

ханіка та машинобудування. – 2012. – №2. – С. 230 – 249. 2. Симсон Э.А., Назаренко С.А. Математические модели элементов машин при воздействии физических полей и внешней среды // Механика та машинобудування. – 2009. – №1. – С. 69 – 77.

**Bibliography (transliterated):** 1. Aleksandrov, E. E., S. A. Nazarenko and V. L. Havin. "Dejatel'nost' osnovatelja otechestvennoj nauchnoj shkoly mehaniki i mashinostroeniya professora V. L. Kirpicheva." *Mehanika ta mashinobuduvannja*. No. 2. 2012. 230–249. Print. 2. Simson, E. A., and S. A. Nazarenko. "Matematicheskie modeli elementov mashin pri vozdeystvii fizicheskikh polej i vneshnej sredy." *Mehanika ta mashinobuduvannja*. No. 1. 2009. 69–77. Print.

*Поступила (received) 15.06.2015*

УДК 539

**Л.В. АВТОНОМОВА**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
**С.В. БОНДАРЬ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
**А.В. СТЕПУК**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРА ПЛАСТИНЫ ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМ ИНДЕНТОРОМ**

Рассмотрены задачи численного моделирования деформирования круглой пластины и пакета, который состоит из двух внешних стальных пластин и средней титановой пластины. Пластины подвергаются ударному воздействию индентора с полусферической формой рабочей части. При решении нестационарной связанной термовязкопластической контактной задачи в трехмерной постановке учитываются: трение в контактных зонах и зависимость предела текучести материала от скоростей деформаций и температуры. Динамическая контактная задача численно реализована методом конечных элементов с помощью пакета ANSYS. Выполнено сравнение параметров напряженно-деформированного состояния пластины и пакета пластин для двух моделей определяющих соотношений: Купера-Симонда и нейронной сети. Показано, что различия в полученных величинах перемещений и деформаций не превышают 15%.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, контактная задача, удар, вязкопластическое деформирование, конечный элемент.

**Описание проблемы.** При высокоскоростном деформировании пластин ударником необходимо учитывать появление больших пластических деформаций, изменение прочностных характеристик материала, зарождение и распространение повреждений, нагрев, процессы появления вторичной пластичности и релаксацию напряжений, волновые эффекты. На характер деформирования оказывают влияние геометрия и форма ударника, величина скорости ударника, конструктивные особенности пластин. Для комплексного решения таких задач необходимо применение совокупности различных нелинейных моделей, учитывающих физические особенности процесса [1 – 6]. Это, в частности, модели, позволяющие корректно описать динамическое изменение свойств материала в процессе высокоскоростного деформирования в зависимости от скорости деформаций и температуры, что дает возможность верифицировать численные решения по данным эксперимента. Часто даже применения современных численных методов решения краевых динамических задач с помощью вычислительных программных комплексов не позволяют в полной мере и без существенных допущений решать такие задачи. Так, луч-

шее качество численного решения такого рода задач достигается применением метода конечных элементов на основе альтернативного подхода Лагранжа – Эйлера.

Эффективными составляющими силовых конструкций являются элементы, включающие набор контактирующих пластин, поскольку при относительно небольшом весе они оказывают хорошее сопротивление динамическим нагрузкам. Повреждаемость пластин и нарушение их функционального назначения при эксплуатации в первом приближении можно характеризовать максимальной величиной прогибов, что позволяет не рассматривать затухающий колебательный процесс пластин при ударе.

**Постановка и численная реализация задачи.** Рассматриваются задачи моделирования процессов высокоскоростного деформирования тонкостенной изотропной пластины и пакета пластин, которые имеют однородную структуру, под действием ударного нагружения индентором с полусферической формой рабочей части. Для определения напряженно-деформированного состояния таких пластин решается динамическая вязкопластическая контактная задача с граничными и начальными условиями. При построении полной системы уравнений нестационарной связанной термовязкопластической задачи, приведенной в работах [4 – 6], описывающей данный процесс высокоскоростного деформирования и разрушения, необходимо дополнительно включить следующие уравнения.

Уравнение для накопления повреждения и предельной деформации, соответствующей наступлению вязкопластического разрушения по модели Джонсона-Кука:

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - \theta^*], \quad (1)$$

где  $\sigma^* = \sigma_0 / \bar{\sigma}$  – отношение интенсивностей гидростатических напряжений и эффективных напряжений;  $D_1 - D_4$  – экспериментальные константы;  $\dot{\varepsilon}^* = \varepsilon'_p / \varepsilon'_0$  – деформации;  $\theta^*$  – модифицированная температура.

Уравнение модели Грюнайзена, учитывающее поправку на изменение гидростатического давления для сжимаемых материалов:

$$P = \sigma_0 C^2 \mu_j [1 + (1 - \gamma_0 / 2) \mu_j^2 - a \mu_j^2 / 2] / [1 - (S_1 - 1) \mu_j - S_2 \mu_j^2 / (\mu_j + 1) - S_3 \mu_j^3 / (\mu + 1)^2]^2 + (\gamma_0 + a \mu_j) * E, \quad (2)$$

где  $P$  – гидростатическое давление;  $C, S_1, S_2, S_3$  – константы;  $\gamma_0$  – постоянная Грюнайзена;  $a$  – коррекция объема первого порядка;  $\sigma_0$  – начальная интенсивность гидростатических напряжений;  $\mu_0 = \sigma_Y / \sigma_0 - 1$ .

Уравнение учета скорости деформирования, по модели Купера-Симонда:

$$\sigma_Y = [1 + (\dot{\varepsilon}_{ij} / C)^{1/P}] * (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{eff}), \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  – начальная интенсивность гидростатических напряжений;  $C$  и  $P$  – параметры чувствительности к скорости деформирования модели Купера-Симонда;  $\varepsilon_p^{eff}$  – эффективные (эквивалентные) пластические деформации без учета влияния скорости деформирования;  $E_p$  – модуль пластического упрочнения, который задается соотношением  $E_p = GE / (E - G)$ ,  $G$  – модуль сдвига.

Кроме того, для сравнения с моделью Купера-Симонда при исследовании поведения пластины под действием ударного нагружения используется модель определяющих соотношений, полученная на нейронной сети для учета зависимости изменяющегося предела текучести материала от скоростей деформаций и температуры [7 – 9].

Численное моделирование процесса высокоскоростного деформирования круглой пластины, лежащей на жестко закрепленной матрице, при ударном воздействии упругим индентором проводилось методом конечных элементов с помощью программного вычислительного комплекса ANSYS.

На рис. 1 представлена расчетная схема. При построении конечноэлементной модели использовались 8-узловые конечные элементы, причём как кубической формы, так и в форме тетраэдра. Общее количество узлов составило 6769, элементов – 18205.

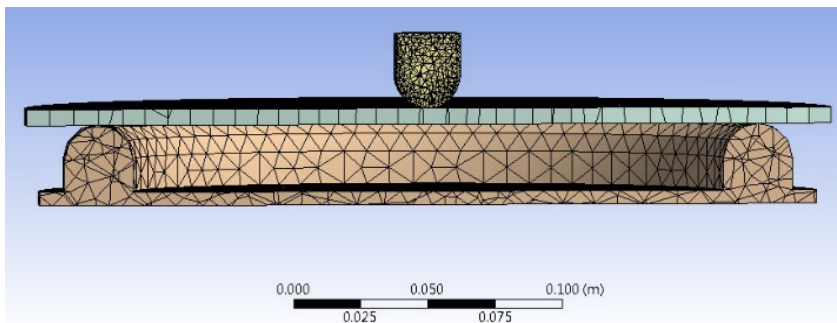


Рис. 1 – Конечно-элементная модель.

На рис. 2 представлено распределение пластических деформаций изотропной пластины при ударе полусферическим индентором (ударником). Следует отметить, что в случае применения модели, описывающей состояние материала при высокоскоростном деформировании нейронными сетями (рис. 2, а) уровни величин пластических деформаций в конце процесса деформирования меньше на 10 – 15%, чем в случае применения модели Купера-Симонда (рис. 2, б). Анализируя поведение материала можно предположить, что в первом случае он ведет себя как более «жесткий», поскольку при больших скоростях пластических деформаций использование нейронной сети дает более реальную картину изменения пластических свойств материала в зависимости от величины скорости деформирования. В случае применения модели Купера-Симонда (рис. 2, б) наблюдается вязкопластическое разрушение пластины при тех же уровнях ударного нагружения.

Для анализа деформирования пакета, состоящего из трех однородных пластин (материал верхней и нижней пластины – сталь, средней – титановый сплав), при высокоскоростном ударном нагружении также определялось его напряженно-деформированное состояние. Воздействие полусферическим упругим индентором (ударником) проводилось с той же силой, что и в предыдущем примере. Контактная задача решалась с учетом трения. Для описания состояния материалов при высокоскоростном деформировании была применена модель, построенная на основе нейронной сети.

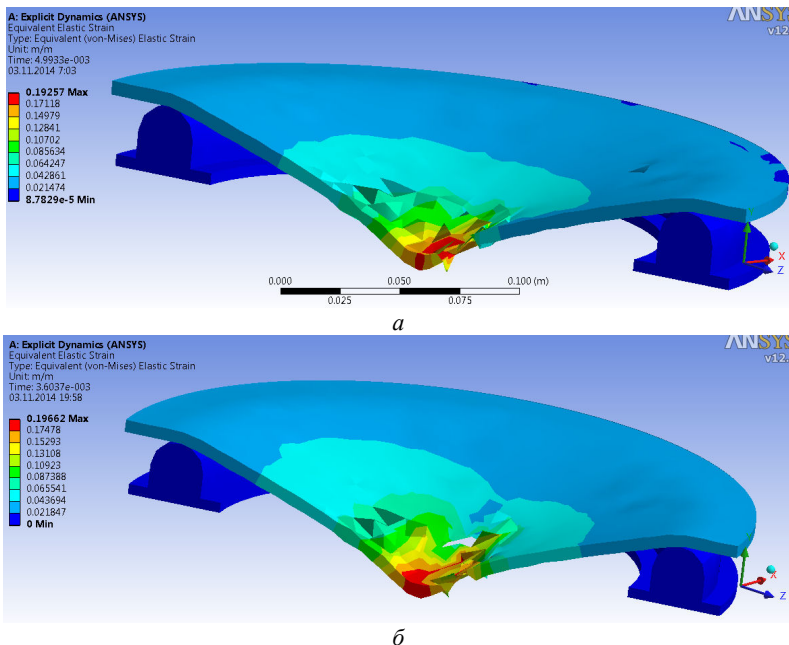


Рис. 2 – Распределение пластических деформаций при ударе изотропной тонкой пластины полусферическим индентором (*a* – модель нейронных сетей; *б* – модель Купера-Симона).

На рис. 3 представлено распределение полей перемещений и деформаций для пакета, состоящего из трех тонких пластин при взаимодействии с индентором в конце процесса ударного нагружения. Сравнивая распределения полей деформаций для однородной пластины (рис. 2, *a*) и для пакета (рис. 3, *б*) следует отметить, что полного разрушения по толщине для последнего не происходит. Наблюдается целостность материала для двух пластин (верхней и средней), происходит разрушение только нижней пластины, то есть процесс возникновения *ударного пробоя* не наступает. Это свидетельствует о более высокой прочности пластинчатого пакета.

**Выводы.** Для численного моделирования процесса высокоскоростного вязкопластического деформирования и разрушения тонкостенных пластин необходимо решать нестационарную связанную термовязкопластическую задачу с учетом зависимости свойств материала и трения от скорости деформаций и температуры. Применение подхода на основе метода конечных элементов и единого подхода ALE позволило определить напряженно-деформированные состояния однородной пластины и пакета из трех пластин при ударном воздействии полусферическим ударником. Проведенный анализ показал, что при ударном воздействии для определения параметров напряженно-деформированного состояния при решении термовязкопластической задачи целесообразно применять корректные определяющие соотношения для материала, например, полученные с помощью нейронной сети.

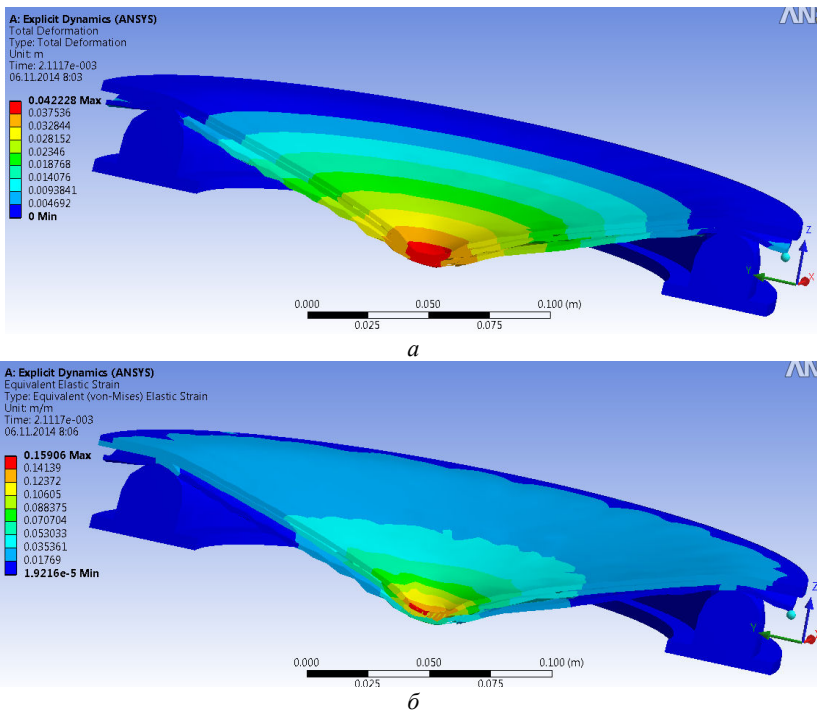


Рис. 3 – Распределение перемещений и пластических деформаций при ударе пакета пластин полусферическим индентором (*a* – поле перемещений, *б* – поле деформаций).

**Список литературы:** 1. Воробьев Ю.С., Чернобрышко М.В. Скоростное деформирование элементов конструкций в упругопластической стадии // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – 2010. – Вип. 14. – С. 87 – 92. 2. Бизюк А.В., Бизюк В.В., Колодяжний А.В. Скоростной удар по тонкостенным конструкциям // Вестник ХНУ ХПИ – 2007. – № 775. – С. 29 – 35. 3. Clegg R.A. Validation of an advanced material model for simulating the impact and shock response of composite materials / R.A. Clegg, C.J. Hayhurst, H. Nahme // Shock Compression of Condensed Matter. – American Institute of Physics. – 2002. – P. 685 – 688. 4. Стенук О.В., Автомонова Л.В., Бондарь С.В. Особливості деформування П-подібної тонкостінної конструкції при ударі // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 37 (1010). – С. 193 – 199. 5. Автомонова Л.В., Бондарь С.В., Стенук А.В. Деформирование П-образной тонкостенной конструкции с ребрами жесткости при ударе шаром // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 6 (1049). – С. 3 – 8. 6. Стенук А.В., Автомонова Л.В., Бондарь С.В. Влияние модели состояния материала на напряженно-деформированное состояние П-образной конструкции при ударе шаром // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. № 18 (1061). – 2014. – С. 161 – 166. 7. Sha W. The use of artificial neural networks in materials science based research / W. Sha, K.L. Edwards // Materials and Design. – 2007. – V. 28. – P. 1747 – 1752. 8. Guo Z. Modeling the correlation between processing parameters and properties of steels using artificial neural network / Z. Guo, W. Sha // Computational Materials Science. – 2004. – № 29. – P. 12 – 28. 9. Хавин В.Л., Огородник О.А. Модель пластического состояния материала для широкого диапазона температур и скоростей деформаций на основе нейронной сети // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2011. – № 52. – С. 202 – 209.

**Bibliography (transliterated):** 1. Vorob'ev, Ju. S., and M. V. Chernobryvko. "Skorostnoe deformatsionnoe jelementov konstrukcij v uprugoplasticheskoj stadii." *Problemy obchisljuval'noi*

*mehaniky i micnosti konstrukcij.* No. 14. 2010.87–92. Print. **2.** Bizjuk, A. V., V. V. Bizjuk and A. V. Kolodjazhnyj. "Skorostnoj udar po tonkostennym konstrukcijam." *Vestnik HNU «KhPI».* No. 775. 2007. 29–35. Print. **3.** Clegg, R. A., C. J. Hayhurst and H. Nahme. "Validation of an advanced material model for simulating the impact and shock response of composite materials." *Shock Compression of Condensed Matter.* American Institute of Physics. 2002. P. 685–688. Print. **4.** Stepuk, O. V., L. V. Avtomonova and S. V. Bondar. "Osoblyvosti deformuvannya P-podobnoi' tonkostinnoi' konstrukcii' pry udari." *Visnyk NTU «KhPI».* Ser.: *Matematychni modeljuvannya v tehnici ta tehnologijah.* No. 37 (1010). Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. 193–199. Print. **5.** Avtomonova, L. V., S. V. Bondar' and A. V. Stepuk. "Deformirovanie P-obraznoj tonkostennoj konstrukcii s rebrami zhestkosti pri udare sharom." *Visnyk NTU «KhPI».* Ser.: *Matematychni modeljuvannya v tehnici ta tehnologijah.* No. 6 (1049). Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. 3–8. Print. **6.** Stepuk, A. V., L. V. Avtomonova and S. V. Bondar'. "Vlijanie modeli sostojanija materiala na napryazhjonno-deformirovanoe sostojanie P-obraznoj konstrukcii pri udare sharom." *Visnyk NTU «KhPI».* Ser.: *Matematychni modeljuvannya v tehnici ta tehnologijah.* No. 18 (1061). Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. 161–166. Print. **7.** Sha, W., and K. L. Edwards. "The use of artificial neural networks in materials science based research." *Materials and Design.* Vol. 28. 2007. 1747–1752. Print. **8.** Guo, Z., and W. Sha. "Modeling the correlation between processing parameters and properties of maraging steels using artificial neural network." *Computational Materials Science.* Vol. 29. 2004. 12–28. Print. **9.** Havin, V. L., and O. A. Ogorodnik. "Model' plasticheskogo sostojanija materiala dlja shirokogo diapazona temperatur i skorostej deformacij na osnove nejronnoj seti." *Visnyk NTU «KhPI».* Ser.: *Dynamika i micnist' mashyn.* No. 52. Kharkiv: NTU «KhPI», 2011. 202–209. Print.

*Поступила (received) 27.05.2015*

УДК 628.477 : 519.876.5

**В.В. ВАМБОЛЬ**, канд. техн. наук, доц., НАУ «ХАИ», Харьков;  
**В.Е. КОСТЮК**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НАУ «ХАИ», Харьков;  
**Е.И. КИРИЛАШ**, мл. науч. сотр., НАУ «ХАИ», Харьков

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА В УСТАНОВКЕ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Рассмотрена проблема накопления твердых бытовых и производственных отходов, обоснована ее актуальность. Существенным недостатком предложенного способа ее решения – утилизация отходов способом смешанной газификации – является вторичное образование в газообразных продуктах этого процесса высокотоксичных веществ. Для решения этой проблемы предложен способ резкого охлаждения генераторного газа путем впрыскивания в его поток жидкости центробежными диспергирующими форсунками. Выполнено математическое описание процесса охлаждения генераторного газа в установке утилизации отходов жизнедеятельности. На основе классической теории газодинамики получены математические соотношения для описания газовой и дисперсной фазы, а также межфазного взаимодействия в процессе охлаждения.

**Ключевые слова:** утилизация, отходы, экологическая безопасность, диоксины, математическое моделирование, двухфазная многокомпонентная среда.

**Введение.** Накопление твердых бытовых и производственных отходов ведет к увеличению экологической нагрузки на окружающую среду. Процесс утилизации твердых бытовых и производственных отходов предполагает затраты, сопоставимые со стоимостью производства первичной продукции. Снизить эти затраты позволяет реализация системы управления экологической безопасностью, в основу которой положен способ смешанной газифи-

---

© В. В. Вамболь, В. Е. Костюк, Е. И. Кирилаш, 2015