

# 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.

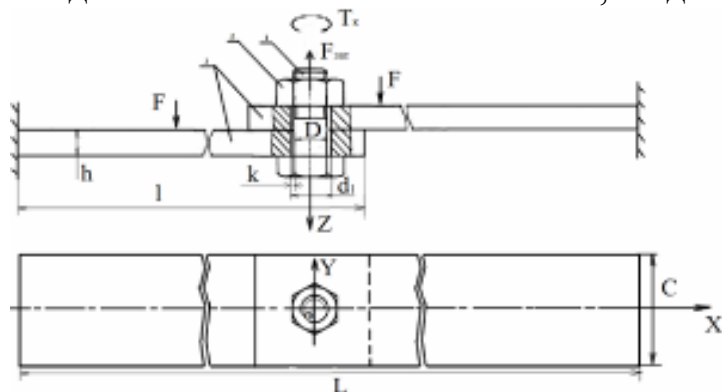
**Введение.** При исследовании машиностроительных конструкций могут использоваться аналитические модели, эмпирические зависимости, численные и другие методы. Каждое из этих направлений имеет свои достоинства и недостатки [1-12]. В настоящее время наиболее эффективными являются численные методы [1,2,7-12]. 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  $\sigma_T$  – 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;  
 $\beta$  – угол подъема резьбы;  
 $\rho$  – 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.

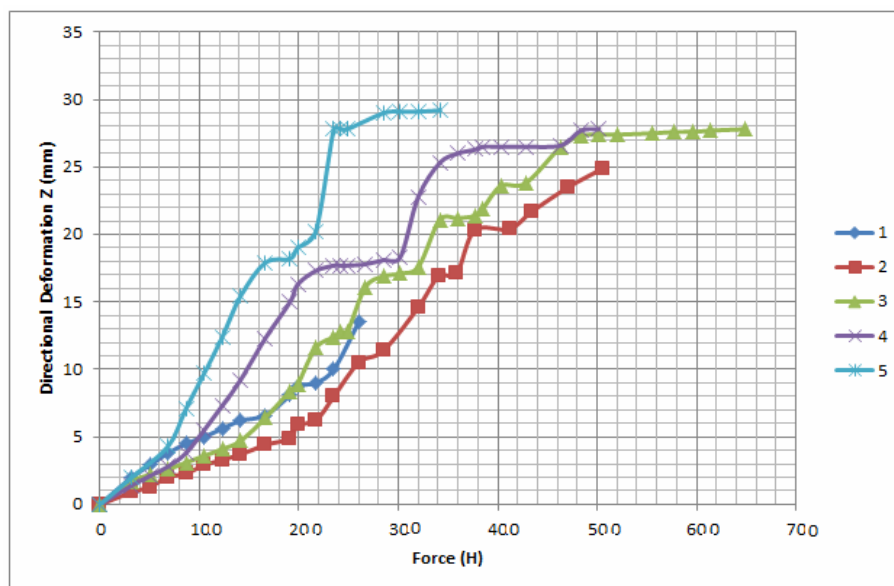


Рис. 8 – Зависимость стрелы прогиба системы пластин от действующей силы

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.* Jekspluatacionnaja 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*