

ИССЛЕДОВАНИЕ СХОДИМОСТИ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРОБИТИЯ КОМПОЗИТНОЙ ПЛАСТИНЫ ЖЁСТКИМ ИНДЕНТОРОМ

Ерохин Г.Ю., Крюкова Я.С.

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Ключевые слова: баллистическая стойкость многослойной пластины, упрощённая модель Джонсона-Кука, моделирование динамического деформирования в LS-DYNA, алюминиевый сплав Д16Т, титановый сплав ВТ-5, анализ сходимости конечно-элементной сетки.

Аннотация. В данной работе была проведена оценка влияния расположения пластин из Д16Т и ВТ-5 в пакете на изменение скорости жёсткого индентора после его пробития. Расчёт производился в программном комплексе LS-DYNA, с использованием упрощённой модели Джонсона-Кука. Так же была обоснована сходимость численного решения.

INVESTIGATION OF THE CONVERGENCE OF THE NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEM OF PIERCING A COMPOSITE PLATE WITH A RIGID INDENTER

Erokhin G.Yu., Kryukova Ya.S.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Keywords: ballistic resistance of a multilayer plate, simplified Johnson-Cook model, dynamic deformation modeling in LS-DYNA, D16T aluminum alloy, VT-5 titanium alloy, FEM mesh convergence analysis.

Abstract. In this work, the effect of the location of D16T and VT-5 plates in the package on the change in the speed of a rigid indenter after its penetration was evaluated. The calculation was performed using the LS-DYNA software package and a simplified Johnson-Cook model. The convergence of the numerical solution was also justified.

Расчёт баллистической стойкости многослойного пакета является ключевой задачей при проектировании средств защиты. Численное моделирование позволяет с меньшими затратами, по сравнению с натурными испытаниями, оценивать влияние таких факторов, как свойства материалов, толщины и порядок слоёв. Достоверность результатов моделирования критически зависит от корректности выбора конечно-элементной сетки [1]. Целью данной работы является оценка влияния порядка расположения пластин в пакете (Д16Т и ВТ-5) на сопротивление пробитию жёстким индентором с предварительным исследованием сходимости решения по густоте сетки.

Моделирование выполнено в LS-DYNA. Индентор с острым наконечником задан как абсолютно жёсткое тело с начальной скоростью 750 м/с. Две пластины размером 100×100 мм из сплавов Д16Т (2,9 мм) и ВТ-5 (1,4 мм) были полностью закреплены по краям.

Для моделирования поведения материалов использовалась упрощённая модель Джонсона-Кука [2], с уравнением:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^{p^n})(1 + C \cdot \ln \varepsilon^*),$$

где A , B , C и n – входные константы; $\bar{\epsilon}^P$ – эффективная пластическая деформация; $\dot{\epsilon}^* = \bar{\epsilon}^P / \epsilon_0$ – скорость эффективной деформации при $\epsilon_0 = 1s^{-1}$.

Температурное разупрочнение не учитывалось. Разрушение моделировалось по критерию пластической деформации. Коэффициенты взяты из публикации Gordon R. Johnson, William H. Cook [3].

Исследование включало два этапа. На первом этапе анализировалась сходимость решения при конфигурации "ВТ-5 → Д16Т" при варьировании количества конечных элементов (КЭ) по толщине пластин (9, 18, 36, 72, 144 элементов). Также, для обеспечения точности моделирования в области контакта "индентор-пластина" и "пластина-пластина" было выполнено локальное уплотнение конечно-элементной сетки (рис. 1).

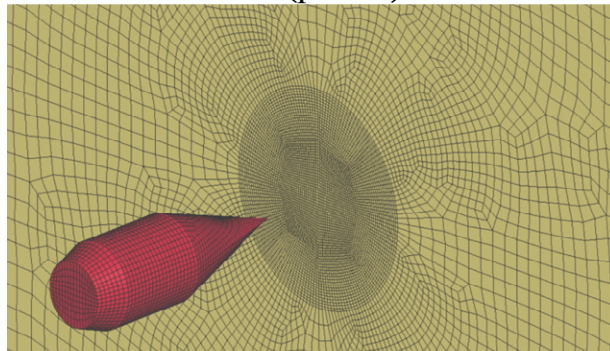


Рис. 1. Локальное уплотнение конечно-элементной сетки

Критерием сходимости была стабилизация остаточной скорости индентора. На втором этапе при оптимальной сетке исследовалось влияние порядка пластин: конфигурация А (Д16Т → ВТ-5) и конфигурация В (ВТ-5 → Д16Т). Результаты анализа сходимости сетки для конфигурации "ВТ-5 → Д16Т" представлены на рисунке 2.

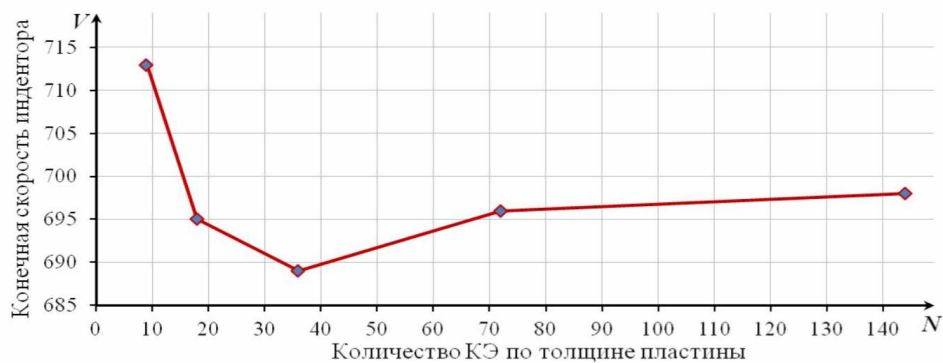


Рис. 2. Зависимость изменения скорости V индентора от количества КЭ N по толщине пластин

На основании анализа линии тренда было установлено, что оптимальное количество элементов по толщине составляет 18, поскольку данная густота сетки соответствует точке перехода к асимптотическому поведению и обеспечивает приемлемую точность результатов при разумных вычислительных затратах. Дальнейшее увеличение густоты сетки до 36-144 элементов не приводит к существенному изменению результатов, увеличивая при этом время расчёта.

На основе выбранной сетки были проведены расчёты для двух конфигураций пакета. Результаты представлены в таблице 1.

Табл. 1. Сравнительные результаты для разных конфигураций пакета

Конфигурация	Остаточная скорость (м/с)
ВТ-5 → Д16Т	695
Д16Т → ВТ-5	686

Сравнительный анализ показал, что конфигурация **А (Д16Т → ВТ-5)** является более эффективной. **Остаточная скорость индентора в данном случае на 9 м/с меньше, чем у конфигурации В.** Это различие объясняется механизмом взаимодействия: пластина Д16Т, расположенная первой, эффективно поглощает и рассеивает кинетическую энергию индентора за счёт значительной пластической деформации, подготавливая её к остановке более твёрдой и прочной пластиной ВТ-5. В обратном порядке (конфигурация В) тонкая пластина ВТ-5 не успевает поглотить достаточное количество энергии, разрушаясь хрупко, в результате чего основная нагрузка ложится на пластину Д16Т, пробиваемую с более высокой скоростью.

Список литературы

1. Павлюченко А.Н., Воротилин М.С., Потockий С.В., Громов А.А., Ишков А.С. Экспериментальные и численные исследования по оценке пробития баллистических защитных пластин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – №4. – С. 159-163.
2. LS-DYNA® Keyword user's manual volume II Material Models August 2012 Version 971 R6.1.0 Livermore Software Technology Corporation (LSTC).
3. Johnson G.R., Cook W.H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures // Proceedings 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, 19-21 April 1983, pp. 541-547.

Сведения об авторах:

Ерохин Георгий Юрьевич – студент;

Крюкова Яна Сергеевна – к.т.н., доцент кафедры «Прочность Летательных Аппаратов».