

Л.В. Автономова, Э.А. Симсон, Д.С. Ягудин

ОЦЕНКА КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОЧНОСТИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Исследовано напряженно-деформированное состояние обрабатывающего инструмента при динамическом нагружении. Рассматривается динамическая упруго-пластическая краевая задача для двух вариантов локализации ударного нагружения на конструкцию: удар рабочего фронтального и наклонного навесного элемента инструмента о препятствие. Численно контактная задача решалась методом конечного элемента на программном комплексе ANSYS. Анализ полей распределения эквивалентных напряжений в обрабатывающем инструменте при действии ударного нагружения показал, что в навесном рабочем элементе и в несущей конструкции возникают пластические деформации, которые не допустимы. С целью улучшения прочностных характеристик обрабатывающего инструмента предложено изменить геометрию его навесного рабочего элемента.

Ключевые слова: конструктивная прочность, обрабатывающий инструмент, ударное воздействие, упруго-пластическое деформирование, несущая конструкция, метод конечных элементов.

Введение. При проектировании обрабатывающего инструмента, предназначенного для обработки различных физических сред и представляющего собой составную конструкцию сложной геометрической формы с навесными рабочими элементами, оценка прочности является актуальной задачей, т.к. при динамических перегрузках возможно возникновение опасных зон разрушения. Навесные рабочие элементы инструмента в виде трехмерного каркаса могут быть подвержены ударному воздействию. Для определения напряженно-деформированного состояния обрабатывающего инструмента необходимо рассматривать упруго-пластическую мульти-контактную задачу. При решении краевой нестационарной упругопластической задачи учитывается, что отдельные части инструмента изготовлены из разнородного материала. Таким образом учитываются разные пределы текучести при учете билинейного кинематического упрочнения материалов. В качестве критерия прочности используются максимальные эквивалентные напряжения.

Анализ исследований и литературы. Наиболее нагруженным элементом при эксплуатации обрабатывающих систем для сравнительно низких скоростей нагружения является обрабатывающий инструмент. При этом может происходить его многократное пластическое деформирование, приводящее к малоцикловому усталостному разрушению [1]. Основным фактором, влияющим на этот процесс, являются характер нагружения. Наиболее опасным является периодическое ударное нагружение. Расчетам на прочность при ударном воздействии на различные конструкции посвящено достаточно много публикаций [2-7]. Исследованиям

ударного процесса для круглой пластины посвящена работа [2]. В работах [6-7] исследуется пластическое деформирование коробчатой конструкции при ударе ее жестким шаром. Особый интерес представляет решение мульти-контактных задач при ударном воздействии.

Целью данной статьи является изучение напряженно-деформированного состояния специализированного инструмента для обработки различных физических сред при ударном воздействии. В статье рассмотрены различные варианты локализации динамического воздействия и предложены рекомендации по устранению зон пластических деформаций.

Математическая постановка проблемы. Исследования нацелены на определение максимальных эквивалентных напряжений при ударе инструмента цилиндрическим телом. Система уравнений, которая описывает процесс взаимодействия движущегося упругого объекта с препятствием при ударе включает в себя уравнения кинематики (движения тел, закон сохранения импульса), механики контактного взаимодействия и пластического деформирования. При построении феноменологической расчетной схемы используются следующие упрощения:

- 1) материалы, используемые для отдельных элементов конструкции, имеют различные механические свойства;
- 2) динамический расчет проводится при низкой скорости движения инструмента (не учитываются волновые процессы);

В соответствии с принятыми допущениями математическая модель, которая описывает деформирование рассматриваемой системы, включает у

себя следующие уравнения и условия:

- 1) Закон сохранения импульса;
- 2) Уравнение баланса энергии;
- 3) Квазистационарные условия деформирования;
- 4) Система уравнений пластического деформирования (физические уравнения);
- 5) Уравнение состояния материала.

Параметры, определяющие процесс нагружения в области контактного взаимодействия могут быть описаны уравнением удара твердого тела по пластине (по Тимошенко) [2]:

$$v_0 t - (1/m) \int_0^t \int_0^{t_2} P(t_1) dt_1 = \varpi + \alpha, \quad (1)$$

где $v_0 t$ – перемещение, v_0 – скорость и m – масса шара, $P(t)$ – усилие в зоне контакта ϖ – перемещение и α – сжатие контактной зоны, причем $\alpha = kP^{2/3}$, $k = [2r^{1/2} E / 3(1-\nu^2)]^{2/3}$, где r – радиус шара.

Для пластического деформирования выбрано соотношение для билинейного упрочнения

$$\sigma_i > \sigma_i^* \left\{ 1 - \varpi(\varepsilon_i) \left[1 + (\partial \varepsilon / \partial t) / D \right]^{1/n} \right\}, \quad (2)$$

где $\varpi(\varepsilon_i) = 1 - cN\sigma_i / (E\varepsilon_i)$.

Обобщенное уравнение закона Гука для областей упругого деформирования:

$$\sigma_{ij} = E^* (\varepsilon_i + \nu^* \varepsilon_j) / (1 - \nu^2); \quad \tau_{ij} = G^* \gamma_{ij}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} E^* &= (\sigma_i / \varepsilon_i) / (1 + m\sigma_i / \varepsilon_i), \\ \nu^* &= (1/2 - m\sigma_i / \varepsilon_i) / (1 + m\sigma_i / \varepsilon_i); \quad G^* = \sigma_i / 3\varepsilon_i; \\ m &= (1 - 2\nu) / 3E \end{aligned} \quad (4)$$

дает значение прогиба в локальной зоне контакта и анализ напряженно деформированного состоянию в целом.

Уравнения в перемещениях:

$$(\lambda + \mu) \partial(\operatorname{div} u) / \partial x_i + \mu \Delta u_i = \rho \partial^2 u / \partial t^2, \quad (5)$$

где u – вектор перемещений, λ, μ – коэффициенты Ляме, ρ – плотность материала.

Начальные условия: $u = 0$, $\partial u / \partial t = v_0$; граничные: $u|_x = f_1[p(x, t)]$, $\partial u / \partial x|_x = f_2[p(x, t)]$. В результате решения системы уравнений можно определить нелинейный тензор деформаций

$$\varepsilon_{ij} = \partial u_i / \partial x_j + (\partial u_i / \partial x_j) * (\partial u_j / \partial x_i) \quad (6)$$

и соответствующих скоростей деформаций $\partial \varepsilon_i / \partial t$.

Уравнение состояния $\sigma_i(\varepsilon_i, \partial \varepsilon_i / \partial t)$ имеет вид:

$$\sigma_i = \sigma_s \left\{ \left[1 + (\varepsilon_i / a) \right]^{1/n} + \varepsilon_i / \varepsilon_s - \left[1 + (\partial \varepsilon_i / \partial t) / b \right]^{1/m} \right\}^m \quad (7)$$

где a, b, m, n, k – экспериментальные коэффициенты.

Компоненты тензоров напряжений определяются из уравнений динамической теории деформаций:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sigma_0 + 2\sigma_i(\varepsilon_i, \partial \varepsilon_i / \partial t) * (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_0) / 3\varepsilon_i \\ \tau_{ij} &= \sigma_i(\varepsilon_i, \partial \varepsilon_i / \partial t) * \gamma_{ij} / 3\varepsilon_i, \end{aligned} \quad (8)$$

где средние значения шаровых напряжений $\sigma_0 = \sigma_{ij} / 3$ и деформаций $\varepsilon_0 = K\sigma_0$.

Для реализации поставленной задачи использован программный комплекс Pro/ENGINEER, в котором построенная геометрическая объемная 3D модель обрабатывающего инструмента интегрируется в последующем в программный комплекс ANSYS Workbench. Расчет проводится в пакете Explicit Dynamics.

На рис.1 представлена 3D модель обрабатывающего инструмента.

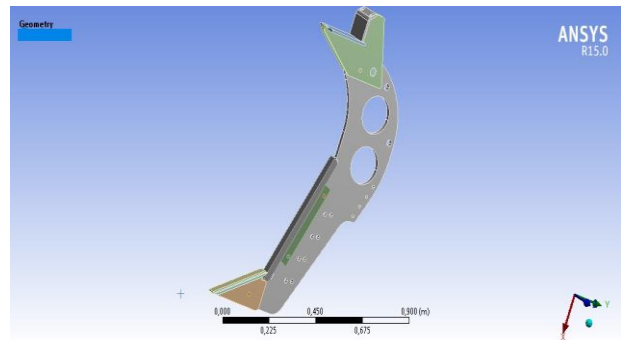
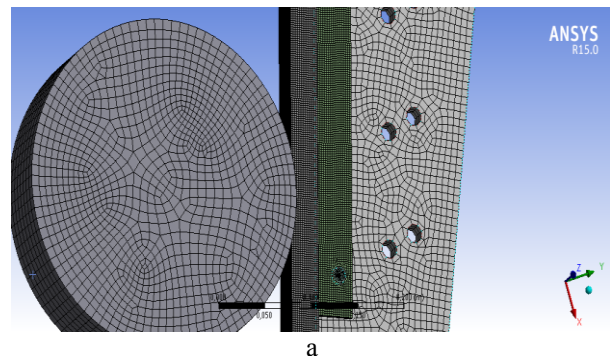


Рис. 1 – 3D модель обрабатывающего инструмента

Решение динамической упруго-пластической краевой задачи проводится для двух вариантов локализации ударного нагружения:

- 1) Удар фронтального навесного элемента о препятствие конечной массы;
- 2) Удар наклонного навесного элемента о препятствие конечной массы.

На рис. 2 (а, б) представлены конечно-элементные трехмерные модели для рассматриваемых двух вариантов удара обрабатывающего инструмента о препятствие.



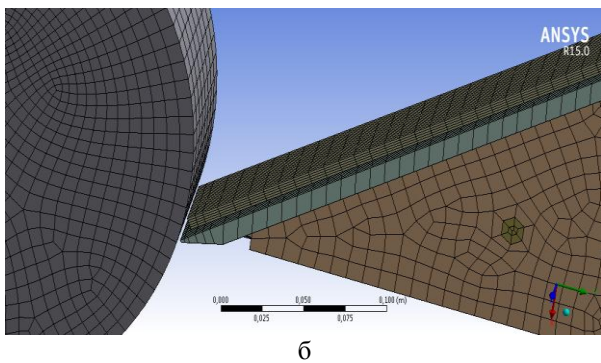


Рис. 2 – КЭ модель: а – для варианта 1, б – для варианта 2

Механические свойства материалов элементов обрабатывающего инструмента приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Механические свойства материалов

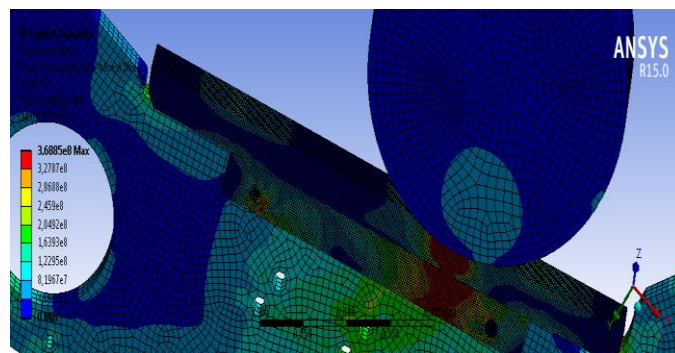
Параметр	Модуль упругости, Па	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, МПа	Модуль сдвига, МПа	Предел прочности, МПа	Плотность, кг/м ³
Материал 1	2.1*10 ¹¹	0.3	345	540	610	7850
Материал 2			280	450	530	

Результаты расчетов. Полученные результаты расчета напряженно-деформированного состояния составной конструкции обрабатывающего инструмента демонстрируют возникновение различных зон пластического деформирования в зависимости от локализации столкновения. В случае удара фронтальной навесной пластины наблюдается распространение значительных пластических напряжений в пластине и всей несущей конструкции, что свидетельствует о нарушении прочности обрабатываемого инструмента. Поэтому с целью устранения зон пластического деформирования была увеличена толщина защитной навесной пластины до 30 мм, которая позволяет обеспечить упругое состояние конструкции при ударе, в том числе, в месте крепления инструмента. Распределение эквивалентных напряжений в этом варианте показано на рис. 3: а) – в рабочем элементе, б) – в защитной пластине, в) – в несущей конструкции.

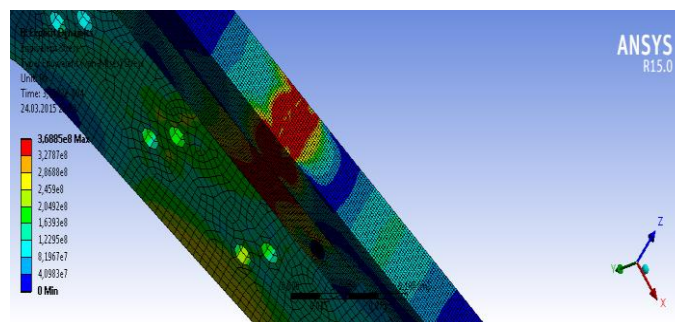
Для второго варианта ударного взаимодействия опасность возникновения пластических деформаций в инструменте отсутствует (см. рис. 4). В несущей конструкции область распространения пластических деформаций возникает в зоне изгиба (см. рис 5).

Поле распределения эквивалентных напряжений в пластине-накладке представлено на рис. 6. Пластические деформации в этой пластине появляются в зоне удара, однако их значение сравнительно невелико, и не приводит к существенным повреждениям и потере работоспособности обрабатывающего оборудования.

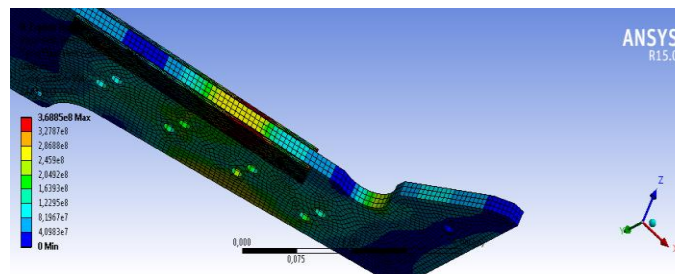
Выводы. Решение динамической контактной задачи при помощи программного комплекса ANSYS Workbench позволило исследовать напряженно-деформированное состояние обрабатывающего инструмента при ударном взаимодействии с преградой конечной массы (рис. 3-6). Полученные первоначальные поля распределения эквивалентных напряжений свидетельствуют о возникновении существенных пластических деформаций в несущей конструкции. Показано, что в случае удара навесного рабочего инструмента о преграду конечной массы, возникает риск возникновения пластических деформаций в зоне изгиба несущей конструкции. С целью улучшения прочностных характеристик обрабатывающего инструмента предложено изменить геометрию его навесного рабочего элемента.



а



б



в

Рис. 3: - Распределение эквивалентных напряжений при ударе фронтального навесного элемента: а – в рабочем элементе, б – в защитной пластине, в – в несущей конструкции

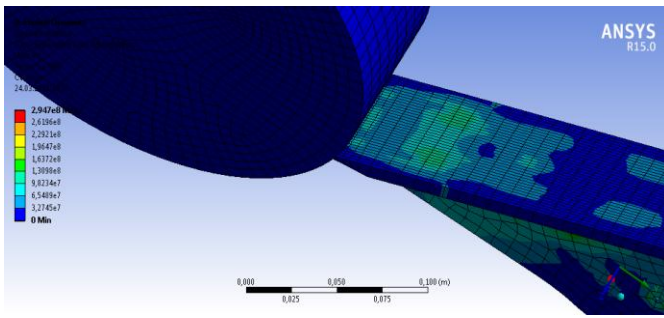


Рис.4 –Распределение эквивалентных напряжений при ударе наклонного навесного элемента

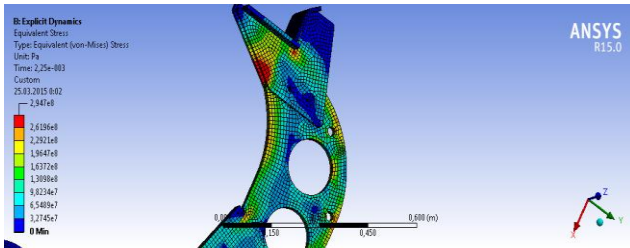


Рис. 5 - Распределение эквивалентных напряжений в зоне изгиба несущей конструкции

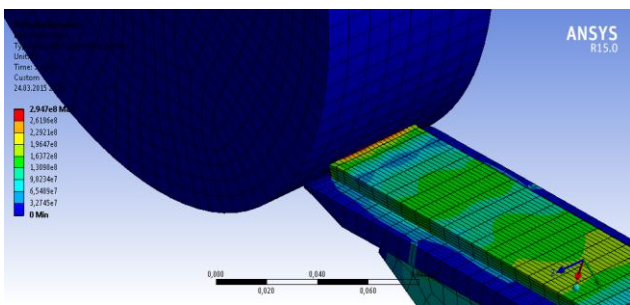


Рис. 6 – - Распределение эквивалентных напряжений в пластине.

Т.к. несущая конструкция должна иметь больший рабочий ресурс, чем навесные рабочие элементы, следовательно, предполагается, что в последних при уда-

ре могут допускаться незначительные пластические деформации, т.к. при дальнейшей эксплуатации они могут быть заменены.

Список литературы: 1.Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести / Г.С. Писаренко, Н.С. Можаровский // Киев, Наукова думка, 1981, 496 с. 2.Воробьев Ю.С., Чернобрыко М. В. Скоростное деформирование элементов конструкций в упругопластической стадии / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрыко // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій 2010, вип.14, с. 87-92. 3. Н. Fransplass, M. Langseth, O.S. Hopperstad Numerical study of the tensile behaviour of threaded steel fasteners at elevated rates of strain / International Journal of Impact Engineering, Volume 54, April 2013, Pages 19-30. 4.Леванов А.Н., Колмогоров В.Л., Буркин С.П. и др. Контактное трение в процессах / А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, С.П. Буркин // ОМД, Москва, 1976./ 352 с. 5. Степук О.В., Автономова Л.В., Бондар С.В. Особливості деформування П-подібної тонкостінної конструкції при ударі / Степук О.В., Автономова Л.В., Бондар С.В. //Вісник НТУ «ХПІ». Серія: . – X. : НТУ «ХПІ», 2013. – No . – С.5 . 6. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел / Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.7 Деформування П-подібної тонкостінної конструкції з ребрами жорсткості при ударі кулею / О.В. Степук, Л. В. Автономова, С.В. Бондар//Вісник НТУ «ХПІ». Серія: . – X. : НТУ «ХПІ», 2014. – No7 . – С.5 . – Библиогр.: 8 назв.

Bibliography (transliterated): 1.Pisarenko G.S., Mozharovskij N.S. *Uravneniya i kraevye zadachi teorii plastichnosti i polzuchesti*/ G.S. Pisarenko, N.S. Mazhorovskij Kiev, Naukova dumka, 1981, 496 p. Print. 2.Vorob'ev Ju.S., Chernobryvko M. V. *Skorostnoe deformirovanie jelementov konstrukcij v uprugoplasticheskoj stadii* Ju.S. Vorob'ev, M.V. Chernobryvko Problemi obchisljuval'noї mehaniki i micnosti konstrukcij. Kiev, 2010, Publ.14, pp. 87-92. Print. 3. H. Fransplass, M. Langseth, O.S. Hopperstad *Numerical study of the tensile behaviour of threaded steel fasteners at elevated rates of strain* International Journal of Impact Engineering, Volume 54, April 2013, pp 19-30. Print.. 4.Levanov A.N., Kolmogorov V.L., Burkin S.P. i dr, *Kontakt-noe trenie v processah* A.N. Levanov, V.L. Kolmogorov, S.P. Burkin OMD, Moscow, 1976. 352 p. 5. Stepuk O.V., Avtonomova L.V., Bondar S.V. *Osoblivosti deformuvannja P-podibnoi tonkostinnoi konstrukcii pri udari* Stepuk O.V., Avtonomova L.V., Bondar S.V. /Visnik NTU «HPІ». Serija: . – Kharkov. : NTU «KhPI», 2013. – No . – pp.5 . Print. 6. Korobejnikov S.N. *Nelinejnoe deformirovanie tverdih tel* Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2000. Print. 7. *Deformuvannja P-podibnoi tonkostinnoi konstrukcii z rebrami zhorstkosti pri udari kuleju* O.V. Stepuk, L. V. Avtonomova, S.V. Bondar Visnik NTU «KhPI». Serija: . – Kharkov. : NTU «KhPI», 2014. – No7 . – pp.5 . – Bibliogr.: 8 nazv. Print.

Поступила (received)28.03.2015

Автономова Людмила Владимировна – канд. техн. наук, ст. научн. сотр. НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78;
Симсон Эдуард Альфредович – академик ИАНУ, доктор техн. наук, проф. НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78;
Ягудин Дмитрий Сергеевич – аспирант, магистр. НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: dmitriy.yagudin27@gmail.com.