

Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов конструкции изделия при ударе о твердую преграду

Юдин Д.А.*, Фирсанов В.В.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993, Россия

**e-mail: clasic29.00@mail.ru*

***e-mail: k906@mai.ru*

Статья поступила 30.01.2020

Аннотация

Представлены результаты расчетно-экспериментального исследования и математического моделирования элементов конструкции изделия при соударении с твердой преградой. Решается задача разработки эффективной методики численного моделирования трехмерных динамических задач удара.

Для решения задачи удара использовался метод конечных элементов.

С помощью численного моделирования результаты расчетов деформаций и напряжений сопоставлены с результатами натурных испытаний, которые показали их достоверность.

Ключевые слова: напряжения и деформации, испытания, разрушение, скорости подхода, смятие демпфера.

Введение

Испытания на действие ударных нагрузок являются обязательной частью общего комплекса предварительных полигонных испытаний опытных образцов изделий техники на этапе опытно-конструкторской работы. Основное требование к полигонным испытаниям состоит в обеспечении эквивалентности ударного нагружения в полигонных условиях нагружению изделия при эксплуатации.

Достоверность результатов ударных испытаний можно повысить, совершенствуя испытательное и измерительное оборудование, а также методику испытаний за счет определения ударных нагрузок, максимально приближенных к эксплуатационным.

Объектом исследования является алюминиевый демпфер, изготовленный из сплава Д16 в двух вариантах исполнения (рисунок 1а, б). Наполнитель демпфера изготовлен из пенополиуретана.

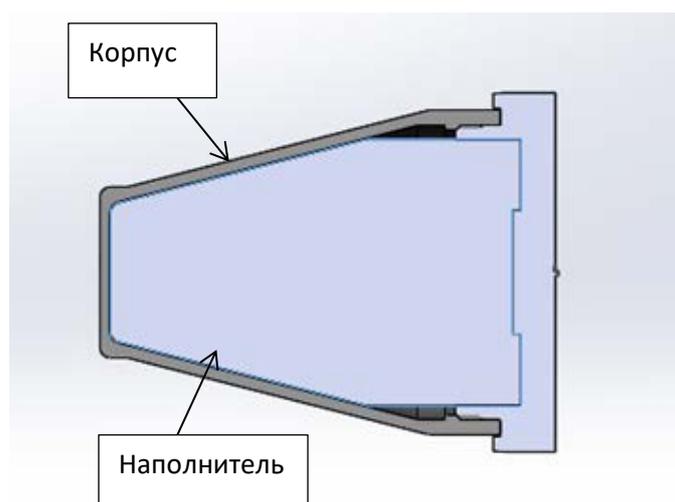


Рисунок 1а. Демпфер с наполнителем

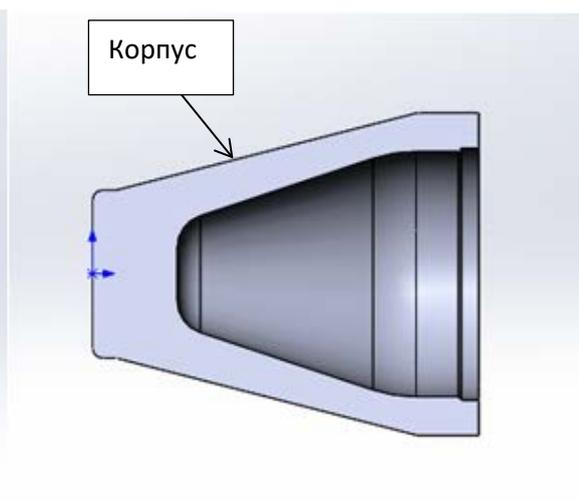


Рисунок 1б. Демпфер без наполнителя

Скорость подхода к преграде $V=120$ м/с, угол подхода к преграде $\varphi=90^\circ$. В качестве преграды использована стальная плита толщиной 50 мм (рисунок 2).

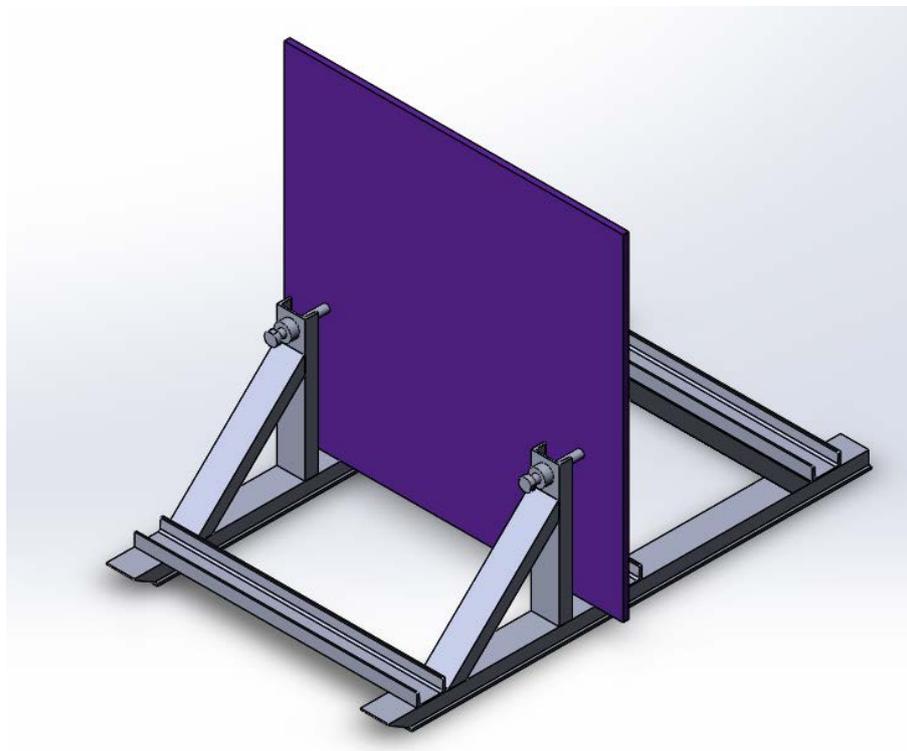


Рисунок 2. Твердая преграда

Измерения, проведенные при полигонных испытаниях, показали, что при соударении с преградой возникают существенные динамические деформации конструкции изделия, которые могут вызвать преждевременное включение изделия. Наибольший уровень деформаций изделия возникает в головной части демпфера [1].

С целью уменьшения объема дорогостоящих полигонных испытаний изделий проводится их замена математическим моделированием с помощью современных компьютерных программ. Основное требование к численным расчетам состоит в обеспечении эквивалентности ударного нагружения при математическом моделировании, нагружению в условиях полигонных испытаний [2]. В качестве

условий эквивалентности обычно принимается соответствие режимов испытаний математической модели по скоростям и углам соударения, а также по уровням перегрузок в характерных зонах конструкции [3].

Для обеспечения соответствия уровней напряжений и деформаций при полигонных испытаниях уровням, наблюдаемым при эксплуатации, разработана методика расчетно-экспериментального формирования режимов испытаний изделия при ударе о твердую преграду на основе численного моделирования. В результате применения данной методики сформированы режимы полигонных испытаний изделия, соответствующих требованиям эквивалентным по уровням напряжений и деформаций.

Для проведения испытаний изделия на удар необходимо использовать твердую преграду идентичную по механическим характеристикам материалу реального объекта [4].

Конструкция приспособления должна удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать жесткое крепление стальной к рабочей поверхности;
- иметь минимально возможную массу и удовлетворять требованиям по прочности и надёжности при испытаниях конструкции, имеющей заданную массу, с расчетной интенсивностью нагружения.

Целью исследований является расчетно-экспериментальное обоснование методики испытания изделия на смятие, позволяющей получать обоснованные оценки работоспособности конструкции изделия в целом.

Исследования состоят из следующих этапов:

- разработка конечно-элементной (КЭ) модели изделия и проведение модального анализа конструкции;
- проведение испытаний по определению деформаций;
- сравнение результатов испытаний и конечно-элементного моделирования, а также корректировка модели;
- определение режимов нагружения головной части изделия, обеспечивающих необходимые уровни деформаций, соответствующие полученным в ходе полигонных испытаний, на основе численного моделирования напряженного состояния [5].

В программном комплексе ANSYS разработана КЭ модель изделия (рисунок 3) [6]. При моделировании использовались следующие конечные элементы: квадратичные 20-узловые SOLID 186 и квадратичные 10-узловые SOLID 187. Общее количество элементов, обеспечивающее сходимость результатов – 52893, узлов – 64908 [7].

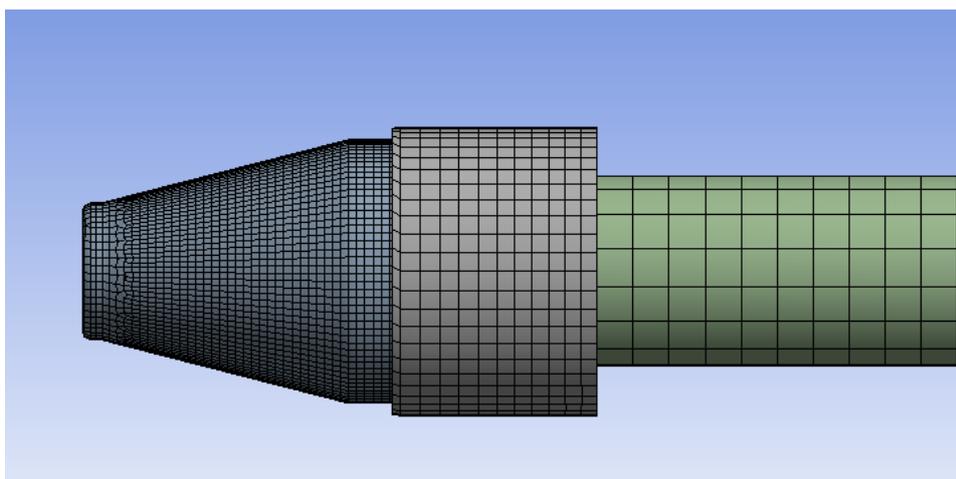


Рисунок 3. Конечно-элементная модель изделия

Граничные условия – заделка на нижней поверхности жесткой преграды. В модели использовались контакты типа «bonded» - жесткое прикрепление по всей поверхности контакта [8].

В результате расчета для двух вариантов исполнения демпфера получены следующие значения:

Тип демпфера	Перегрузка	Деформации, мм
С наполнителем	6300	68 (полностью разрушился)
Без наполнителя	5300	37

На рис.4 изображена стальная преграда и подходящее к ней изделие при полигонных испытаниях.



Рисунок 4. Натурные испытания

Ниже на рис. 5-8 изображены демпферы после численного расчета и полигонных испытаний.



Рисунок 5. Изделие с демпфером без наполнителя после испытания на полигоне

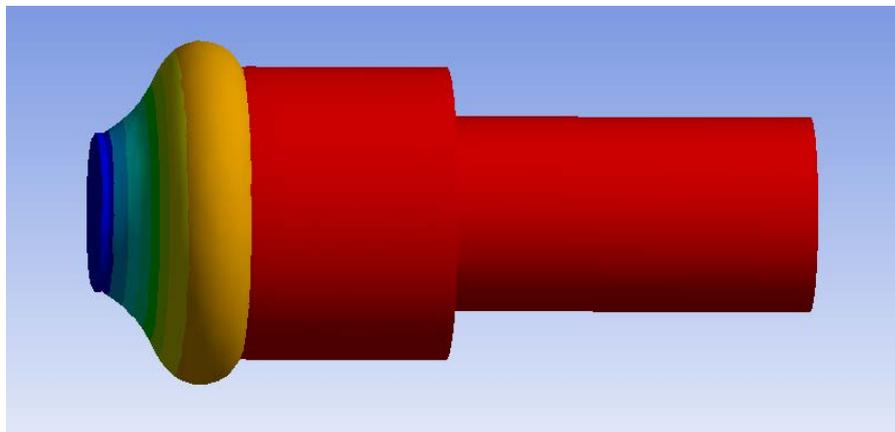


Рисунок 6. Математическая модель изделия с демпфером без наполнителя в результате численного расчета



Рисунок 7. Изделие с демпфером с наполнителем после испытания на полигоне

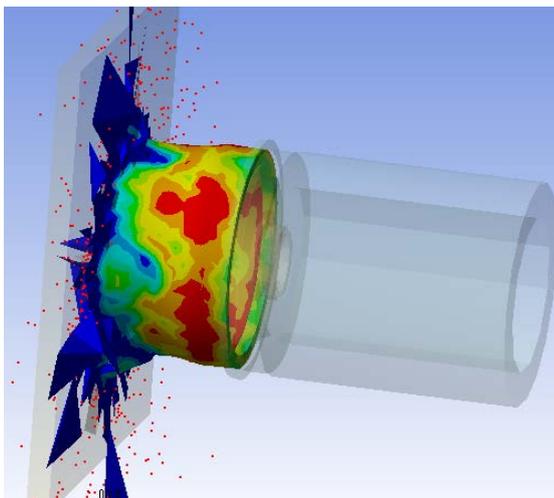


Рисунок 8. Математическая модель изделия с демпфером с наполнителем в результате численного расчета

Сравнительный анализ численного расчета и натурального испытания показал, что модели деформируются эквивалентно, в первом случае демпфер сминается, во втором полностью разрушается вместе с наполнителем [9].

Заключение

Проведено расчетно-экспериментальное исследование вибродинамического состояния элементов конструкции изделий при ударе о твердую преграду. Предлагается эффективная методика численного моделирования трехмерных динамических задач удара.

В результате расчетов с помощью математического моделирования напряженно-деформированного состояния рассматриваемого изделия получены значения перегрузок и перемещений.

Анализ полученных результатов показал, что изделие при численном моделировании и полигонном испытании деформируется эквивалентно.

Результаты выполненных расчетных исследований вибродинамического состояния изделия при ударе о твердую преграду, могут быть использованы для оптимизации параметров несущих конструкций при проектировании аналогичных изделий с различными физическими и механическими свойствами.

Библиографический список

1. Тишков В.В., Фирсанов В.В. Комбинированная аналитическая модель динамического состояния объекта авиационной техники при ударе о твёрдую преграду // Научный вестник МГТУ ГА. 2007. № 123. С. 58 - 67.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. -541 с.
3. ГОСТ 30630.1.2-99. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие вибрации. – М.: Издательство стандартов, 2000. – 23 с.
4. Xing YuFeng, Zhu DeChao. Analytical solutions of impact problems of rod structures with springs // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, vol. 160, no. 3 - 4, pp. 315 - 323.
5. Тишков В.В., Фирсанов В.В. Многоуровневый подход при построении расчётных моделей динамического состояния объектов авиационной техники при среднескоростном ударе о твёрдую преграду // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 161. С. 74 - 84.
6. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.

7. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. – 311 с.

8. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. Vol.2. Solid Mechanics. Butterworth-Heinemann, 2000, 479 p.

9. Юдин Д.А. Результаты численного моделирования конструкций изделий, при ударе о жидкую и твердую преграды // Труды МАИ. 2019. № 107
<http://trudymai.ru/published.php?ID=107913>

10. Каплун А.Б., Морозов Е.В., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2015. - 270 с.

11. Горшков.А.Г., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Основы тензорного анализа и механика сплошной среды. – М.: Наука, 2000. - 214 с.

12. ANSYS Manuals, available at:
<http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansys56manual.pdf>

13. Тергулов И.Г. Изгиб и устойчивость тонких пластин и оболочек при ползучести. - М.: Наука, 1969. - 206 с.

14. Вербицкий А.Б. Сидоренко А.С. Динамическое деформирование конструкции авиационного изделия при аварийном соударении с преградой // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=5350>

15. Зверьев Е.М. О соотношениях упругости в линейной теории тонких упругих оболочек // Прикладная математика и механика. 1970. Т. 34. № 6. С. 1136 - 1138.

16. Голдовский А.А. Численные модели прогнозирования контактных зон в результате ударного взаимодействия авиационных конструкций с преградой при аварийных

ситуациях // Труды МАИ. 2019. № 107. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=107919>

17. Станкевич И.В. Математическое моделирование контактных задач теории упругости с непрерывным односторонним контактом // Математика и Математическое моделирование. 2015. № 5. С. 83 – 96.

18. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Смолин А.Ю. Исследование влияния дискретизации при расчете методом конечных элементов трехмерных задач высокоскоростного удара // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1997. Т. 37. № 6. С. 742 – 750.

19. Башмаков А.И., Башмаков И.А. Интеллектуальные информационные технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. – 304 с.

20. ГОСТ 25.101–83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 21 с.

Computational and experimental study of the strain-stress state of product structural elements at the impact against a solid obstruction

Yudin D.A.*, Firsanov V.V.**

*Moscow Aviation Institut (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia*

**e-mail: <mailto:clasic29.00@mail.ru>*

***e-mail: k906@mai.ru*

Abstract

The article presents the results of computational and experimental study and mathematical modelling of product structural elements while the impact with the solid impediment. The problem of developing effective technique of numerical modelling of three-or dimensional dynamic impact problems.

The finite element method was used for the impact problem solving.

The results of strains and stresses computing were compared, using numerical modelling, with the results of the full-scale test, which demonstrated their validity.

The impact load tests are an obligatory part of the general complex of preliminary field tests of the prototypes of engineering products at the experimental development stage. The basic requirement to the field tests consists in ensuring the equivalence of the impact loading under the field conditions of the product loading while operation.

The validity of the impact loading tests ca be increased by improving testing and measuring equipment, as well as testing technique due to determining impact loads as close as possible to the operational ones.

To reduce the volume of the cost intensive field tests of the products, they are being replaced by mathematical modelling with modern software. The basic requirement for

numerical computations consists in ensuring the equivalence of the impact loading while mathematical modelling to the loading under conditions of the field tests. Usually, the correspondence of the testing modes on the velocities and impingement angles, as well as overloads levels in the characteristic zones of the structures are being accepted as the equivalence conditions.

Keywords: stresses and strains, testing, destruction, approach velocities, damper crushing.

References

1. Tishkov V.V., Firsanov V.V. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2007, no. 123, pp. 58 - 67.
2. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* (Finite Element Method in engineering), Moscow, Mir, 1975, 541 p.
3. *GOST 30630.1.2-99. Metody ispytaniia na stoikost' k mekhanicheskim vneshnim vozddeistvuyushchim faktoram mashin, priborov i drugikh tekhnicheskikh izdelii. Ispytaniya na vozddeistvie vibratsii* (State Standard 30630.1.2-99. Test methods for resistance to mechanical external factors of machines, instruments and other technical products. Vibration test), Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2000, 23 p.
4. Xing YuFeng, Zhu DeChao Analytical solutions of impact problems of rod structures with springs, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1998, vol. 160, no. 3 - 4, pp. 315 - 323.
5. Tishkov V.V., Firsanov V.V. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2010, no. 161, pp. 74 - 84.

6. Fedorova N.N., Val'ger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. *Osnovy raboty v ANSYS 17* (Fundamentals of work in ANSYS 17), Moscow, DMK Press, 2017, 210 p.
7. Kachanov L.M. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* (Fundamentals of fracture mechanics), Moscow, Nauka, 1974, 311 p.
8. Zienkiewicz O.S., Taylor R.L. *The Finite Element Method. Vol.2. Solid Mechanics*. Butterworth-Heinemann, 2000, 479 p.
9. Yudin D.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 107, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=107913>
10. Kaplun A.B., Morozov E.V., Olfer'eva M.A. *ANSYS v rukakh inzhenera* (ANSYS in hand of the engineer), Moscow, Knizhnyi dom "LIBROKOM", 2015, 270 p.
11. Gorshkov.A.G., Rabinskii L.N., Tarlakovskii D.V. *Osnovy tenzornogo analiza i mekhanika sploshnoi sredy* (Fundamentals of tensor analysis and continuum mechanics), Moscow, Nauka, 2000, 214 p.
12. *ANSYS Manuals*, available at: <http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansys56manual.pdf>
13. Teregulov I.G. *Izhib i ustoichivost' tonkikh plastin i obolochek pri polzuchesti* (Bending and buckling stability of thin plates and shells at creeping), Moscow, Nauka, 1969, 206 p.
14. Verbitskii A.B. Sidorenko A.S. *Trudy MAI*, 2014, no. 78, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=5350>
15. Zveryaev E.M. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 1970, vol. 34, no. 6, pp. 1136 - 1138.
16. Goldovskii A.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 107, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=107919>

17. Stankevich I.V. *Matematika i Matematicheskoe modelirovanie*, 2015, no. 5, pp. 83 – 96.
18. Gorel'skii V.A., Zelepugin S.A., Smolin A.Yu. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki*, 1997, vol. 37, no. 6, pp. 742 – 750.
19. Bashmakov A.I., Bashmakov I.A. *Intellektual'nye informatsionnye tekhnologii* (Intelligent Information Technologies), Moscow, Izd-vo MGTU im. Baumana, 2005, 304 p.
20. *GOST 25.101–83. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody skhematizatsii sluchainykh protsessov nagruzheniya elementov mashin i konstruktsii i statisticheskogo predstavleniya rezul'tatov* (State Standard 25.101–83. Calculations and strength tests. Methods for schematizing random processes of of machines and structures elements loading and statistical presentation of the results), Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1984, 21 p.