

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИСПЫТАНИЯ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ

© 2024 И.Е. Адеянов, М.Ю. Александрова

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 26.06.2024

Ударные испытания могут быть полезны в различных областях, включая автомобильную промышленность, авиацию, строительство, оборону и многие другие. Они помогают определить, насколько хорошо материал или конструкция могут выдерживать ударные нагрузки, и могут помочь в разработке более безопасных и надежных продуктов. Ударные испытания могут проводиться различными способами, включая использование специальных ударных машин, которые создают контролируемые ударные нагрузки, или путем моделирования реальных условий, таких как столкновения или взрывы. Испытания на ударную вязкость были проведены с помощью маятникового копра МК-15, а затем была создана компьютерная модель для проведения виртуальных экспериментов. Результаты натурных экспериментов и численного расчета приведены в представленной работе.

Ключевые слова: ударная вязкость, маятниковый копер, напряженно-деформированное состояние, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-237-243

EDN: HURBPO

Для оценки свойств материала при динамических нагрузках недостаточно знания механических характеристик материала, определяемых при статических испытаниях. При больших скоростях нагружения увеличивается опасность хрупкого разрушения. Эта опасность особенно возрастает при наличии в детали различного рода концентраторов напряжений (надрезов, отверстий, выточек, галтелей, канавок и др.). Поэтому для оценки способности материала сопротивляться ударным нагрузкам производят специальные испытания на ударную вязкость.

Они важны для высокопрочных сплавов, которые, имея удовлетворительные характеристики пластичности в обычных испытаниях, могут хрупко разрушаться в реальных конструкциях при наличии концентраторов.

На практике встречаются несколько видов ударных испытаний, различающихся по виду деформации. Наиболее распространены испытания на ударный изгиб образцов с надрезом одним ударом на специальных маятниковых копрах. Этот способ заключается в том, что образец с надрезом посередине его длины, свободно лежащий на двух опорах (рис. 1), подвергается разрушению ударом падающего маятника со стороны, противоположной надрезу [1]. При

этом определяется полная работа, затраченная на разрушение образца и ударная вязкость.

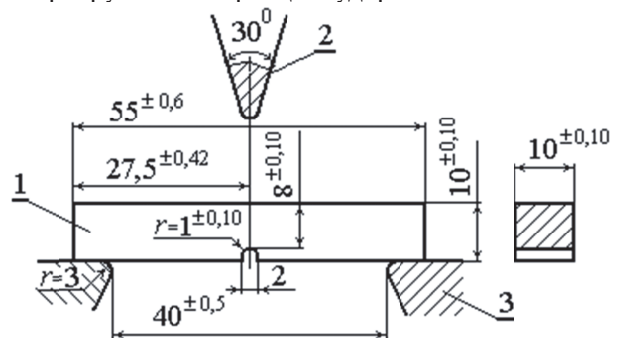


Рис. 1. Схема испытания образца на ударную вязкость:

1 – образец 1 типа с U-образным концентратором; 2 – нож маятника; 3 – опора

Под ударной вязкостью a_i следует понимать работу удара A_i , отнесенную к начальной площади F поперечного сечения образца в месте концентратора (надреза) до испытания:

$$a_i = \frac{A_i}{F}, \tag{1}$$

где i – символ типа образца.

Чем выше ударная вязкость, тем лучше материал сопротивляется ударным нагрузкам. Ударная вязкость зависит от формы и размеров образца, от температуры испытания. При снижении температуры ударная вязкость резко снижается (хладноломкость).

Надрез создает значительное ослабление сечения, а, следовательно, резкое повышение на-

Адеянов Игорь Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики.

E-mail: adigorev@gmail.com

Александрова Маргарита Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры механики.

E-mail: kris-maks@mail.ru

пряжений. Материал вблизи надреза находится в объёмном напряжённом состоянии, что затрудняет развитие пластических деформаций. Почти вся энергия удара поглощается небольшим объёмом материала в зоне ослабления.

Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах регламентирует ГОСТ 9454–78.

Для испытаний применяют образцы типов 1...20, имеющие форму брусков прямоугольного или квадратного сечения с надрезами посередине. Концентраторы бывают трех видов: U-, V- и Т-образные.

Испытание образцов производилось на маятниковом копре типа МК-15 с номинальной потенциальной энергией удара 150 Дж (рис. 2, а). Схема копра приведена на рис. 2, б. Согласно ГОСТ 10708-82, скорость движения маятника в момент удара для такого копра должна быть в диапазоне 5 ± 0.5 м/с.

Было проведено испытание нескольких образцов из алюминиевого сплава типа I с U-образным концентратором. Размеры образца в месте надреза 0.8×1 см, соответственно площадь поперечного сечения $F = 0.8$ см². Образец до и после испытания показан на рис. 3.

По результатам испытаний было определено среднее значение работы удара $A_1 = 20$ Дж. Согласно формуле (1), была рассчитана ударная вязкость $a_1 = 25$ Дж/см².

Скорость движения маятника v в момент удара была определена аналитически с помощью закона сохранения энергии:

$$mgh = \frac{mv^2}{2}, \quad (2)$$

где m – масса маятника, g – ускорение свободного падения, h – высота падения ножа маятника.

В нашем случае:

$$h = l(1 + \sin(\alpha - 90^\circ)), \quad (3)$$

где l – расстояние от оси качения до центра удара, α – действительный угол падения маятника.

Таким образом, была найдена искомая скорость:

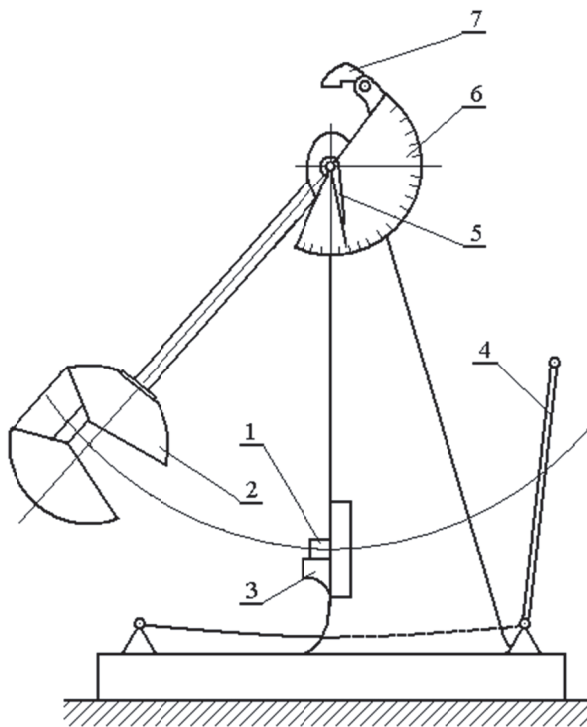
$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2gl(1 + \sin(\alpha - 90^\circ))} = \sqrt{2 \cdot 9.8 \cdot 0.562 \cdot (1 + \sin(151.2^\circ - 90^\circ))} = 4.55 \text{ м/с.} \quad (4)$$

В дальнейшем расчет скорости удара ножа маятника и ударного взаимодействия проводился с помощью компьютерного моделирования.

Сначала решалась задача динамики твердого тела. Была создана геометрическая твердотельная модель маятника (рис. 4, а). Её закрепление с помощью поворотного шарнира показано на рис. 4, б. Моделировались свободные колебания маятника вокруг шарнира из исходного положения ($\alpha = 151.2^\circ$) под действием силы тяжести. На



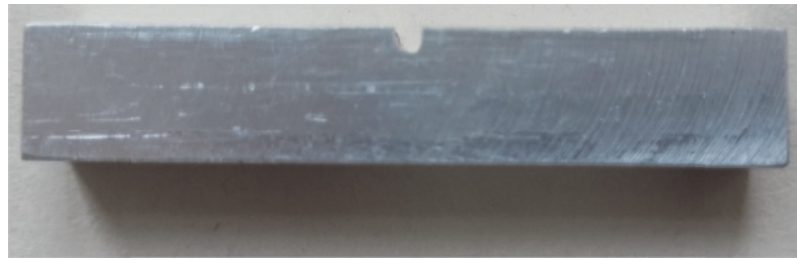
а) Общий вид маятникового копра МК-15



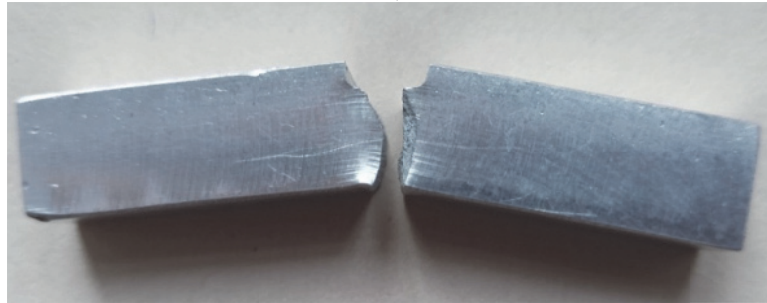
б) Схема маятникового копра МК-15:

- 1 – образец; 2 – нож маятника; 3 – опоры;
- 4 – рычаг ленточного тормоза; 5 – стрелка;
- 6 – шкала; 7 – защелка

Рис. 2. Маятниковый копер МК-15

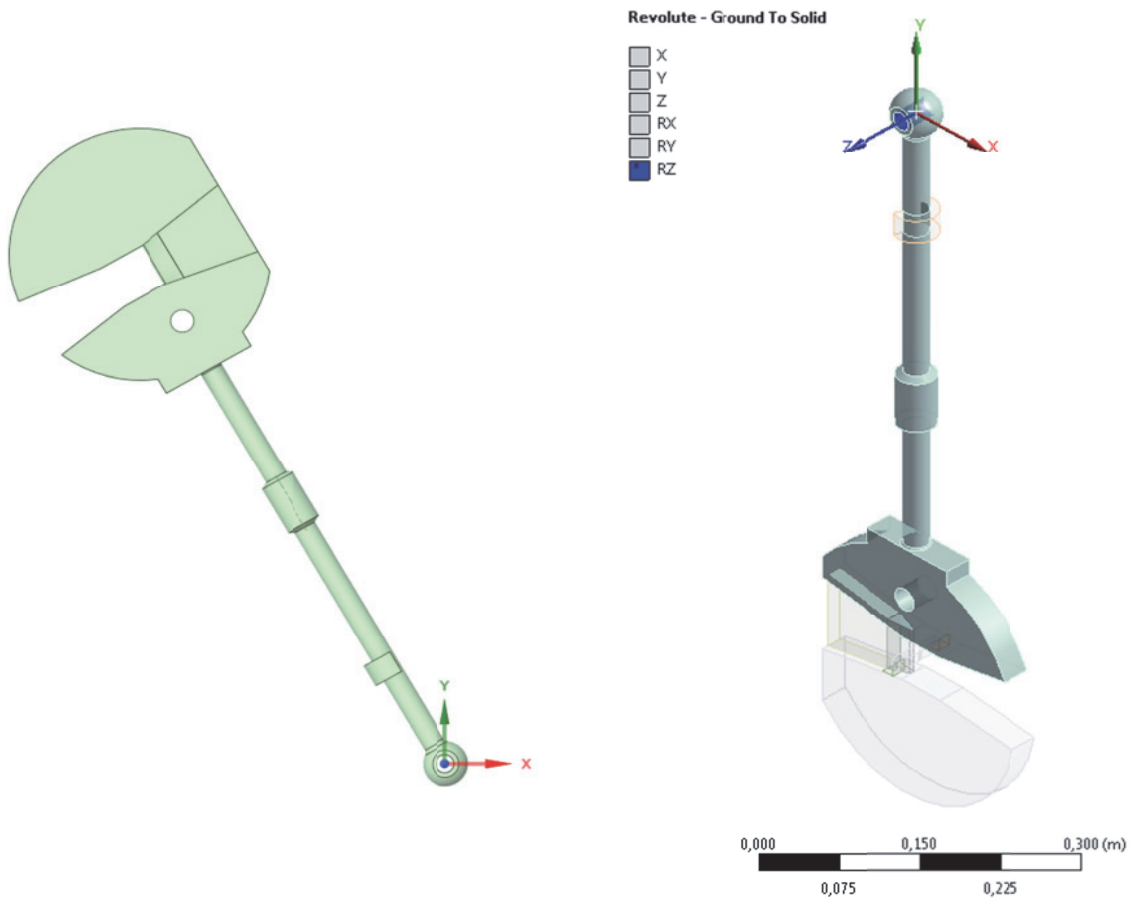


а)



б)

Рис. 3. Алюминиевый образец типа I с U-образным вырезом:
а) до испытания; б) после испытания



а) Твёрдотельная модель маятника копра МК-15 в исходном положении

б) Поворотный шарнир в отверстии маятника

Рис.4. Модель маятника копра МК-15

рис. 5 представлена зависимость линейной скорости ножа маятника от времени. Точкам максимума на графике полной скорости соответствует величина $v = 4.546$ м/с. Она хорошо коррелирует со значением, полученным аналитически, и по-

падает в диапазон скоростей, указанном выше. Время, в течение которого полная скорость на графике достигает первого максимума, составило 0.715 с, что соответствует моменту удара по образцу.

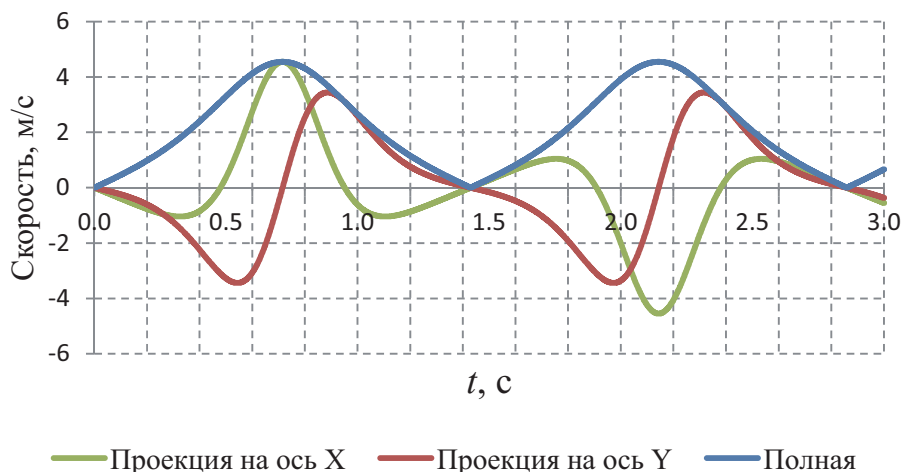


Рис. 5. Зависимость линейной скорости ножа маятника от времени

Полученные значения скорости и времени необходимы для дальнейшего расчета удара. Эта задача решалась в явной динамической постановке. Важной чертой такого анализа является относительно малый шаг расчета по времени [2]. Поэтому временем начала решения был выбран момент касания ножом маятника образца. При этом маятник находится в нижнем положении и полная линейная скорость ножа маятника равна проекции скорости на ось X, что видно на рис. 5.

Созданная конечно-элементная модель испытательной установки и образца [3] показана на рис. 6. Маятник и опоры моделировались как абсолютно твердые тела, а для образца была задана билинейная диаграмма деформирования и следующие константы материала: плот-

ность 2770 кг/м^3 , модуль продольной упругости $7.1 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, коэффициент Пуассона 0.33, предел текучести $4 \cdot 10^7 \text{ Па}$, касательный модуль $5 \cdot 10^8 \text{ Па}$. В качестве граничных условий, использованы: шарнирное закрепление маятника, сила тяжести, опоры образца. В начальный момент времени задавалась скорость маятника $v = 4.546 \text{ м/с}$, найденная ранее.

В результате численного расчета образец деформировался и вылетел из опор в направлении удара. Полученные в процессе решения эквивалентные напряжения в образце (рис. 7), достигают максимального значения 264.7 МПа , а затем падают до 59.5 МПа после потери контакта образца с опорами. Место положения максимального напряжения при этом перемещается по

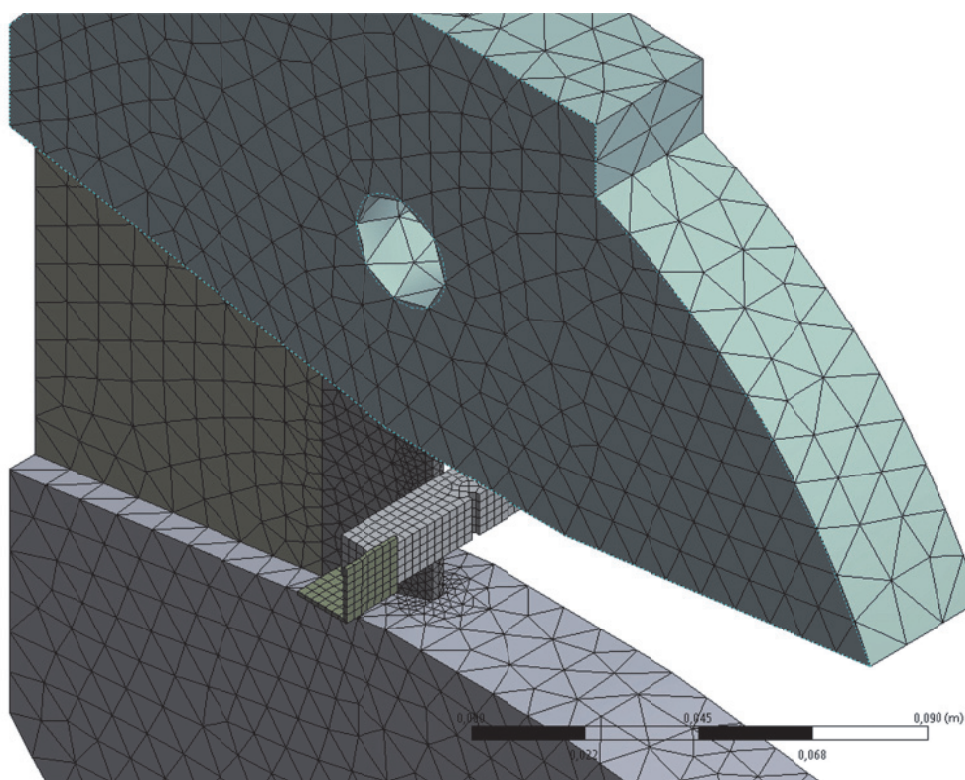
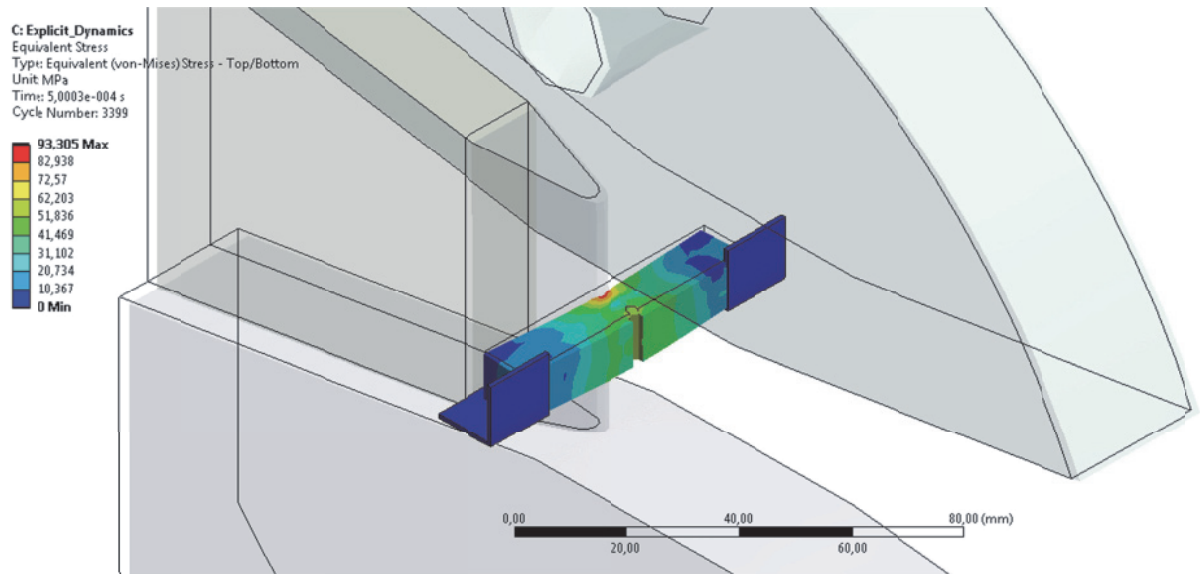


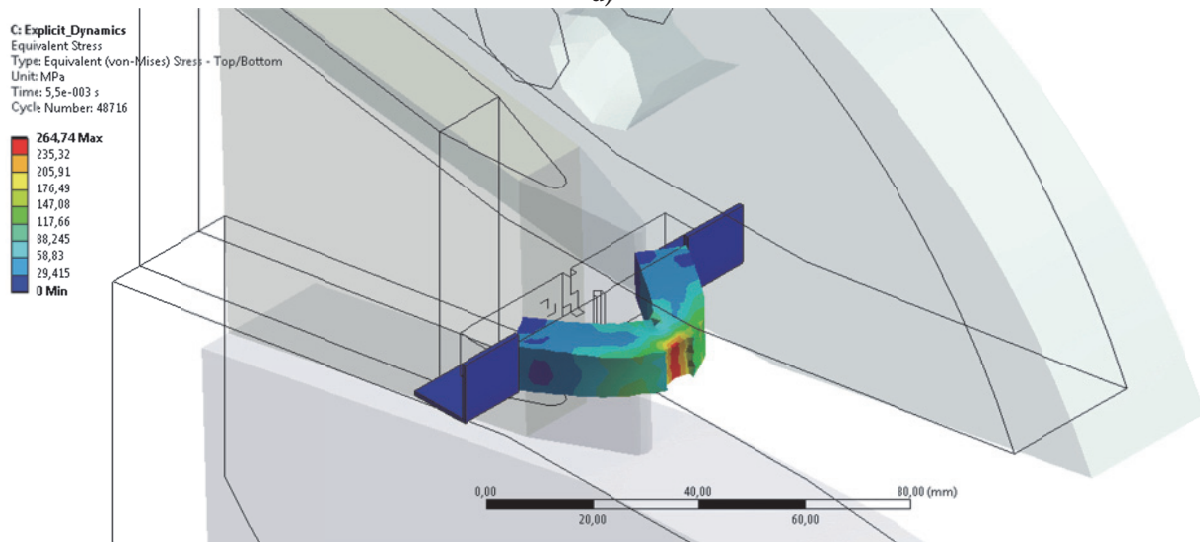
Рис.6. Конечно-элементная сетка в области образца

опасному сечению образца (сечение с наименьшей площадью) со стороны касания ножа маятника к U-образному концентратору.

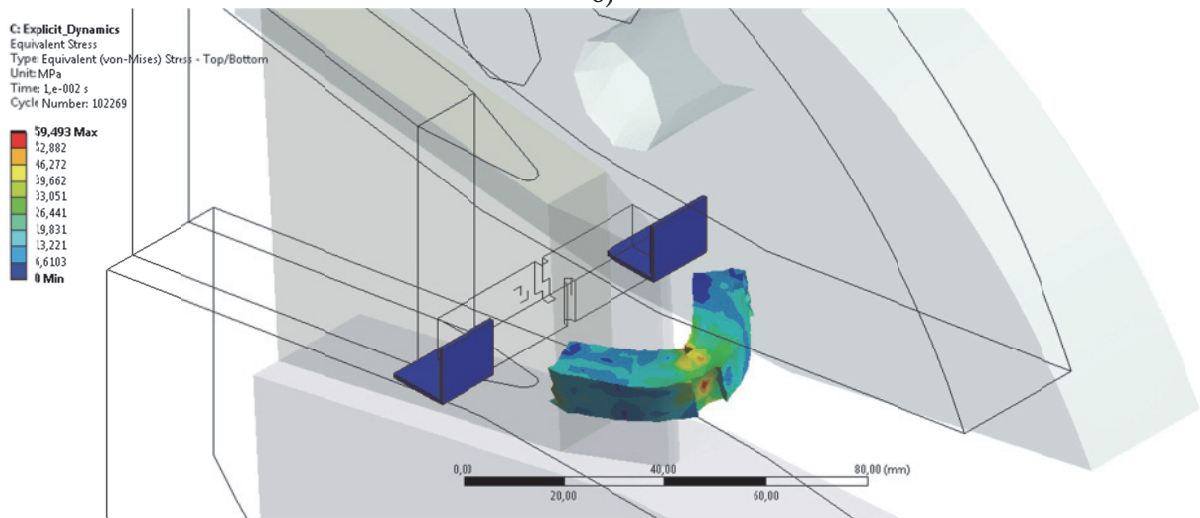
Рассчитанное изменение полной и контактной энергии маятника показано рис. 8, а, а образца – на рис. 8, б. В начале расчета полная



а)

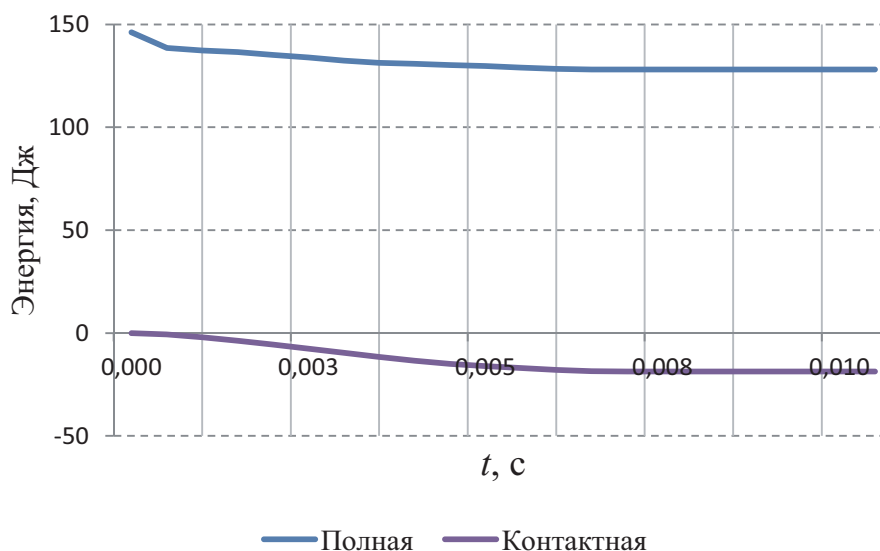


б)

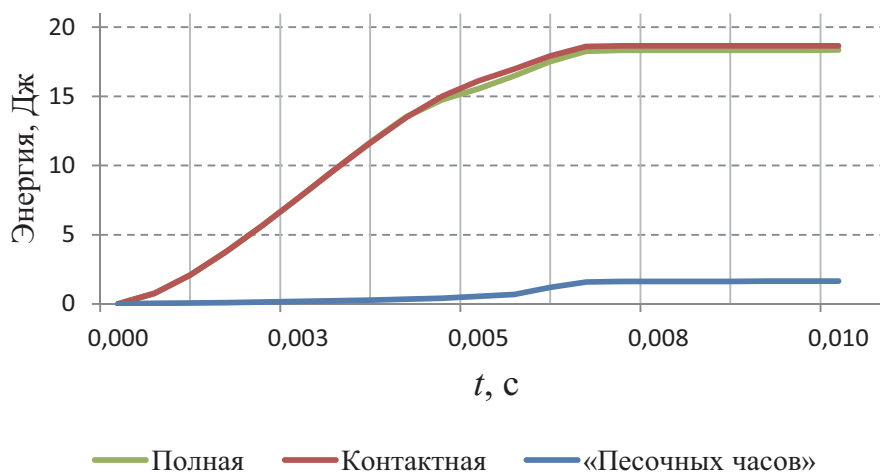


в)

Рис.7. Эквивалентные напряжения в образце в моменты времени: а) 0.5 мс; б) 5.5 мс; в) 10 мс



а) Зависимость энергии ножа маятника от времени



б) Зависимость энергии образца от времени

Рис. 8. Зависимость энергии от времени

энергия маятника составляла 146 Дж, что примерно соответствует номинальной потенциальной энергии удара маятникового копра МК-15. В процессе удара часть этой энергии переходит во внутреннюю энергию образца, вследствие чего величина энергии маятника уменьшается до 128 Дж. Соответственно внутренняя энергия образца, а так же энергия контактного взаимодействия возрастает от 0 до 17-18 Дж.

В наших расчетах доля энергии образца, ассоциированной с эффектом «песочных часов», составляет менее 10% от внутренней энергии, что говорит о достаточной точности полученных результатов.

Средняя работа удара по алюминиевому образцу в натурном эксперименте, соответствующая полной энергии маятника, составила 20 Дж. Та же энергия, найденная методом конечных элементов, равна 18 Дж. Сравнительный анализ полученных результатов свидетельствует о до-

статочно хорошем качестве построенной компьютерной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дедов, Н.И. Соппротивление материалов: Лабораторный практикум на базе комплекса / Н.И. Дедов, И.Е. Адеянов, Н.Г. Сарбатов, М.Ю. Александрова, В.Н. Исуткина, А.Е. Горбунов. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2016. – 114 с.
2. Адеянов, И.Е. Исследование ударного отклика соевой конструкции с тонкими обшивками из различных материалов / И.Е. Адеянов, М.Ю. Александрова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, – 2023. – Т. 25. – № 4 (2). – С. 203–208.
3. Бруйка, В.А. Инженерный анализ в Ansys Workbench: Учебное пособие / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Я.В. Кураева. Самара: Самарский государственный технический университет, 2013. – 148 с.

FINITE ELEMENT COMPUTER SIMULATION OF IMPACT TESTING

© 2024 I.E. Adeyanov, M.Yu. Alexandrova

Samara State Technical University, Samara, Russia

Impact testing can be useful in a variety of applications including automotive, aviation, construction, defense and many others. They help determine how well a material or design can withstand impact loads and can help develop safer, more reliable products. Impact testing can be carried out in a variety of ways, including the use of special impact machines that create controlled shock loads, or by simulating real-life conditions such as collisions or explosions. Impact tests were carried out using a pendulum impact testing machine MK-15, and then a computer model was created to conduct virtual experiments. The results of full-scale experiments and numerical calculations are presented in the presented work.

Key words: notch impact strength, pendulum impact testing machine, stress-strain state, computer simulation, finite elements method.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-237-243

EDN: HURBPO

REFERENCES

1. *Dedov, N.I.* Soprotivlenie materialov: Laboratornyj praktikum na baze kompleksa / N.I. Dedov, I.E. Adeyanov, N.G. Sarbatov, M.YU. Aleksandrova, V.N. Isutkina, A.E. Gorbunov. – Samara: Samarskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2016. – 114 s.
2. *Adeyanov, I.E.* Issledovanie udarnogo otklika sotovoj konstrukcii s tonkimi obshivkami iz razlichnyh materialov / I.E. Adeyanov, M.YU. Aleksandrova // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, – 2023. – T. 25. – № 4 (2). – S. 203–208.
3. *Bruyaka, V.A.* Inzhenernyj analiz v Ansys Workbench: Uchebnoe posobie / V.A. Bruyaka, V.G. Fokin, YA.V. Kuraeva. Samara: Samarskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2013. – 148 s.