поведения сдвигов пластин относительно друг друга. Представленное исследование состоит из двух этапов. Первым этапом является сборка экспериментальной установки и подготовка системы пластин. Вторым этапом является проведение поэтапного нагружения системы пластин различными массами грузов и фиксация полученных результатов в виде поперечных перемещений. Экспериментальное исследование дает основу для установления более точного соответствия между изучаемыми параметрами и свойствами исследуемого объекта.

Ключевые слова: эксперимент, силос, система пластин, болтовой крепеж, сила затяжки, зазор, машиностроительная конструкция, коэффициент трения, нагрузка, сдвиг, контактирующая поверхность, деформация.

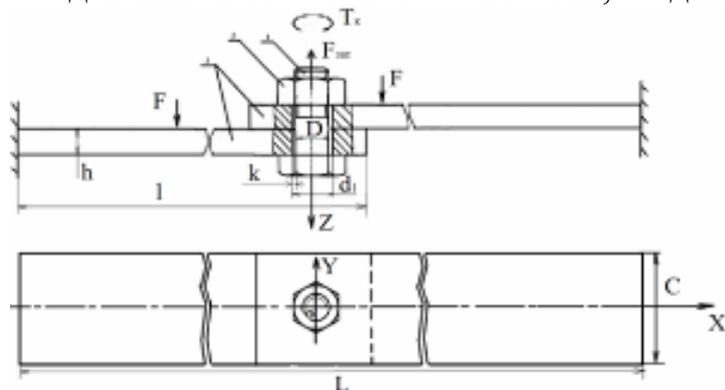
Введение. При исследовании машиностроительных конструкций могут использоваться аналитические модели, эмпирические зависимости, численные и другие методы. Каждое из этих направлений имеет свои достоинства и недостатки [1-12]. В настоящее время наиболее эффективными являются численные методы [1,2,7-12]. В общем случае, численные методы в виде твердотельного моделирования элементов механических систем с конечным числом степеней свободы и методом конечных элементов, позволяют описывать и объяснять взаимосвязи элементов изучаемой системы или объекта в относительно широких диапазонах изменения переменных величин. Однако при построении твердотельных моделей, задании граничных условий, нагрузок неизбежно введение каких-либо ограничений, допущений и т.п. Поэтому возникает задача оценки достоверности полученных результатов реальному процессу или объекту. Для этого проводится экспериментальная проверка разработанных численных моделей и полученных результатов [3-6]. Экспериментальное исследование дает основу для установления более точного соответствия между изучаемыми параметрами и свойствами исследуемого объекта.

Анализ основных достижений и литературы. На базе проведенных численных исследований представленных ранее в статьях [1, 2], **цель** которых заключалась в разработке усовершенствованной расчетной модели для анализа геометрически нелинейных контактных задач для системы двух пластин,

соединенных болтовым крепежом с зазором и нагруженных равномерно распределенным по верхней кромке поперечным усилием, предлагается провести экспериментальное исследование для подтверждения достоверности полученных результатов.

В данной статье описываются экспериментальные исследования, цель которых заключалась в исследовании системы пластин, соединенных болтовым крепежом с зазором и нагруженных по верхней кромке поперечным усилием, а также определение теоретической и экспериментальной зависимости сдвигающей силы от поперечного усилия и характера поведения сдвигов пластин относительно друг друга при определенной затяжке болтового крепежа.

Методика экспериментального исследования. В качестве объекта исследования является система пластин, соединенных между собой болтовым



крепежом. Схема исследуемой системы представлена на рис. 1. Геометрические параметры данной системы: длина одной пластины $l = 500$ мм, ширина $c = 50$ мм, толщина $h = 1,5$ мм, общая длина соединенных пластин $L = 960$ мм. Диаметр отверстия $d1 = 12$ мм, диаметр болта $D = 10$ мм, зазор между

Рис. 1 – Система пластин с болтовым соединением

болтом и внутренней поверхностью отверстия пластин $k = 1$ мм. Пластины изготовлены из материала Сталь 3. Болтовое соединение представляет собой следующую компоновку: болт 1 вставлен в отверстие пластин 3 с зазором и затянут гайкой 2 до момента затяжки T_k .

Прикладываемая внешняя нагрузка уравнивается силой трения в месте соединения пластин, которая возникает при затяжке болтового крепежа ($F_{зам}$ сила затяжки.) При действующей внешней нагрузке, которая будет превышать силу трения в стыке двух пластин будет наблюдаться сдвиг относительно контактирующих поверхностей пластин.

Задачи, возникшие в процессе экспериментальных исследований, в данном случае дадут ответы на следующие вопросы:

- определение характера выборки зазора между болтом и внутренней поверхностью отверстия в пластинах.
- характер поведения скольжения между пластинами при определенной затяжке болтового крепежа и поэтапном нагружении.
- определение максимальных вертикальных перемещений системы пластин, зависящих от силы нагружения.

Рассмотрим более детально расчетные зависимости болтового соединения [3-5]. При затягивании болтового крепежа в стержне болта возникают напряжения растяжения от силы $F_{зам}$ и силы кручения от момента затяжки T_k (рис. 1). Чтобы не произошло разрушение болта, сила затяжки не

должна превысить допустимую. Для данного случая нагружения допустимая сила затяжки :

$$[F_{зам}] \leq \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{[\sigma_p]}{1,3}, \quad (1)$$

где d_1 – внутренний диаметр резьбы;
 $[\sigma_p]$ – допускаемое напряжение растяжения:

$$[\sigma_p] = \frac{\sigma_T}{s}, \quad (2)$$

где σ_T – предел текучести материала;
 s – коэффициент безопасности.

При завинчивании гайки необходимо преодолеть моменты сил трения в резьбе T_p и на торце гайки T_T , тогда момент завинчивания равен:

$$T_k = T_p + T_T = F_{зам} \cdot 0,5d_2 \cdot \operatorname{tg}(\beta + \rho) + F_{зам} \cdot f \cdot \frac{D_3 + d_{омв}}{4}, \quad (3)$$

где d_2 – средний диаметр резьбы;
 β – угол подъема резьбы;
 ρ – приведенный угол трения;
 f – коэффициент трения на торце гайки;
 D_3 – наружный диаметр опорной поверхности гайки (равен размеру под ключ);

$d_{омв}$ – внутренний диаметр опорной поверхности гайки (равен отверстию под болт).

Угол трения: $\rho = \operatorname{arctg} f_p$, где f_p – коэффициент трения в резьбе. Приведенный угол трения $\rho = \frac{p}{\cos(a/2)}$, где a – угол профиля метрической резьбы; ($a = 60^\circ$; $\cos(a/2) = 0,87$).

Внешняя сила, при которой начинается сдвиг деталей F равна силам трения F_{Tp} , возникающим на поверхностях стыков деталей: $F = F_{mp} \cdot i$, где i – число стыков.

Сила трения покоя определяется по закону Кулона:

$$F_{Tp} = F_{зам} f_0, \quad (4)$$

где f_0 – коэффициент трения в стыке деталей.

Подставляя значение F_{Tp} , получим зависимость силы сдвига от силы затяжки болта:

$$F = F_{зам} \cdot f_0 \cdot i \quad (5)$$

Определив для данной силы затяжки момент завинчивания и силу сдвига, можно построить теоретическую зависимость силы сдвига от момента завинчивания [3,6]. Установка для проведения экспериментальных исследований состоит из следующих приспособлений (рис. 2-3): станина с отдельными узлами для закрепления пластин по краям (рис.2, поз.1); две пластины с отверстиями

диаметром 12 мм (рис.3, поз.4); болтовой крепеж (болт, гайка, шайба) диаметром 10 мм (рис.3, поз.3); динамометрический ключ ГОСТ 25603-83 (рис. 3, поз. 2); штангенциркуль ГОСТ 8.113-85, использовался в качестве измерительного оборудования (рис. 3, поз. 1); набор грузов по 2,5 кг (рис. 3, поз. 5); фотоаппарат, использовался для фиксации данных.

Материалы исследования. Описание проведения эксперимента. Данное исследование состоит из двух этапов: первым этапом является сборка экспериментальной установки и подготовка системы пластин. Второй этап включает в себя проведение поэтапного нагружения системы пластин различными массами грузов и фиксация полученных результатов в виде вертикальных перемещений.

Для соединения пластин между собой с концентрическим расположением отверстий были просверлены дополнительно центрирующие отверстия малого диаметра по четырем углам в месте соединения пластин. По этим отверстиям пластины фиксировались, и затем просверливалось центральное отверстие диаметром 12 мм. Для обеспечения концентрического расположения болтового крепежа в отверстиях пластин применялся пластилин, которым заполнялся зазор между болтом и внутренней поверхностью отверстия (рис. 4).

Затем с помощью динамометрического ключа, болтовой крепеж затягивался с определенным моментом затяжки, который соответствует 10 Н/м. Данный момент завинчивания обеспечивает силу затяжки, равную 6600 Н. Освободив пластины от направляющих болтов, фиксируем собранную систему пластин в станине. Пластины по краям были зафиксированы болтовыми крепежами. Устанавливаем штангенциркуль для замера вертикальных перемещений.

После сборки экспериментальной установки (рис. 5) можем непосредственно перейти к проведению эксперимента и начать поэтапное нагружение системы пластин.



Рис. 2 – Станина для фиксации пластин



Рис. 3 – Оборудование для проведения эксперимента



Рис. 4 – Центровка болта



Рис. 5 – Установка для проведения эксперимента

Перед тем как нагрузить пластины, фиксируем показания замеряющего устройства в начальном положении, а затем поэтапно нагружаем систему пластин вдоль верхней кромки грузилами и фиксируем перемещения (рис. 6). Нагружение системы пластин осуществлялось в диапазоне от 0 до 650 Н.

В процессе нагружения системы пластин наблюдалось ступенчатое вертикальное перемещение пластин, которое сопровождалось неплавной выборкой зазора между болтом и внутренней поверхностью отверстия.

После полного этапа нагружения системы пластин и полной выборке зазора пластины освобождаем от фиксации и раскручиваем болтовой крепеж. На рис. 7 показан разобранный болтовой крепеж и наглядно виден сдвиг пластин относительно друг друга с выборкой зазора между внутренней поверхностью отверстия и болтом.



Рис. 6 – Нагружение системы пластин грузилами



Рис. 7 – Разобранный болтовой крепеж с выбранным зазором

Результаты экспериментальных исследований. Характеристики вертикальных перемещений системы пластин, полученных в ходе проведения экспериментальных исследований, представлены на графике (рис. 8).

По оси X обозначена сила нагружения в Н, по оси Y максимальные вертикальные перемещения в мм.

В ходе эксперимента было проведено пять повторных исследований для получения набора результатов и уменьшения погрешности. Вертикальные перемещения составляют около 28 мм. Во время нагружения системы пластин проявляется нелинейный сдвиг с трением между поверхностями контактирующих пластин. Определены большие продольные и поперечные перемещения при выборке зазора в болтовом крепеже.

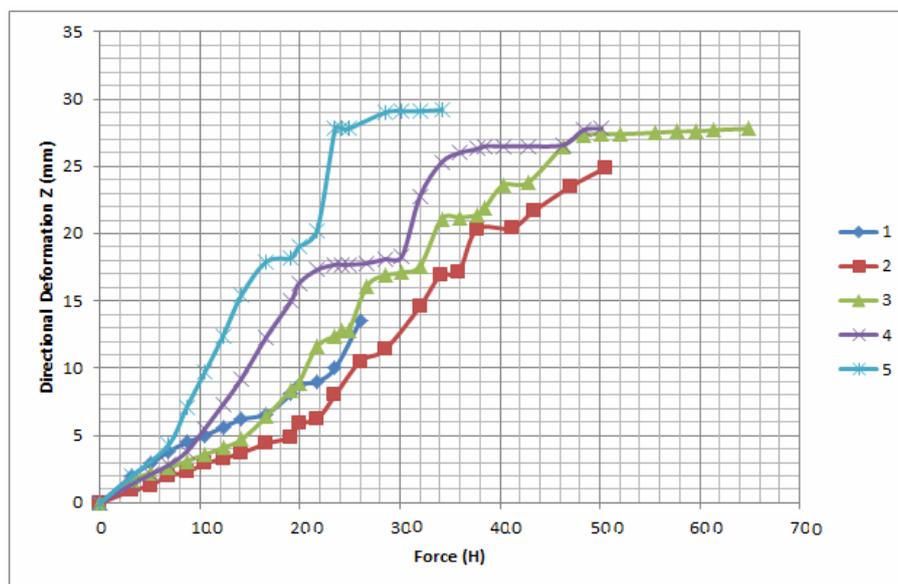


Рис. 8 – Зависимость стрелы прогиба системы пластин от действующей силы

Из графика видно ступенчатое поведение смещения пластин друг относительно друга. В начальном этапе нагружения смещение не происходит, при увеличении нагрузки возникает скачкообразное смещение пластин относительно друг друга, сопровождающееся ступенчатой выборкой зазора. При дальнейшем увеличении нагрузки (после выборки зазора) наблюдается незначительное смещение в результате деформирования пластин.

Выводы. Основываясь на полученных экспериментальных результатах, можно сделать вывод, что во время нагружения системы пластин наблюдается нелинейная ступенчатая выборка зазора, сопровождающаяся сдвигом между контактирующими поверхностями пластин. Определены большие поперечные и продольные перемещения при выборке зазора в болтовом крепеже.

Полученные экспериментальные результаты качественно совпадают с результатами, полученными при решении задачи в численной постановке [2, 12].

В дальнейшем планируется проведение экспериментальных исследований с плавным нагружением системы пластин с применением более точного оборудования для фиксирования поперечных перемещений, фиксирования продольных перемещений. Будет также предусмотрено применение в болтовом соединении полиуретановой шайбы, введенной с учетом обеспечения герметизации зазора.

Список литературы: 1. *Атрошенко О. О.* Обгрунтування розрахункових моделей елементів силосу / *В. Б. Третьяков, И. И. Иванов, О. В. Веретельник, О. О. Атрошенко* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Машинознавство та САПР. – 2013. – № 1. – С. 139-154. 2. *О. О. Атрошенко.* Численное исследование контактных задач для системы пластин, соединенных болтовым крепежом. в геометрической нелинейной постановке / *О. О. Атрошенко* // Вісник НТУ «ХПІ». Тем.вип. : Машинознавство та САПР. – 2013. №1 (975). – с. 3-14. 3. *Анурьев В. И.* Справочник конструктора-машиностроителя : в 3-х т. / *В. И. Анурьев* – М. : Машиностроение, 2006. – 928 с. 4. *Ращепкин С. В.* Экспериментальные исследования металлических силосов на моделях / *С. В. Ращепкин, А. А. Землянский* // Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов : Материалы ГУ Международной научно-практической конференции. Пенза, 2002. 5. *Сазанбаев С. К.* Экспериментальные исследования металлических навивных силосов / *С. К. Сазанбаев, С. В. Салиев* // Проблемы повышения эффективности капитального строительства : Сб. науч. тр., т. I. Алма-Ата, 1983. - С. 34. 6. *Алексеев С. А.* Экспериментальное исследование нагрузок на сферические оболочки, создаваемых воздушным потоком / *С. А. Алексеев* // Расчет пространственных конструкций, вып XIII. М., 1970. - 39-42 с. 7. *Архипов В. Н.* К моделированию пологих ортотропных гибких пластин и оболочек / *В. Н. Архипов, Ю. С. Гордеев* // Сб. Расчет пространственных систем в строительной механике. Саратов : СГУ, 1972. - 25-29 с. 8. *Болтянский Е. З.* Эксплуатационная надежность элеваторов / *Е. З. Болтянский., Б. Н. Иванов* // М. : Колос, 1976. 9. *Галетов А. П.* Исследования взаимодействия зернового массива со стенками силосов из гибкого эластичного материала / *А. П. Галетов* // Диссертация на соискателя уч. степени к.т.н. Саратов : СПИ, 1972. - 345 с. 10. *Галетов А. П.* К деформациям сыпучих материалов / *А. П. Галетов* // Исследования напряженного состояния силосных сооружений. Вып.2., Саратов : СПИ, 1969. 11. *Бернштейн М. С.* Форма истечения и давления зерна в силосах / *М. С. Бернштейн* // Исследовательские работы по инженерным конструкциям. М., 1949.-С. 139-168. 12. *Короткий О. А.* Технология построения САПР илндрического силоса / *О. А. Короткий* // Математическое моделирование сложных технических систем : Сб. статей / Труды МГТУ №595. М., 2007. – С.3-10.

Bibliography (transliterated): 1. *Atroshenko O. O.* Obgruntuvannja rozrahunkovih modelej elementiv silosu / *V. B. Tretjakov, I. I. Ivancov, O. V. Veretelnik, O. O. Atroshenko* // Visnik NTU «HPI». Serija : Mashinoznavstvo ta SAPR. – 2013. – № 1. – S. 139-154. 2. *O. O. Atroshenko.* Chislennoe issledovanie kontaktnyh zadach dlja sistemy plastin, soedinennyh boltovym krepzhom. v geometricheski nelinejnoj postanovke / *O. O. Atroshenko* // Visnik NTU «HPI». Tem.vip. : Mashinoznavstvo ta SAPR. – 2013. №1 (975). – s. 3-14. 3. *Anurev V. I.* Spravochnik konstruktora-mashinostroitelja : v 3-h t. / *V. I. Anurev* – M. : Mashinostroenie, 2006. – 928 s. 4. *Rashhepkin S. V.* Jeksperimentalnye issledovanija metallicheskih silosov na modeljah / *S. V. Rashhepkin, A. A. Zemljanskij* // Problemy stroitelstva, inzhenernogo obespechenija i jekologii gorodov : Materialy GU Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Penza, 2002. 5. *Sazanbaev S. K.* Jeksperimentalnye issledovanija metallicheskih navivnyh silosov / *S. K. Sazanbaev, S. V. Saliev* // Problemy povyshenija jeffektivnosti kapitalnogo stroitelstva : Sb. nauch. tr., t. I. Alma-Ata, 1983. - S. 34. 6. *Alekseev S. A.* Jeksperimentalnoe issledovanie nagruzok na sfericheskie obolochki, sozdavaemyh vozdušnym potokom / *S. A. Alekseev* // Raschet prostranstvennyh konstrukcij, vyp XIII. M., 1970. - 39-42 s. 7. *Arhipov V. N.* K modelirovaniju pologih ortotropnyh gibkih plastin i obolochek / *V. N. Arhipov, Ju. S. Gordeev* // Sb. Raschet prostranstvennyh sistem v stroitelnoj mehanike. Saratov : SGU, 1972. - 25-29 s. 8. *Boltjanskij E. Z.* Jekspluacionnaja nadezhnost jelevatorov / *E. Z. Boltjanskij., B. N. Ivanov* // M. : Kolos, 1976. 9. *Galetov A. P.* Issledovanija vzaimodejstviya zernovogo massiva so stenkami silosov iz gibkogo jelastichnogo materiala / *A. P. Galetov* // Dissertacija na soiskatelja uch. stepeni k.t.n. Saratov : SPI, 1972. - 345 s. 10. *Galetov A. P.* K deformacijam sypuchih materialov / *A. P. Galetov* // Issledovanija naprijazhennogo sostojanija silosnyh sooruzhenij. Vyp.2., Saratov : SPI, 1969. 11. *Bernshtejn M. S.* Forma istechenija i davljenija zerna v silosah / *M. S. Bernshtejn* // Issledovatel'skie raboty po inzhenernym konstrukcijam. M., 1949.-S. 139-168. 12. *Korotkij O. A.* Tehnologija postroenija SAPR ilindricheskogo silosa / *O. A. Korotkij* // Matematicheskoe modelirovanie slozhnyh tehničeskich sistem : Sb. statej / Trudy MGTU №595. M., 2007. – S.3-10.

Надійшла (received) 01.04.2014