

МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 539.3

Атрошенко А.А., аспирант НТК "ХП"

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ НА ПРИМЕРЕ ПОЛОС, СОЕДИНЕННЫХ БОЛТОВЫМ КРЕПЕЖОМ

Введение. В процессе проектирования машиностроительных конструкций возникают задачи обеспечения достоверности расчетных методик, применяемых для исследования нелинейных процессов с привлечением методов твердотельного параметрического моделирования систем с конечным числом степеней свободы и метода конечных элементов. Для применения тех или иных расчетных схем необходимо учитывать верифицированные значения параметров численных моделей, в т.ч. жесткостные характеристики, граничные условия, краевые условия и нагрузки. От точности этих данных зависит погрешность полученных численных результатов. В последующем при использовании данных моделей в специализированных системах автоматизированного анализа и синтеза элементов сложных механических систем обеспечивается и точность исследований, и заданные прочностные, ресурсные, нагрузочные, а также жесткостные характеристики проектируемой конструкции. В конечном итоге обеспечиваются высокие технические характеристики и конкурентоспособность выпускаемой продукции [1-9].

Необходимо отметить, что существующие в настоящее время численные методы моделирования процессов в нелинейных системах не обеспечивают только за счет своих внутренних средств контроль точности результатов моделирования по сравнению с поведением натуральных объектов.

В связи с этим возникает необходимость оценки достоверности полученных результатов реальному процессу или объекту. Для этого проводится экспериментальная проверка достоверности разработанных численных моделей и точности полученных результатов [1-5]. Экспериментальное исследование дает основу для установления более точного соответствия между изучаемыми параметрами и свойствами исследуемого объекта.

Анализ основных достижений и литературы. Опираясь на проведенные численные и экспериментальные исследования, представленные ранее в статьях [1-5], цель численных исследований заключалась в разработке усовершенствованной расчетной модели и экспериментальном сравнении полученных результатов для анализа геометрически нелинейных контактных задач на примере системы двух пластин, соединенных болтовым крепежом с зазором и нагруженных равномерно распределенным по верхней кромке поперечным усилием. В данной работе предлагается провести экспериментальное исследование для системы пластин, соединенных между собой болтовым крепежом с различными компоновками для подтверждения достоверности полученных результатов.

В данной статье описываются экспериментальные исследования, **цель** которых заключалась в исследовании системы пластин на поперечные прогибы, соединенных между собой болтовым крепежом с различными вариациями компоновок:

- соединение болтового крепежа с зазором между внутренней поверхностью отверстия и болтом;

- соединение с применением пластиковой шайбы, которая заполняет зазор во время затяжки болтового крепежа;

- соединение четырех пластин болтовым крепежом с применением пластиковой шайбы.

Затем описанные системы нагружаются по верхней кромке плавным поперечным усилием с циклической нагрузкой и разгрузкой. В ходе эксперимента определяются аналитические, численные и экспериментальные зависимости сдвигающей силы от поперечного усилия и характера поведения сдвигов пластин относительно друг друга при определенной затяжке болтового крепежа, применении пластиковой шайбы и использовании ряда пластин.

Методика экспериментального исследования. В качестве объекта исследования является система пластин, соединенных между собой болтовым крепежом с различной компоновкой. Схема исследуемой системы проиллюстрирована на рис. 1.

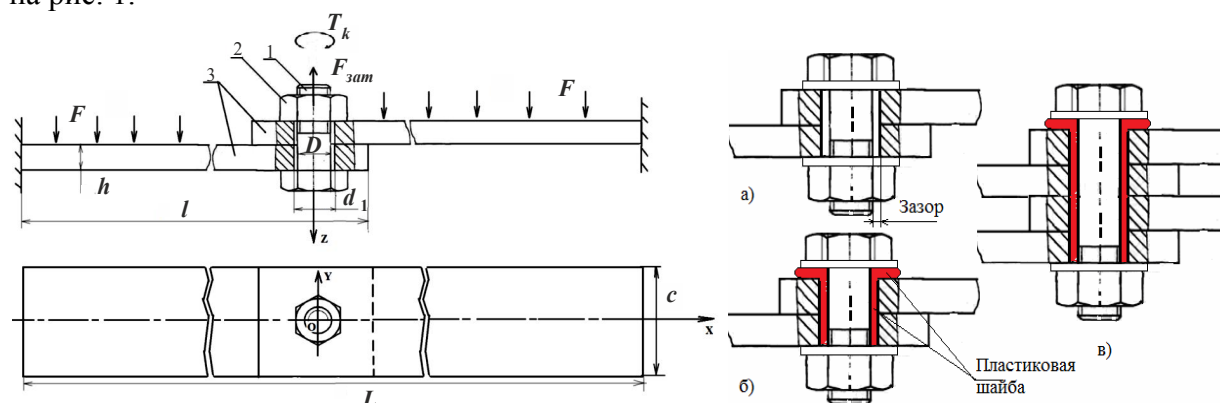


Рис. 1. Система пластин с различными компоновками болтовых соединений

Рассмотрим 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 $d_1 = 12$ мм, диаметр болта $D = 10$ мм, зазор между болтом и внутренней поверхностью отверстия пластин $k = 1$ мм. Пластины изготовлены из материала Сталь 3. Болтовое соединение представляет собой следующие компоновки:

1) болт 1 вставлен в отверстие двух пластин 3 с зазором и затянут гайкой 2 до момента затяжки T_k (рис. 1. а);

2) болт 1 вставлен в отверстие двух пластин 3 с пластиковой шайбой и затянут гайкой до момента затяжки, при котором пластиковая шайба деформируется и заполняет зазор (рис. 1. б);

3) болт 1 вставлен в отверстие четырех пластин с пластиковой шайбой и затянут гайкой до момента затяжки, при котором пластиковая шайба деформируется (рис. 1. в).

Прикладываемая внешняя нагрузка уравнивается силой трения в месте соединения пластин, которая возникает при затяжке болтового крепежа ($F_{зам}$ сила затяжки). При воздействующей внешней нагрузке, которая будет превышать силу трения в стыке двух пластин, будет наблюдаться сдвиг относительно контактирующих поверхностей пластин [3, 6].

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

- определение характера выборки зазора между болтом и внутренней поверхностью отверстия в пластинах;

- характер поведения проскальзывания между пластинами при определенной затяжке болтового крепежа и плавном нагружении;
- определение максимальных поперечных перемещений системы пластин, зависящих от нагружения;
- определение влияния использования пластиковой шайбы на поперечные прогибы системы двух пластин;
- определение поперечных прогибов системы пластин, состоящей из четырех пластин и пластиковой шайбы в болтовом крепеже;
- определение величины заполнения пластиковой шайбы зазора между внутренней поверхностью отверстия и болтом;
- проведение нагружения системы пластин до выборки зазора с дальнейшим циклическим нагружением и разгрузением систем.

Расчетные зависимости болтового соединения рассматривались ранее в статье [3]. Определив для данной силы затяжки момент завинчивания и силу сдвига, можно построить теоретическую зависимость силы сдвига от момента завинчивания [6].

Материалы исследования. Описание проведения эксперимента. Рассмотрим схему экспериментальной установки, представленную на рис. 2 .

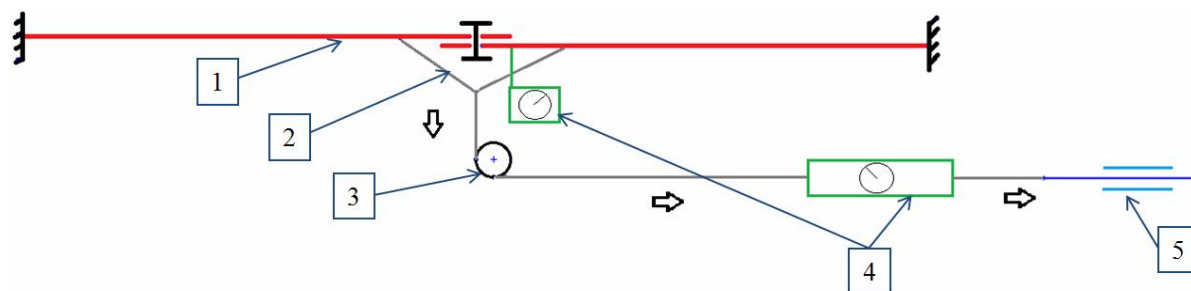


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

В схему экспериментальной установки входит: 1 – система пластин, 2 – соединительный трос, 3 – поворотный ролик, 4 – измерительное оборудование и 5 – механизм натяжки. Таким образом система пластин фиксируется по краям в станине, затем соединительный трос закрепляется вблизи болтового крепежа, и с помощью механизма натяжки производится натяжение троса с сопровождением поперечных перемещений пластин. Величина поперечных перемещений системы пластин фиксируется измерительным прибором расположенным под системой пластин, а усилие, воздействующее на верхнюю кромку пластин, – с помощью прибора расположенного между тросом и механизмом натяжки. По этой схеме была собрана натурная экспериментальная установка (рис. 3).

Установка для проведения экспериментальных исследований состоит из следующих приспособлений: станина с отдельными узлами для закрепления системы пластин по краям (рис.3, 1); измерительное оборудование поперечных перемещений (штангенциркуль цифровой ШЦЦ-I-150 0,01 ГОСТ 166-89 и индикатор часового типа ГОСТ 577-68) (рис.3, 2); поворотный ролик (рис.3, 3); измерительное оборудование прикладываемой нагрузки (весы ГОСТ ДСТУ-ЕН 45501:2007) (рис.3, 4); винтовой механизм натяжки (рис.3, 5). Дополнительное оборудование: динамометрический ключ ГОСТ 25603-83 и две видеокамеры, использовавшиеся для фиксации данных.

Проведение экспериментальных исследований заключалось в следующих этапах:

- подготовка экспериментальной установки и оборудования;

- плавное нагружение системы пластин с фиксацией поперечных перемещений и усилий нагружения;
- циклическая разгрузка и нагрузка системы пластин;
- разъединение системы пластин для фиксации выбранного зазора;
- повторное проведение всех этапов для различных компоновок болтовых соединений;
- обработка полученных данных.

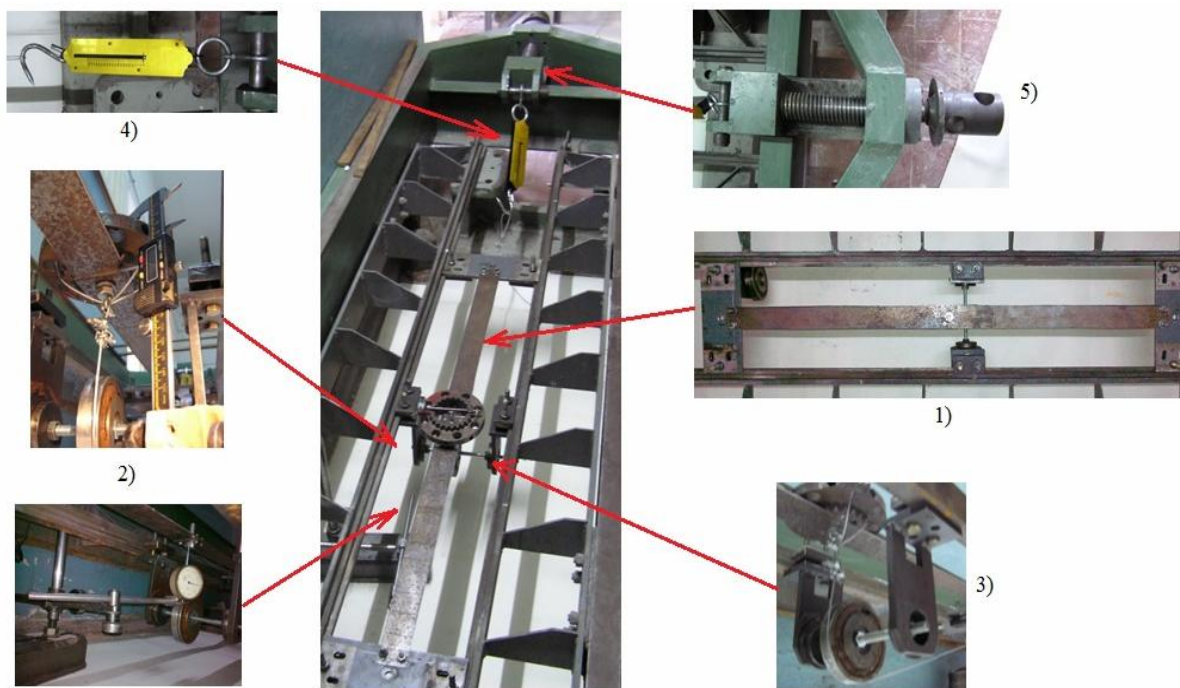


Рис. 3. Натурная экспериментальная установка

Для концентричной компоновки центрального отверстия в пластинах, выполнялись дополнительные отверстия, с помощью которых пластины фиксировались между собой. После данной компоновки выполнялось в сборе центральное отверстие диаметром 12 мм. Для концентрической фиксации болтового крепежа, зазор в отверстии заполнялся эластической компонентой в виде пластилина, которая не позволяла болту сдвигаться в стороны (рис. 4). При использовании пластиковой шайбы болтовой крепеж центрировался благодаря форме шайбы.

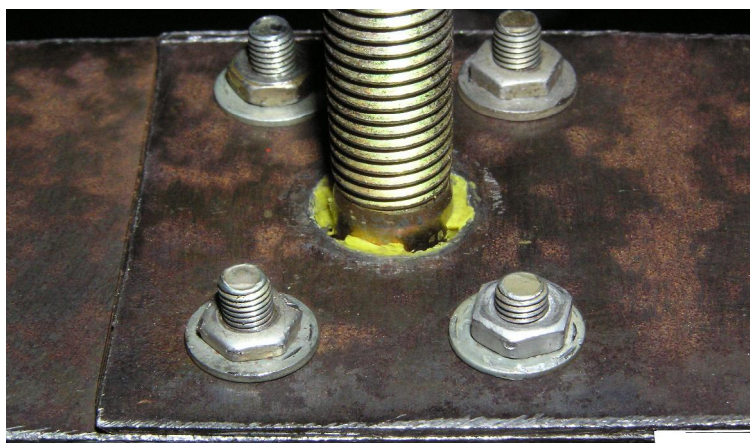


Рис. 4. Центровка болта

Затем с помощью динамометрического ключа болтовой крепеж затягивался с определенным моментом затяжки, который равен 10 Н/м. Данный момент заворачивания обеспечивает силу затяжки, равную 6600 Н [3, 6]. Рассмотрим вариант заворачивания болтового соединения с применением пластиковой шайбы. На рис. 5 проиллюстрировано поведение пластиковой шайбы при затяжке болтового крепежа.

После сборки системы пластин и экспериментальной установки выполнялась серия экспериментальных исследований. Нагружение системы пластин проводилось плавным увеличением нагрузки от 0 до 400-900Н. После выборки зазора на пластины прикладывалась циклическая нагрузка в виде полного нагружения и разгрузки исследуемой системы пластин. Поперечные перемещения и нагрузка, действующая на систему пластин, фиксировались двумя видеокамерами.



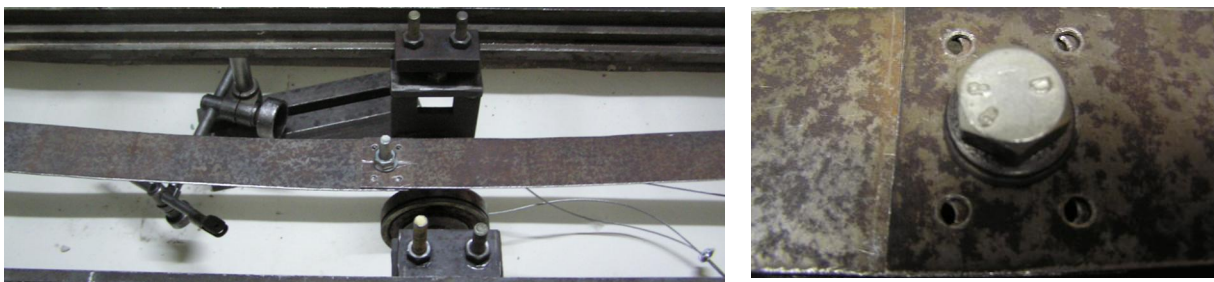
а

б

Рис. 5. Деформация пластиковой шайбы:
а – начальное положение; б – деформация при затяжке

В процессе нагружения системы пластин с зазором наблюдалось ступенчатое вертикальное перемещение пластин, которое сопровождалось также ступенчатой выборкой зазора между болтом и внутренней поверхностью отверстия (рис. 8). В вариантах с использованием пластиковой шайбы с двумя и четырьмя пластинами наблюдались плавные нелинейно возрастающие вертикальные перемещения, сопровождающиеся выборкой зазора с деформацией пластиковой шайбы.

После выполнения всех этапов экспериментального исследования, пластины разъединялись и проводился анализ выборки зазора (рис. 9-10).



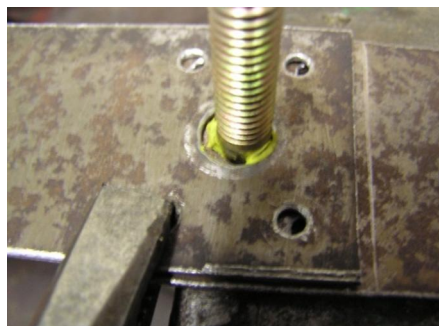
а

б

Рис. 8. Поперечные прогибы пластин:
а – системы пластин с зазором; б – системы пластин с пластиковой шайбой

Судя по представленным картинкам, наглядно виден сдвиг пластин относительно друг друга с выборкой зазора между внутренней поверхностью отверстия и болтом. В варианте с применением пластиковой шайбы наблюдается полное заполнение зазора, и во время сдвига пластин шайба деформируется.

Результаты экспериментальных исследований. В ходе проведения экспериментальных исследований были получены характеристики вертикальных перемещений системы пластин с различной компоновкой болтового соединения. Также были получены результаты зависимостей при воздействии на систему пластин циклической нагрузки. Результаты поперечных перемещений и воздействия циклической нагрузки показаны на рис. 11. По оси X обозначена сила нагружения в Н, по оси Y – максимальные вертикальные перемещения в мм.



а



б

Рис. 9. Выборка зазора:
а – системы пластин с зазором; б – системы пластин с пластиковой шайбой

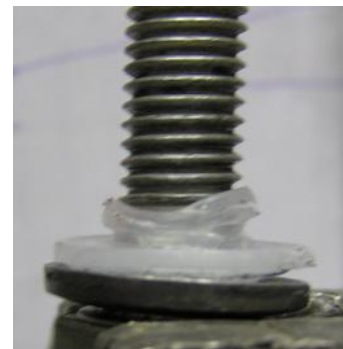


Рис. 10. Деформация шайбы

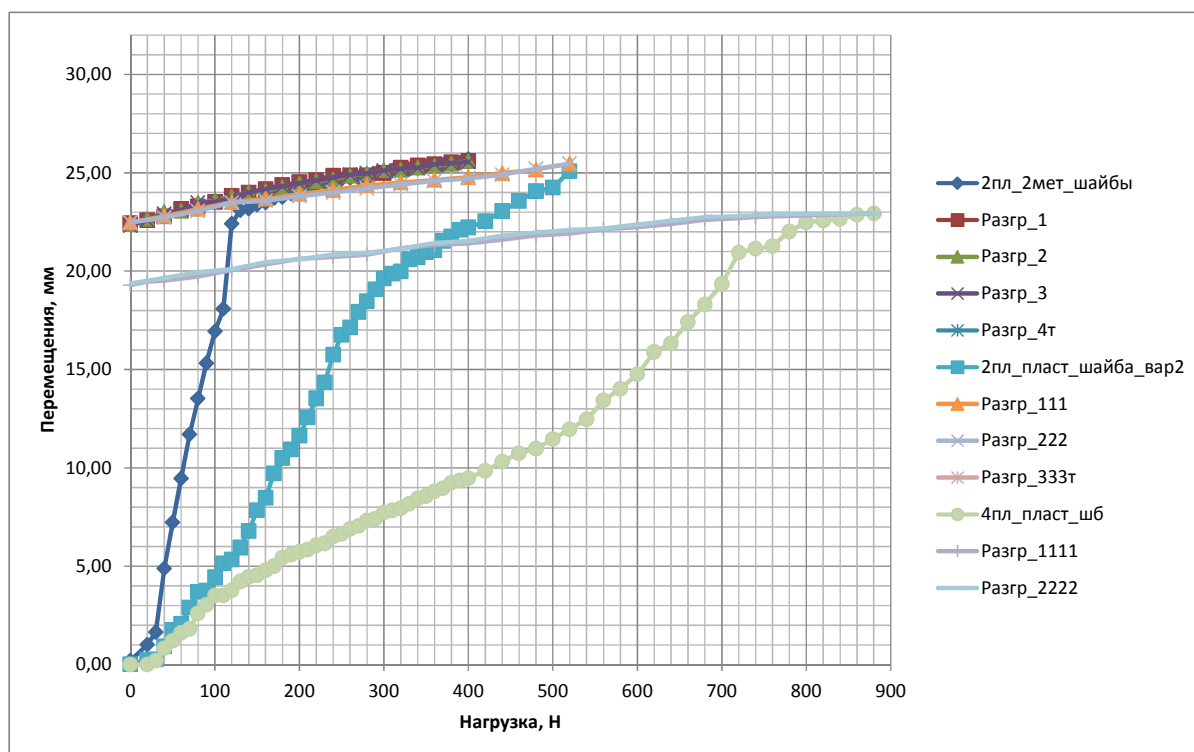


Рис. 11. Зависимость стрелы прогиба системы пластин от действующей силы и циклической нагрузке

Из графика видно, что вертикальные перемещения составляют около 27 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. Также определена зависимость при циклическом нагружении: разница в уровне перемещений между нагруженной и разгруженной системой составляет порядка двух мм. Система пластин с

зазором, которая показана на графике первой: полная выборка зазора происходит при нагружении 120 Н. Система пластин с пластиковой шайбой, показанной на графике второй: полная выборка зазора происходит при нагружении 520 Н. Система пластин состоящая из четырех пластин и болтового крепежа с пластиковой шайбой показана на графике третьей: полная выборка зазора происходит при нагружении 850 Н. Данное отличие объясняется тем, что при применении пластиковой шайбы зазор заполняется, и при смещении пластин относительно друг друга материал внутри зазора деформируется, на его сжатие необходимо дополнительное усилие. В варианте с четырьмя пластинами, кроме влияния пластиковой шайбы, также влияет увеличенная сила трения между соединениями. Это связано с тем, что количество контактирующих поверхностей увеличено с трех до пяти.

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

Проведено циклическое нагружение системы пластин, которое прояснило характер поведения возникающих перемещений. Во время данного нагружения система пластин перемещается на 2 мм, при этом выбранный зазор не возвращается в первоначальное положение, а также в этом случае наблюдается увеличение напряжений в зоне контакта пластин с болтом, что сопровождается работой болта на срез.

Определена необходимая сила затяжки болтового крепежа с пластиковой шайбой, которая составляет 6600Н.

Полученные экспериментальные результаты хорошо качественно и удовлетворительно количественно совпадают с результатами, полученными при решении задачи в численной постановке [2].

Список литературы: 1. Атрошенко О.О. Обґрунтування розрахункових моделей елементів силосу / В.Б. Третьяков, И.И. Иванцов, О.В. Веретельник, О.О. Атрошенко // Вісник НТУ «ХПИ». Серія.: Машинознавство та САПР. – 2013. – № 1. – С. 139-154. 2. О.О. Атрошенко Численное исследование контактных задач для системы пластин, соединенных болтовым крепежом. в геометрически нелинейной постановке / О.О. Атрошенко // Вісник НТУ «ХПИ». Тем.вип.: Машинознавство та САПР. – 2013. №1 (975). – с. 3-14. 3. О.О. Атрошенко Экспериментальное исследование системы пластин, соединенных болтовым крепежом / О.О. Атрошенко // Вісник НТУ «ХПИ».Серія.: Транспортне машинобудування. – 2014. №14 (1057). – с. 105-112. 4. О.О. Атрошенко Анализ влияния геометрической нелинейности на решение задачи об изгибе полосы / О.О. Атрошенко // Вісник НТУ «ХПИ».Серія.: Транспортне машинобудування. – 2014. №22 (1065). – с. 84-89 5. О.О. Атрошенко Изгиб полосы с учетом больших перемещений и влияния продольных усилий/ О.О. Атрошенко // Вісник НТУ «ХПИ». Тем.вип.: Машинознавство та САПР. – 2014. №29 (1072). – с. 3-13.6. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. / В.И. Анурьев – М.: Машиностроение, 2006. – 928 с. 7. 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. 8. 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. 9. 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.

Bibliography (transliterated): 1. Atroshenko O.O. Obgruntuvannya rozrahunkovih modeley elementiv silosu / V.B. Tretyakov, I.I. Ivantsov, O.V. Veretelnik, O.O. Atroshenko // *Visnik NTU «HPI»*. Seriya.: *Mashinoznavstvo ta SAPR*. – 2013. – № 1. – S. 139-154. 2. O.O. Atroshenko Chislennoe issledovanie kontaktnykh zadach dlya sistemy plastin, soedinennykh boltovym krepzhom. v geometricheski nelineynoy postanovke / O.O. Atroshenko // *Visnik NTU «HPI»*. Tem.vip.: *Mashinoznavstvo ta SAPR*. – 2013. №1 (975). – s. 3-14. 3. O.O. Atroshenko Eksperimentalnoe issledovanie sistemy plastin, soedinennykh boltovym krepzhom / O.O. Atroshenko // *Visnik NTU «HPI»*. SerIya.: *Transportne mashinobuduvannya*. – 2014. №14 (1057). – s. 105-112. 4. O.O. Atroshenko Analiz vliyaniya geometricheskoy nelineynosti na reshenie zadachi ob izgibe polosyi / O.O. Atroshenko // *Visnik NTU «HPI»*. SerIya.: *Transportne mashinobuduvannya*. – 2014. №22 (1065). – s. 84-89 5. O.O. Atroshenko Izgib polosyi s uchetom bolshih peremescheniy i vliyaniya prodolnykh usilyi/ O.O. Atroshenko // *Visnik NTU «HPI»*. Tem.vip.: *Mashinoznavstvo ta SAPR*. – 2014. №29 (1072). – s. 3-13.6. Anurev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya: v 3-h t. / V.I. Anurev – M.: Mashinostroenie, 2006. – 928 s. 7. Sazanbaev S.K. Eksperimentalnyye issledovaniya metallicheskiy navivnykh silosov / S.K. Sazanbaev, S.V. Saliev // *Problemyi povyisheniya effektivnosti kapitalnogo stroitelstva: Sb. nauch. tr., t. I. Alma-Ata, 1983. - S. 34*. 8. Alekseev S.A. Eksperimentalnoe issledovanie nagruzok na sfericheskie obolochki, sozdavaemykh vozdushnym potokom / S.A. Alekseev // *Raschet prostranstvennykh konstruktsiy, vyip XIII. M., 1970. - 39-42 s*. 9. Arhipov V.N. K modelirovaniyu plogikh ortotropnykh gibkikh plastin i obolochek / V.N. Arhipov, Yu.S. Gordeev // *Sb. Raschet prostranstvennykh sistem v stroitel'noy mehanike. Saratov: SGU, 1972. - 25-29 s*.

Атрошенко О.О.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНО
НЕЛІНІЙНИХ ЗАДАЧ НА ПРИКЛАДІ СМУГ, З'ЄДНАНИХ
БОЛТОВИМ КРІПЛЕННЯМ

Представлена робота присвячується експериментальному дослідженню системи пластин, з'єднаних між собою болтовим кріпленням з різним компонуванням. Експериментальне дослідження дає основу для встановлення більш точної відповідності між досліджуваними параметрами і властивостями досліджуваного об'єкта.

Атрошенко А.А.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ
НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ НА ПРИМЕРЕ ПОЛОС, СОЕДИНЕННЫХ
БОЛТОВЫМ КРЕПЕЖОМ

Представленная работа посвящается экспериментальному исследованию системы пластин, соединенных между собой болтовым крепежом с разной компоновкой. Экспериментальное исследование дает основу для определения более точного соответствия между исследуемыми параметрами и свойствами исследуемого объекта.

Atroshenko A.A.

EXPERIMENTAL OF GEOMETRIC NONLINEAR CONTACT ANALYSIS
OF SYSTEMS OF PLATES JOINTED WITH BOLT JOINT

This work is devoted to experimental investigation of plates jointed with bolt different layouts. Experimental investigation provides a basis for establishing a more exact match between the studied parameters and properties of the object.