

УДК 621.039.56

*С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, С.С.ГНУЧИХ, Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ КОМПОЗИТОВ СО СФЕРИЧЕСКИМ ТЕЛОМ**

Проведено компьютерное моделирование процесса ударного деформирования дисперсно-упрочненных композитных пластин, различной толщины, сферическим ударником. Защитные конструкции в машиностроении нуждаются в повышении ударной стойкости, при одновременном снижении материалоемкости. Рассматривалась задача контактного динамического деформирования пластины при больших скоростях протекания процесса. Компьютерное моделирование процесса проводилось специализированным программным комплексом ANSYS. Модуль "AUTODIN" основан на применении метода конечных элементов в условиях высоких скоростей и метода сглаженных частиц SPH. Анализ полученных данных показал высокую ударную прочность дисперсных композитных пластин.

Ключові слова: математическое моделирование, дисперсные композиты, метод сглаженных частиц SPH.

Проведено комп'ютерне моделювання процесу ударного деформування дисперсно-зміцнених композитних пластин, різної товщини, сферичним ударником. Захисні конструкції в машинобудуванні потребують підвищення ударної стійкості, при одночасному зниженні матеріаломісткості. Розглядалася задача контактного динамічного деформування пластины при великих швидкостях протікання процесу. Комп'ютерне моделювання процесу проводилося спеціалізованим програмним комплексом ANSYS. Модуль "AUTODIN" заснований на застосуванні методу кінцевих елементів в умовах високих швидкостей і методу згладжених частинок SPH. Аналіз отриманих даних показав високу ударну міцність дисперсних композитних пластин.

Ключевые слова: математичне моделювання, дисперсні композити, метод згладжених частинок SPH.

A computer simulation of the impact deformation dispersion-strengthened composite plates of different thicknesses, spherical drummer. Protective structure in engineering need to improve impact resistance, while reducing material consumption. We consider the problem of dynamic deformation of the contact plate at high speeds process flow. The simulation was conducted specialized software ANSYS complex. Module "AUTODIN" is based on the use of finite element method in high speed and the method of smoothed SPH particles. Data analysis showed a high impact strength dispersed composite plates.

Keywords: mathematical modeling, particulate composites, SPH method smoothed particle.

Введение. В современном машиностроении защитные изделия нуждаются в повышении ударной стойкости, при одновременном снижении материалоемкости. Они применяются в деталях машин и средствах защиты. Внимание исследователей привлекает проблема, моделирования процесса взаимодействия деформируемых, многослойных пластин конечной толщины с деформируемым ударником. Несмотря на большое внимание к данной проблеме и имеющиеся в литературе работы в этой области как экспериментального, так и теоретического плана, проблема далека от полного решения.

Целью данной работы являлось повышение ударной стойкости изделий машиностроения за счет использования дисперсно-упрочненных металлокомпозиционных материалов. Актуальность исследования обусловлена потребностью в прогнозировании деформации и разрушения деталей машиностроения при наличии в них композиционных материалов, в качественной оценке процесса разрушения таких деталей. Модификация существующих и создание новых композиционных материалов, включающих материалы с существенно различными свойствами.

Постановка проблемы. В настоящей работе мы рассматривали задачи моделирования процессов высокоскоростного деформирования тонкостенной пластины из дисперсного композита, под действием ударного нагружения ударником (СФТТ) со сферической формой рабочей части. При таком воздействии мы учитывали изменение прочностных характеристик материала, при наличии больших деформаций. Для этого было использовано компьютерное проектирование и моделирование образов исследуемых объектов на базе вычислительных логических алгоритмов САЕ-модуля ANSYS.

Материалы исследований. Компонентами композитов являются самые разнообразные материалы – металлы, керамика, стекла, пластмассы, углерод и т.п. Известны многокомпонентные композиционные материалы – полиматричные, когда в одном материале сочетают несколько матриц, или гибридные, включающие в себя разные наполнители [1]. Наполнитель определяет прочность, жесткость и деформируемость материала, а матрица обеспечивает монолитность материала, передачу напряжения в наполнителе и стойкость к различным внешним воздействиям.

Армирование дисперсных композитов происходит за счет включения в матрицу части другого материала. Армирующие частицы могут иметь произвольную геометрию, однако обычно предпочитают сферические, эллиптические, полиэдральные или сложные формы частиц, примеры иллюстрируются на рис.1.

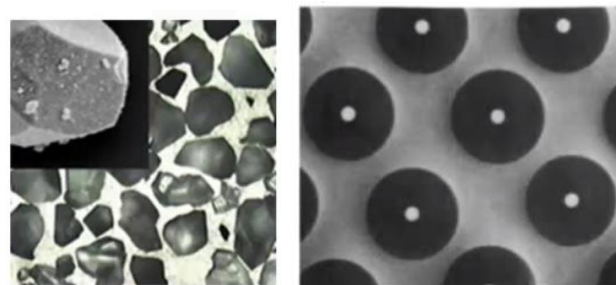


Рис. 1. – Виды дисперсных композитов

Микроструктура этих композиционных материалов характеризуется тем, что матрицу наполняют частицами армирующего вещества, а различаются они

© С.С. Добротворский, С.С.Гнучих, Л.Г. Добровольская, 2016

размерами частиц. В композитах, упрочненных частицами, их размер больше 1 мкм, а содержание составляет 20–25% (по объему), тогда как дисперсно-упрочненные композиты включают в себя от 1 до 15% (по объему) частиц размером от 0,01 до 0,1 мкм. Размеры частиц, входящих в состав нанокompозитов – нового класса композиционных материалов – еще меньше и составляют 10–100 нм.

Математическую модель, используемую в решателях ANSYSa, можно описать как задачу минимизации функционала энергии, или как решение вариационных уравнений равновесия [2]. Удельную потенциальную энергию деформации для единицы объема упругого тела, который направлен вдоль произвольно выбранной декартовой системы координат x, y, z , можно записать как:

$$W = \frac{1}{2} (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \varepsilon_{zz} + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx}) \quad (1)$$

Введем вектор напряжений $\{\sigma\}$ и вектор деформаций $\{\varepsilon\}$

$$\begin{aligned} \{\sigma\}^T &= \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}, \\ \{\varepsilon\}^T &= \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда выражение (2.1) переписывается в виде:

$$W = \frac{1}{2} \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} = \frac{1}{2} \{\sigma\}^T \{\varepsilon\}. \quad (3)$$

Накопленная телом потенциальная энергия деформации определяется как интеграл по всему объему тела V :

$$U = \iiint_V W dV = \frac{1}{2} \iiint_V \{\sigma\}^T \{\varepsilon\} dV. \quad (4)$$

Закон Гука можно записать через матрицу упругих постоянных $[D]$ в матричном виде:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\}. \quad (5)$$

Поэтому потенциальную энергию деформации запишем в виде:

$$U = \frac{1}{2} \iiint_V \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} dV. \quad (6)$$

Работу внешних сил так же можно записать в матричном виде. Введем для этого вектор перемещений:

$$\{\varrho\}^T = \{u, v, w\}, \quad (7)$$

где u, v, w - проекции вектора перемещений вдоль осей x, y, z .

Вектор массовых сил $\{Q\}$

$$\{Q\}^T = \{Q^{(x)}, Q^{(y)}, Q^{(z)}\}. \quad (8)$$

Вектор поверхностных сил $\{P\}$, который действует на части поверхности S_σ ,

$$\{P\}^T = \{P^{(x)}, P^{(y)}, P^{(z)}\} \quad (9)$$

С помощью введенных величин работа внешних сил запишется как:

$$A = \iiint_V \{Q\}^T \{\varrho\} dV + \iint_{S_\sigma} \{P\}^T \{\varrho\} dS. \quad (10)$$

Известно, что полная энергия системы определяется как:

$$L = U - A, \quad (11)$$

Окончательное выражение получим с учетом (6) и (10):

$$L = \frac{1}{2} \iiint_V \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} dV - \iiint_V \{Q\}^T \{\varrho\} dV - \iint_{S_\sigma} \{P\}^T \{\varrho\} dS. \quad (12)$$

Согласно общим теоремам механики, истинное состояние равновесия тела соответствует минимуму полной энергии, иначе говоря, задача сводится к нахождению векторов $\{\varrho\}$ и $\{\varepsilon\}$, $\{\sigma\}$, которые дают $\min L$. В данной вариационной задаче уравнениями Эйлера являются статические граничные условия и уравнения равновесия [2].

Эти закономерности и лежат в основе решателя AUTODYN. Для описания поведения дисперсной керамики будем использовать идеальную упруго - пластическую модель прочности Drucker-Prager [3] с параметрами представленными в таблице 1. Основа задавалась Aluminum Alloy. Для СФТТ задавался STEEL4340.

Таблица 1–Керамика по модели Drucker-Prager

Properties	Value	Size
Reference Density	3,43	g/cm ³
Bulk Modulus	1.54e+08	kPa
Reference Temperature	300	K
Drucker-Prager		
Shear modulus	8.3e+07	kPa
Pressure 1	-5.0e+05	kPa
Pressure 2	0	kPa
Pressure 3	1.01e+20	kPa
Pressure 4	1.01e+20	kPa
Yield Stress 1	0	kPa
Yield Stress 2	3.8e+06	kPa
Yield Stress 3	3.8e+06	kPa
Yield Stress 4	3.8e+06	kPa
Cumulative Damage		
Eff/ 0Damage	Pl. Strain at	0.01
Eff/ MaxDamage	Pl. Strain at	0.03
Maximum Damage		0.7

Для моделирования керамики использовался бессеточный Лагранжевый метод (метод сглаженных частиц SPH) [4]. Эти решатели представляют наиболее точный и эффективный метод расчета нелинейных задач динамического нагружения конструкций. Однако в случаях больших деформаций, которые мы наблюдаем при моделировании керамики, данный метод может привести к чрезмерному искажению расчетной сетки, потере точности и разрушения численного решения. Именно поэтому для расчета деформаций и разрушения керамики использовался бессеточный Лагранжевый метод. Этот метод обеспечивает надежное решение для задач высокоскоростного взаимодействия и фрагментации хрупких материалов [5-6]. Данный метод позволяет производить расчеты при больших деформациях при сохранении преимуществ Лагранжевого подхода. Однако данный метод

требует более высоких затрат компьютерного времени. Пластина, была заполнена частицами с характерными размерами 0.05мм. Пластины заполнены более 50000 элементами, этот параметр варьировался в зависимости от размера пластины.

На модель воздействовало СФТТ со скоростью 700м/с. Пластина фиксировалась Flexid Support по контуру. Общее время расчета составлялось 0,05 сек.

Результаты исследования. В результате исследований были получены данные представленные на рисунке 2-5. Анализ полученных результатов показал, что пластины с дисперсным наполнителем менее подвержены разрушению, при ударном взаимодействии. И при аналогичных начальных условиях выдерживают удар при меньших толщинах, что экономит вес и габариты изделий.

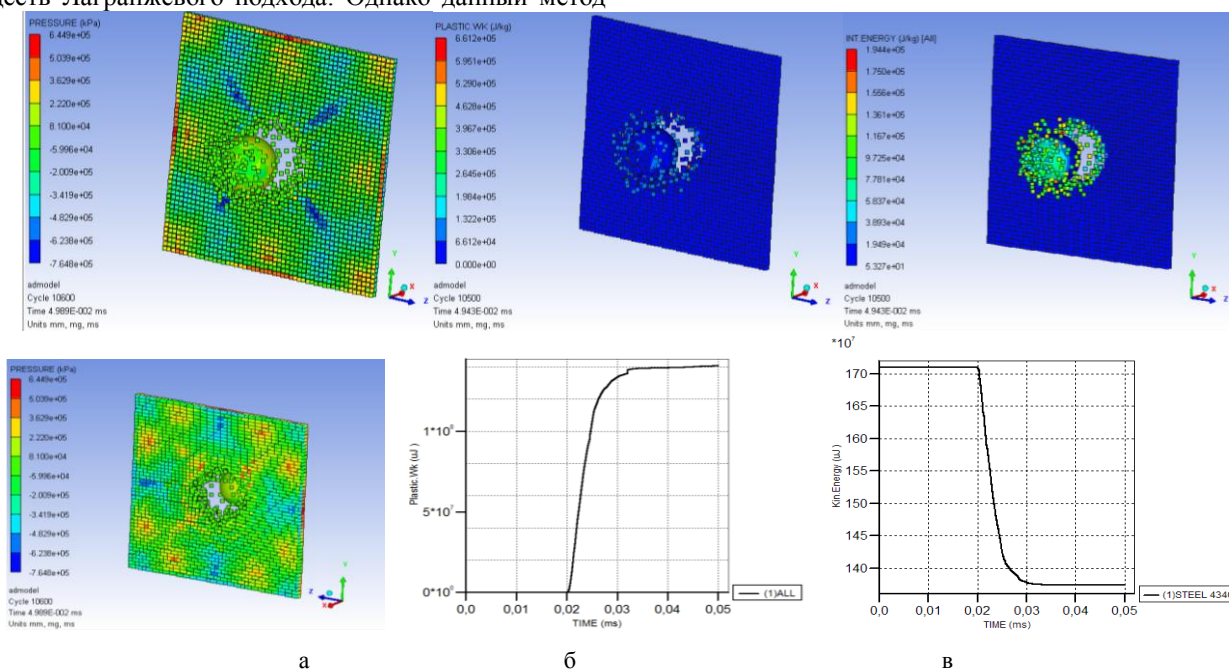


Рис. 2 – Дисперсно-армированная композитная пластина толщиной 1 мм: а – распределение давления, б – распределение Plastic.wk, в – распределение энергии

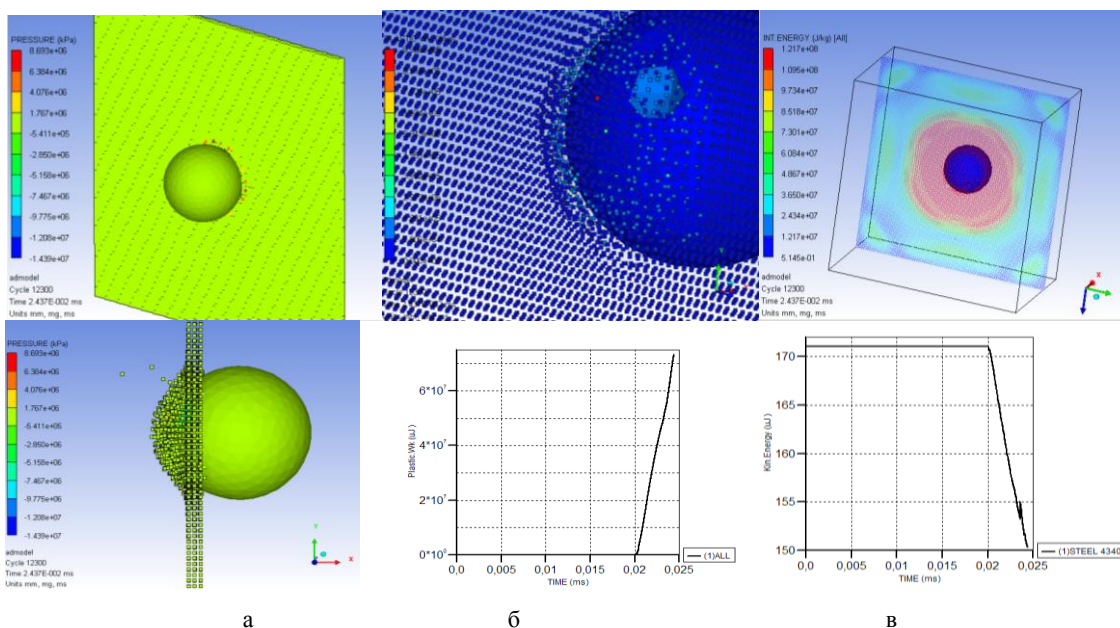


Рис. 3 – Дисперсно-армированная композитная пластина толщиной 1.5 мм: а – распределение давления, б – распределение Plastic.wk, в – распределение энергии

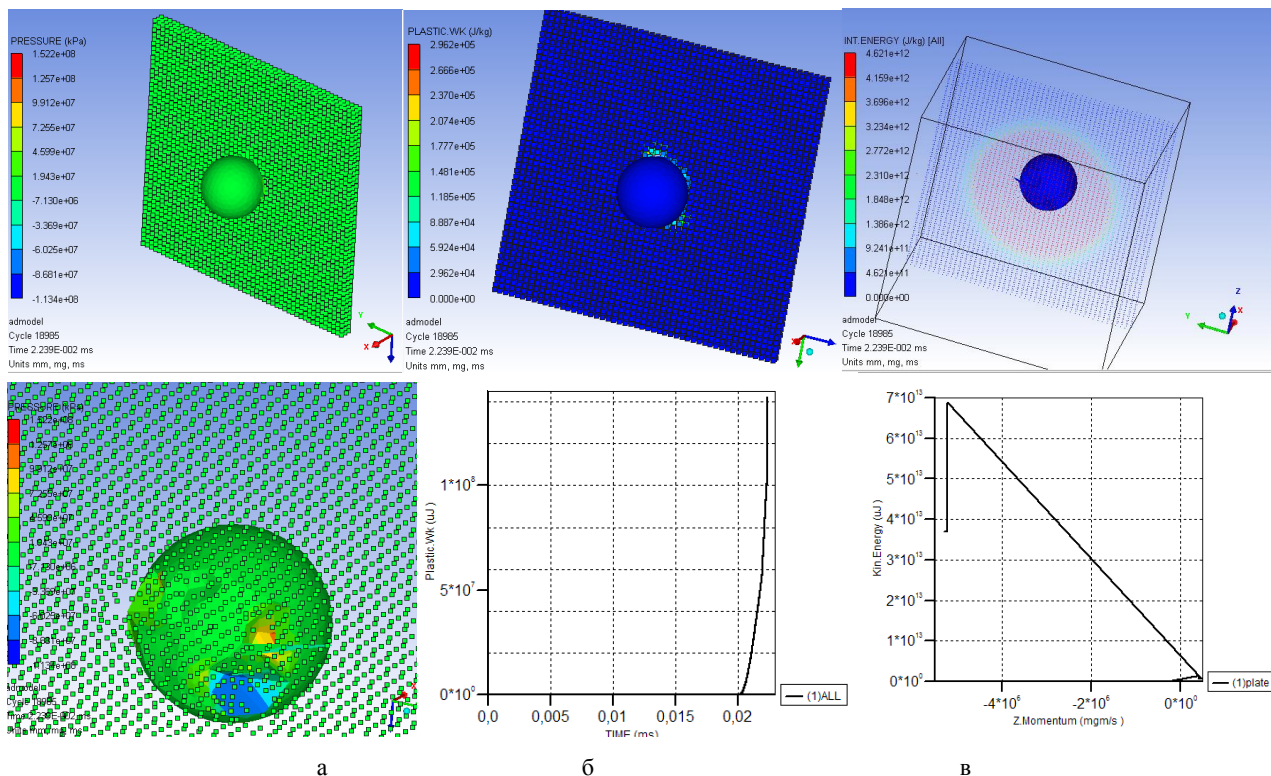


Рис. 4 – Дисперсно-армированная композитная пластина толщиной 3 мм:
 а – распределение давления, б – распределение Plastic.wk, в – распределение энергии

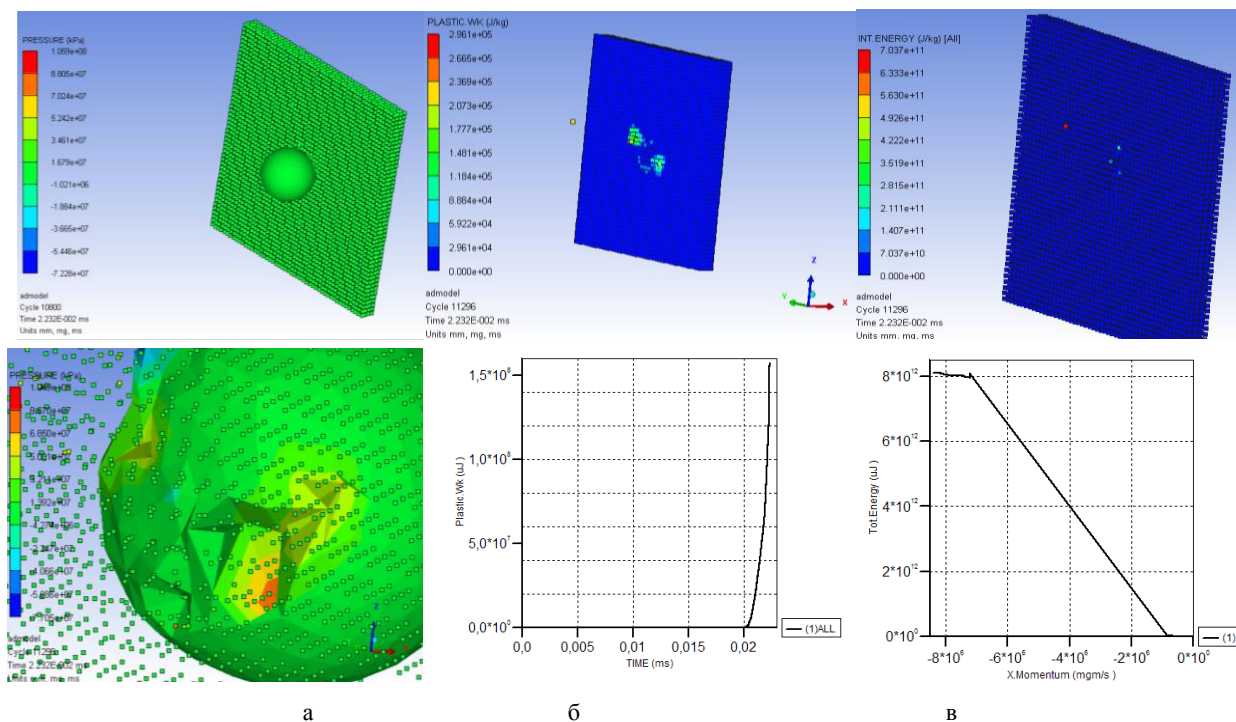


Рис. 5 – Дисперсно-армированная композитная пластина толщиной 4 мм.
 а – распределение давления, б – распределение Plastic.wk, в – распределение энергии

Выводы. В ходе работы был разработан алгоритм инженерных расчетов процесса высокоскоростного ударного взаимодействия дисперсно-упрочненных пластин со сферическим ударником. Рассмотрены результаты численного моделирования высокоскоростного ударного взаимодействия СФТТ и пластины. Получены зависимости распределения да-

вления, plastic.wk, энергии в пластинах различной толщины.

Для моделирования ударного взаимодействия СФТТ и пластины с дисперсными включениями был использован бессеточный Лагранжевый метод, реализованный в подсистеме AUTODYN. Достоверность полученных результатов обеспечивается: корректностью постановок задач, выбором в каждом

конкретном случае адекватной расчетной сетки, обеспечивающей сходимость решения, контролем в процессе численного счета выполнения законов сохранения.

Результаты моделирования позволяют сделать заключение, что пластины с дисперсным наполнителем менее подвержены разрушению, при ударном взаимодействии. И в аналогичных начальных условиях выдерживают удар при меньших толщинах, что экономит вес и габариты изделий.

Список литературы

1. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. - СПб.: Научные основы и технологии, 2008. - 660 с.
2. Бате Н., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. - М.: Стройиздат, 1982. - 448 с.
3. Russell J., Cohn R. Drucker-Prager yield criterion. - 978-5-5146-7452-7, 2013. -102 p.
4. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимации. - М.: Мир, 1986. - 460 с.
5. Ravid M., Bodner S.R., Chochron I.S. Penetration analysis of ceramic armor with composite material backing // Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics. - Interlaken, Switzerland, 2001.
6. Добротворський С. С. Комп'ютерне проектування та моделювання технологічних процесів високошвидкісного фрезерування загартованих сталей / С. С. Добротворський, Є. В. Басова та ін.

// Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні: збірник наукових праць. - 2015. - № 822. - С. 7-13.

Bibliography (transliterated)

1. Михайлин Ю.А. Spetsial'nyye polimernyye kompozitsionnyye materialy. - SPb.: Nauchnyye osnovy i tekhnologii, 2008. - 660 p.
2. Bate N., Vil'son E. Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov. - M.: Stroyizdat, 1982. - 448 p.
3. Russell J., Cohn R. Drucker-Prager yield criterion. - 978-5-5146-7452-7, 2013. -102 p.
4. Zenkevich O., Morgan K. Konechnyye elementy i approksimatsii. - M.: Mir, 1986. - 460 p.
5. Ravid M., Bodner S.R., Chochron I.S. Penetration analysis of ceramic armor with composite material backing // Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics. - Interlaken, Switzerland, 2001.
6. Dobrotvorskiy S.S., Basova E.V., et al. Komp'yuternye proektuvannya ta modelyuvannya texnologichny'x procesiv vy sokoshvy'dkiskogo frezeruvannya zagartovany'x [Computer design and simulation processes high-speed milling hardened steels] *Visnyk Nacional'nogo universytetu «Lviv'ska politexnika». Seriya: Optymizatsiya vyrobny'chy'x procesiv i texnichny'j kontrol' u mashynobuduvanni ta pry'ladobuduvanni : zbirnyk naukovy'x prac'.* 2015. No 822. pp. 7-13.

Поступила (received) 12.09.16

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделирование процесса высокоскоростного соударения дисперсных композитов со сферическим телом / С.С. Добротворский, С.С. Гнучих, Добровольская Л.Г. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. - Х.: НТУ «ХПІ», 2016. - № 33 (1205) - С. 24-28. - Бібліогр.: 6 назв. - ISSN 2079-004X.

Моделювання процесу високошвидкісного зіткнення дисперсних композитів зі сферичним тілом / С.С. Добротворський, С.С. Гнучих, Л.Г. Добровольська // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. - Х.: НТУ «ХПІ», 2016. - № 33 (1205) - С. 24-28. - Бібліогр.: 6 назв. - ISSN 2079-004X.

Simulation of the process of high-speed collision of disperse composites with a spherical body / S.S. Dobrotvorskiy, S.S. Gnuchih, L.G. Dobrovolska // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. - No 33 (1205). - P. 24-28. - Bibliogr.: 7. - ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Добротвірської Сергій Семенович - доктор технічних наук, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: sdbro@mail.ru.

Добротворський Сергій Семенович - доктор технических наук, профессор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: sdbro@mail.ru.

Dobrotvorsky Sergey Semenovich - Doctor of Technical Sciences, Professor of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: sdbro@mail.ru.

Гнучий Сергій Сергійович - аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

Гнучих Сергій Сергеевич - аспирант Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

Gnuchev Sergey Serhiyovych - postgraduate of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

Добровольська Людмила Георгіївна - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

Добровольская Людмила Георгиевна - кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

Dobrovolskaya Lyudmila Georgiyevna - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.