

С.П. БІСИК, А.В. ШИРОКОВ, О.А. СЛИВІНСЬКИЙ, О.М. АРИСТАРХОВ

ВИЗНАЧЕННЯ УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ СТАЛІ WELDOX 460-E ЗА ДОПОМОГОЮ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Представлено результати чисельного моделювання ударного згину за Шарпі для сталі Weldox 460-E за допомогою програми LS-DYNA. Розрахунки проведено для двох широкоживаних моделей поведінки матеріалів за умов динамічного навантаження: Джонсона-Кука і Купера-Саймондса. Оцінено можливість використання літературних коефіцієнтів для вищезазначених моделей без оптимізації під конкретний вид навантаження. Показано необхідність врахування швидкості деформації при розрахунках динамічних процесів. Проведено оцінку точності розрахункової моделі з використанням додаткових критеріїв руйнування, що дозволяють значно підвищити точність рішення.

Ключові слова: ударна в'язкість, швидкість деформації, моделювання, LS-DYNA

С.П. БИСЫК, А.В. ШИРОКОВ, А.А. СЛИВИНСКИЙ, О.М. АРИСТАРХОВ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СТАЛИ WELDOX 460-E С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Представлены результаты численного моделирования ударного изгиба по Шарпи для стали Weldox 460-E с помощью программы LS-DYNA. Расчеты проводили для двух широкоиспользуемых моделей поведения материалов при динамическом нагружении: Джонсона-Кука и Купера-Саймондса. Оценена возможность использования литературных коэффициентов для вышеупомянутых моделей без оптимизации под конкретный вид нагружения. Показана необходимость учета скорости деформации при расчетах динамических процессов. Проведено оценку точности расчетной модели с использованием дополнительных критериев разрушения, что позволяет значительно повысить точность решения.

Ключевые слова: ударная вязкость, скорость деформирования, моделирование, LS-DYNA

S.P. BISIYK, A.V. SHIROKOV, O.A. SLYVINSKYI, O.M. ARISTARXOV NUMERICAL MODELING OF IMPACT TOUGHNESS DETERMINATION OF WELDOX 460-E STEEL

The results of numerical modeling of a Charpy impact test for steel Weldox 460-E with LS-DYNA program using are presented. The simulation carried out for two widely known models of material behavior at dynamic loading. These are Johnson-Cook and Cowper-Symonds models. The possibility of literary coefficients using for above-mentioned models without optimization to a necessary loading condition is estimated. The necessity of strain rate accounting in dynamic processes numerical simulation is shown. The accuracy appraisal of design model with usage additional resolution criteria which allows significantly to increase accuracy of solution were carried out. The results of numerical modeling conduction proved its qualitative character. The disarrangement in 39,6% don't allow us to advise to use experimental characteristics from literature without their optimization in accordance with certain type of load. Although, the difference value is 4,8% in case of introduction of additional resolution criterion with maximum magnitude of strains, that's point out the necessity of experimental tests of materials and definition of its limit values of resolution under different velocities of deformation and use of these values during performance of numerical modeling. Cowper-Symonds model showed much better convergence while performing modeling of this experiment. It could be related to low values of deformation velocity (level 10^2 c^{-1}) in experiments on impact strength.

Keywords: impact toughness, strain rate, modeling, LS-DYNA

Вступ. Використання методів чисельного моделювання для задач високошвидкісного нелінійного деформування матеріалів дозволяє уникнути недоліків натурних випробувань і є одним з найбільш ефективних способів оцінки міцності, прогнозування стійкості й оптимізації конструкцій при ударних навантаженнях.

Саме тому, враховуючи сучасні можливості комп'ютерної техніки, все частіше вдаються до проведення чисельних експериментів, в тому числі при дослідженні динамічних процесів.

Зазвичай спочатку експериментально визначають параметри моделі поведінки матеріалу і на основі цих даних проводять чисельне моделювання, результати якого мають не тільки якісне, а й кількісне співпадіння з експериментальними даними [1–6].

В той же час, в літературі недостатньо висвітлена можливість використання сторонніх параметрів моделі матеріалу без оптимізації під конкретний вид навантаження, що є важливим для оцінки межі їх застосування. Однією із значних проблем при дослідженні протимінної та балістичної стійкості бойових машин є використання достовірних експериментальних значень властивостей матеріалу при різних швидкостях деформації та застосування моделей матеріалів з відомими значеннями точності для конкретного випадку навантаження [7–21].

Метою статті є оцінка точності чисельного моде-

лювання з використанням відомих літературних параметрів для моделей матеріалів Джонсона-Кука і Купера-Саймондса.

Основна частина. Для дослідження був взятий стандартний тест на ударний згин за Шарпі. В літературі моделювання подібних експериментів було неодноразово проведено, наприклад, в роботах [6, 22].

В [22] показано, що кінетика розповсюдження тріщини у зразку Шарпі з двовірною (2D) моделлю дає завищені значення просування тріщини порівняно із тривірною (3D) моделлю і відзначається, що розмір скінченно-елементної сітки 50 мкм забезпечує достатню точність чисельного моделювання. Тому для підвищення точності результатів в даній роботі було обрано тривірну постановку задачі і розмір скінченно-елементної сітки 50 мкс.

Для чисельного моделювання застосовували пакет прикладних програм LS-Dyna який призначений для моделювання динамічних процесів [30]. На рис. 1 наведено алгоритм, за яким проводили чисельне моделювання.

На рис. 2. наведено побудовану геометричну модель з розмірами в мм. Розміри зразка, опор і ударника брали стандартні з [23, 24]. Ширина зразка складала

© С.П. Бісик, А.В. Широков,
О.А. Сливінський, О.М. Аристархов, 2019

8 мм, а площа перерізу в зоні удару $S_0 = 64 \text{ мм}^2$.

Далі геометричну модель розбивали на скінченні елементи, тобто будували скінченно-елементну модель (СЕМ) (рис. 3). З метою економії розрахункового часу та об'єму даних, що отримуються, згущення сітки виконували тільки у зоні вирізу зразка Шарпі та в області контакту зразка із опорами.

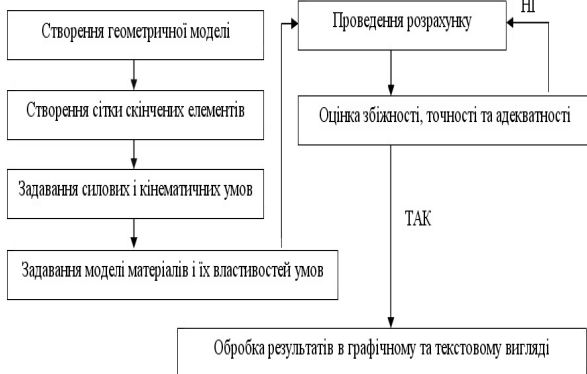


Рисунок 1 – Алгоритм проведення чисельного моделювання ударного згину за Шарпі

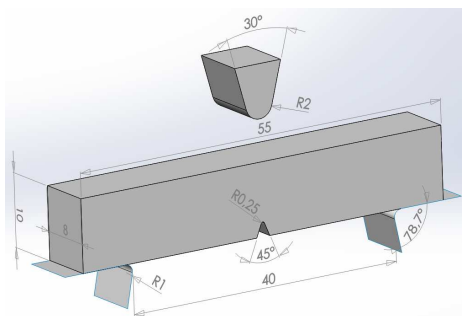


Рисунок 2 – Геометрична модель чисельного моделювання ударного згину за Шарпі

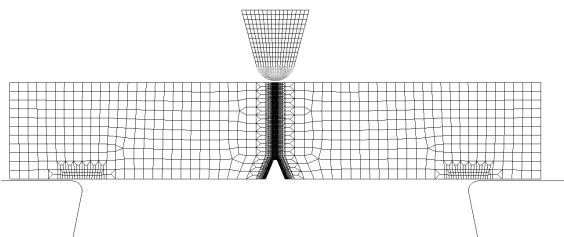


Рисунок 3 – Загальний вигляд скінченно-елементної моделі

При проведенні розрахунків ударник і опори розглядалися як тверді недеформівні тіла. Маса ударника складала 19,5 кг, а швидкість його руху в зоні контакту зі зразком – 5,5 м/с.

Чисельне моделювання проводили з використанням моделі матеріалу Джонсона-Кука [25, 26] і Купера-Саймондса [27]. Ці моделі є одними з загальноживаних для чисельних розрахунків динамічних процесів в металевих матеріалах.

Модель Джонсона-Кука описується рівняннями:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^n) \cdot (1 + c \ln \dot{\epsilon}^*) \cdot (1 - T^{*m}), \quad (1)$$

де A, B, C, n і m – константи матеріалу; $\bar{\epsilon}^p$ – ефектив-

на пластична деформація; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\bar{\epsilon}}^p / \dot{\epsilon}_0$ – швидкість ефективної пластичної деформації для $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$; $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ – гомологічна температура.

Деформація при руйнуванні задається залежністю:

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] \cdot [1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*] \cdot [1 - T^*], \quad (2)$$

де $\sigma^* = p / \sigma_{eff}$ – співвідношення тиску до ефективних напружень.

Руйнування відбувається за умови, якщо параметр руйнування $D = \sum \bar{\epsilon}^p / \epsilon^f$ досягає значення 1.

При використанні об'ємних елементів застосовувалося рівняння стану Мі-Грюнаїзена:

$$p = \left[\frac{\rho_0 \cdot C^2 \cdot \mu [1 + (1 - \gamma_0 / 2) \mu - a / 2 \mu^2]}{1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} \right] + (\gamma_0 + a \mu) E, \quad (3)$$

де C – кутовий коефіцієнт кривої $V_s - V_p$; S_1, S_2, S_3 – коефіцієнти нахилу кривої $V_s - V_p$; γ_0 – постійна Грюнаїзена; a – корекція об'єму першого порядку γ_0 ; $\mu = \rho / \rho_0 - 1$.

Модель Купера-Саймондса описується наступними рівняннями:

$$\sigma_T = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] \left(\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{eff}^p \right)$$

$$E_p = E_{ig} E / (E - E_{ig}), \quad \epsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} dt. \quad (4)$$

Швидкість пластичних деформацій визначається як різниця між швидкостями повних і пружних деформацій $\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^e$.

У якості модельного матеріалу для проведення тестового моделювання взято сталь Weldox 460-E. Для цієї сталі є достатня кількість публікацій із визначеними механічними характеристиками в широкому діапазоні швидкостей деформації, температур та з використанням різних методів визначення механічних властивостей [1, 2, 4]. Характеристики Weldox 460-E наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики сталі WELDOX 460-E

E , ГПа	ν	ρ , кг/м ³	A , МПа	B , МПа	
200	0.33	7850	490	807	
$C_p \frac{J}{kgK}$	α	$\bar{a} \frac{1}{K}$	$T_m (K)$	$T_0 (K)$	
452	0.9	$1,1 \times 10^{-5}$	1800	293	
n	$\dot{p}_0, \dot{r}_0 \frac{1}{s}$	C	D_c	p_d	
0.73	5×10^{-4}	0.0144	0.30	0	
m	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
0.94	0.0705	1.732	-0.54	-0.015	0

Підхід до побудови скінченно-елементної моделі та методологія ідентифікації фізико-термомеханічних властивостей матеріалів ґрунтується на даних робіт [22, 23].

Динамічну в'язкість матеріалу визначали за виразом:

$$KCV = \frac{K}{S_0}, \quad K = \frac{m(v_0^2 - v_1^2)}{2}, \quad (5)$$

де S_0 – площа поперечного перерізу зразка в зоні вирізу; m – маса ударника; v_0, v_1 – швидкість ударника до та після зламу зразка відповідно.

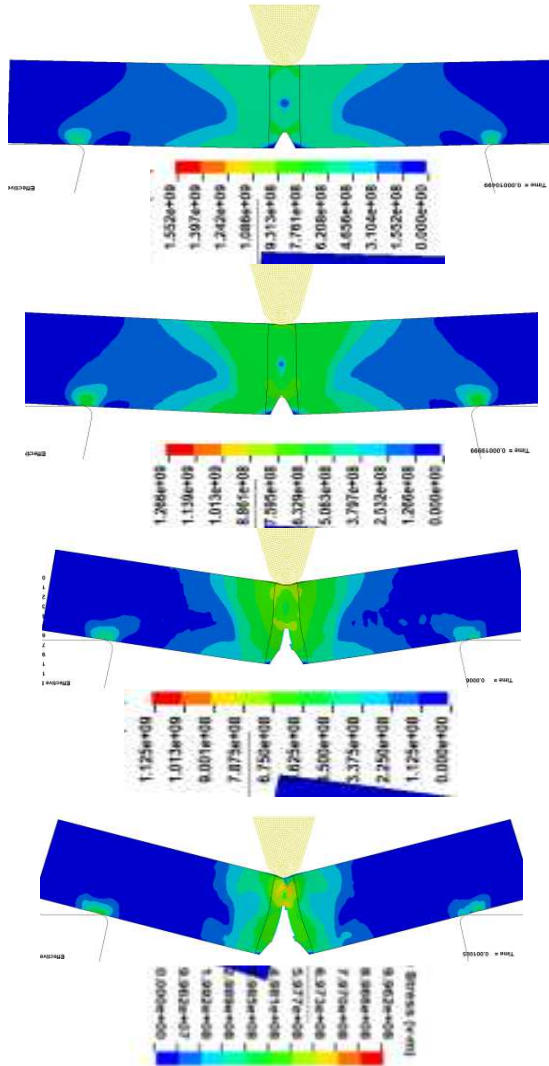


Рисунок 4 – Типовий розподіл напружень за Мізесом зразка Шарпі в різні моменти часу для моделі Купера-Саймондса

Чисельне моделювання якісно та коректно відображає процес руйнування зразку Шарпі. Так, на рис. 4 показано типовий розподіл напружень по Мізесу у ньому в різні моменти часу для моделі Купера-Саймондса.

З метою визначення впливу швидкості деформації розрахунок проводили для статичних параметрів моделі і з врахуванням динамічних властивостей матеріа-

лу. Додатковим параметром при проведенні чисельного моделювання стало застосування додаткового критерію руйнування для моделі матеріалу Купера-Саймондса.

Отримані значення ударної в'язкості звели в таблицю і порівняли їх із експериментальним (табл. 2, тут KCV_E – експериментальне значення ударної в'язкості для сталі Weldox 460-E, а KCV_P – ударна в'язкість, яку отримано з розрахунків).

Експериментальне значення ударної в'язкості для даного матеріалу не було вказано в літературних джерелах, з яких брали коефіцієнти матеріалу, тож воно було взято із даних виробника даної сталі. Відповідно, реальне значення ударної в'язкості матеріалів із літературних джерел може незначно відрізнятися.

Таблиця 2 – Значення ударної в'язкості за різними моделями

Модель	Швидкість деформації	KCV_E , Дж/см ²	KCV_P , Дж/см ²	Відносна похибка, %
Джонсона-Кука	–	45	149,1	231,3
Джонсона-Кука	+	45	120	166,7
Купера-Саймондса	–	45	13,8	69,2
Купера-Саймондса	+	45	27,2	39,6
Купера-Саймондса*	+	45	47,2	4,8

* – з додатковим критерієм руйнування за максимальними значеннями напружень.

Обговорення результатів досліджень та висновки. Результати проведеного чисельного моделювання свідчать про їх якісний характер. Розбіжність в 39,6% не дозволяє рекомендувати використання експериментальних параметрів, що взяті з літератури без їх оптимізації під конкретний вид навантаження. Разом з тим, при введенні додаткового критерію руйнування за максимальними значеннями напружень значення розбіжності складає 4,8%, що вказує на необхідність експериментальних випробувань матеріалів та визначення їх граничних значень руйнування при різних швидкостях деформації та використання цих значень при проведенні чисельного моделювання.

Модель Купера-Саймондса показала значно кращу збіжність при моделюванні даного експерименту. Це може бути пов'язано з низькими значеннями швидкості деформації (рівень 10^2 c^{-1}) в експериментах на ударну в'язкість.

Результати розрахунків за обома моделями показують суттєве підвищення точності отриманих даних при врахуванні ефектів, що пов'язані зі швидкістю деформації. Це свідчить про необхідність врахування динамічних характеристик матеріалу при чисельному моделюванні ударного навантаження.

З'ясування причин більшої точності моделі Купера-Саймондса і розробка рекомендацій оптимізації чисельних розрахунків по відомим літературним даним з метою їх кількісного співпадіння з експериментальними значеннями ударної в'язкості є завданням подаль-

ших досліджень.

Список літератури

- Borvik T., Hopperstad O.S., Dey S., Pizzinato E.V., Langseth M., Albertini C. Strength and ductility of Weldox 460 E steel at high strain rates, elevated temperatures and various stress triaxialities. *Engineering fracture mechanics*. 2005. no. 72. pp. 1071–1087.
- Dey S., Borvik T., Hopperstad O.S., Leinum J.R., Langseth M. The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes. *International Journal of Impact Engineering*. 2004. No. 30. P. 1005–1038.
- Borvik T., Langseth M., Hopperstad O.S., Malo K.A. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses. Part I: Experimental study. *International Journal of Impact Engineering*. 2002. No. 27. P. 19-35.
- Borvik T., Hopperstad O.S., Berstad T., Langseth M. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses. Part II: numerical simulations. *International Journal of Impact Engineering*. 2002. No. 27. P. 37-64.
- Tanguy B., Besson J., Piques R., Pineau A. Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test Part I: experimental results. *Engineering fracture mechanics*. 2005. No. 72. P. 49–72.
- Tanguy B., Besson J., Piques R., Pineau A. Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test Part II: modeling of the Charpy transition curve. *Engineering fracture mechanics*. 2005. No. 72. P. 413–434.
- Ткачук Н.А., В.Ф. Климов, А. В. Хлань, А.И. Шейко, А. Н. Малакей, В.И. Кохановский, А.В. Грабовский, А.Ю. Танченко, А.Ю. Васильев, М.А. Бондаренко, А.А. Зарубина, А. В. Набоков Компьютерный программно-аппаратный комплекс для анализа и синтеза моделей элементов объектов бронетанковой техники. *Вісник НТУ «Харківський Політехнічний Інститут»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 12 (1234). С. 96–109.
- Бісик С.П., І.Б.Чепков, В.А.Голуб, О.Ю.Ларін Дослідження вибухового навантаження V-подібної моделі днища бойової машини. *Зб. наук. праць ЦНДІ ОВТ ЗСУ*. К.: ЦНДІ ОВТ, 2012. Вип. 1 (22). С. 232-240.
- Бондаренко М. О., С. В. Пелешко, А. Ю. Васильєв, А. В. Грабовський, Р. В. Граборов, Ю. В. Веретельник, В. В. Посохов. Розрахунково-експериментальна верифікація динамічної моделі макета корпусу бронетранспортера. *Вісник НТУ «Харківський Політехнічний Інститут»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. №32 (1254). С. 5–13.
- Бісик С.П., Л.С. Давидовський, В.Г.Корбач Методика дослідження ефективності енергопоглинаючого елемента. *Технологічні системи*. 2016. №4(77). С. 103–112.
- Давидовський Л.С., Бісик С.П., Корбач В.Г. Дослідження енергопоглинаючого елемента протимінного сидіння бойової броньованої машини. *Озброєння та військова техніка*. 2017. №1 (13). С. 24-33.
- Бісик С.П. Аналіз пріоритетних напрямів вдосконалення протимінного захисту бойових броньованих машин. *Зб. наук. праць ЦНДІ ОВТ ЗСУ*. К.: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2011. Вип. 19(41). С. 77–81.
- Бісик С.П., Чепков І.Б., Васильєвський М.І., Давидовський Л.С., Корбач В.Г., Висоцький О.М., Захаревич Д.М. Теоретична оцінка протимінної стійкості багатоцільового тактичного автомобіля «Козак-2». *Озброєння та військова техніка*. 2016. №1 (9). С. 26–31.
- Бісик С.П., В.А.Голуб, В.Г.Корбач Числове вирішення задачі ударно-хвильового навантаження пластини. *Військово-технічний збірник*. Львів: АСВ, 2011. № 2(5). С. 3-6.
- Бісик С.П. Підхід до оцінки протимінної стійкості корпусів бойових броньованих машин з урахуванням зварних з'єднань. *Наука і техніка Повітряних Сил ЗС України*. Х. : ХНУПС ім. Кожедуба, 2017. Вип. 3(28). С. 121–127.
- Бісик С. П., К.Б. Круковський-Сіневич, І.Б.Чепков, Л.О. Волгін, В.А.Голуб, О.Ю. Ларін Дослідження навантаження вибухом макетів днищ бойових машин. *Механіка та машинобудування*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. № 2. С. 110–118.
- Бісик С. П., І.Б.Чепков, В.А.Голуб, В.Г.Корбач Оцінка впливу способу кріплення протимінного екрана на протимінну стійкість бойових броньованих машин. *Системи озброєння і військова техніка*. – Х.: ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2013. №1(33). С. 8-12.
- Бісик С.П., Л.С. Давидовський, В.Р. Схабицький Критерії травмування організму людини при ударному та вибуховому навантаженнях. *Системи озброєння і військова техніка*. Х.: ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2015. №1(41). С. 153-159.
- Бісик С.П., О.М.Купріненко, В.Г.Корбач. Оцінка протимінної стійкості легкої бойової колісної машини. *Вісник НТУ «Харківський Політехнічний Інститут»*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. № 31 (1140). С. 11-20.
- Бісик С.П., С.П.Бісик, Л.С. Давидовський Аналіз механогенезу травмування екіпажу бойових броньованих машин при підриві на міно-вибухових пристроях. *Військово-технічний збірник*. Львів: НАСВ, 2015. № 13/2015. С. 34-40.
- Бісик С.П. Дослідження конструкції захисного протимінного екрана. *Військово-технічний збірник*. – №12/2015. – Львів: АСВ, 2015. С. 110-117.
- Кондряков Е. А. Численное моделирование ударных испытаний образцов шарпи в двухмерной и трехмерной постановке. *Вісник НТУУ «КПІ»*. 2014. №2(71). С. 110–113.
- ISO 14556. Steel Charpy V-Notch Pendulum Impact Test – Instrumented Test Method. 05.01.2005.
- ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. Введ. 01.01.79.
- Бісик С.П., Чернозубенко О.В., Схабицький В.Р., Сливінський О.А., Ханоков В.А. Числове моделювання пробиття гомогенної перешкоди ударниками з різною формою головної частини. *Озброєння та військова техніка*. 2017. № 2 (14). С. 17-22.
- Бісик С.П., Чернозубенко О.В., Сливінський О.А., Схабицький В.Р., Корбач В.Г. Порівняння ефективності підходів до числового моделювання пробиття ударником гомогенної перешкоди. *Озброєння та військова техніка*. 2017. №3 (15). С. 8-15.
- Škrlec A. Estimating the Strain-Rate-Dependent Parameters of the Cowper-Symonds and Johnson-Cook Material Models using Taguchi Atrays. *Journal of Mechanical Engineering*. 2016. No. 62 (4). P. 220–230.
- Криворучко Д.В., Залого В.А. *Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы*: монография. – Сумы : Университетская книга, 2012. – 496 с.
- Криворучко Д.В., Залого В.А., Корбач В.Г. *Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів*. – Суми: Видавництво СумДУ, 2010. – 209 с.
- LS-DYNA keyword user's manual Version 970. Livermore: LSTC, 1998. 498 с.

References (transliterated)

- Borvik T., Hopperstad O.S., Dey S., Pizzinato E.V., Langseth M., Albertini C. Strength and ductility of Weldox 460 E steel at high strain rates, elevated temperatures and various stress triaxialities // *Engineering fracture mechanics*. 2005, no. 72, pp. 1071–1087.
- Dey S., Borvik T., Hopperstad O.S., Leinum J.R., Langseth M. The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes. *International Journal of Impact Engineering*. 2004, no. 30, pp. 1005–1038.
- Borvik T., Langseth M., Hopperstad O.S., Malo K.A. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses. Part I: Experimental study. *International Journal of Impact Engineering*. 2002, no. 27, pp. 19-35.
- Borvik T., Hopperstad O.S., Berstad T., Langseth M. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses. Part II: numerical simulations.// *International Journal of Impact Engineering*. 2002, no. 27, pp. 37-64.
- Tanguy B., Besson J., Piques R., Pineau A. Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test Part I: experimental results // *Engineering fracture mechanics*. 2005, no. 72, pp. 49–72.
- Tanguy B., Besson J., Piques R., Pineau A. Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test Part II: modeling of the Charpy transition curve // *Engineering fracture mechanics*. 2005, no. 72, pp. 413–434.
- Tkachuk N.A., Klymov V.F., Khlan A.V., Sheiko A.Y., Malakei A.N., Kokhanovskiy V.Y., Hrabovskiy A.V., Tanchenko A.Yu., Vasylev A.Yu., Bondarenko M.A., Zarubyna A.A., Nabokov A.V. Kompyuterniy programmno-apparatniy kompleks dlya analiza i

- сінтеза моделей елементів об'єктів бронетанкової техніки. [Computer software and hardware complex for analysis and synthesis of models of elements of objects of the armored vehicles]. *Visnyk NTU «KhPI»*. 2017, vol. 1234, no. 12, pp. 96-109.
8. Bisyk S.P., Chepkov I.B., Holub V.A., Larin O.Yu. Doslidzhennia vybukhovoho navantazhennia V-podibnoi modeli dnyshcha boiovoi mashyny [Investigation of the explosive load of the V-shaped bottom of the combat vehicle]. *Zb. nauk. prats TsNDI OVT ZSU*. 2012, vol. 22, no. 1, pp. 232-240.
 9. Bondarenko M. O., Peleshko Ye. V., Vasyliiev A. Yu., Hrabovskiy A. V., Hraborov R. V., Veretelnyk Yu. V., Posokhov V. V. Rozrahunkovo-eksperymentalna verifikatsiya dinamichnoi modeli maketa korpusu bronetransportera [Computational and experimental dynamic model verification of personnel armored carrier hull]. *Visnyk NTU «KhPI»*, Seriya: *Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*. 2017, vol. 1254, no. 32, pp. 5-13.
 10. Bisyk S.P., Davydovskiy L.S., Korbach V.H. Metodyka doslidzhennia efektyvnosti enerhophlynaicho elementa [Research methodology of effectiveness energy absorption element]. *Tekhnologicheskie sistemy*. 2016, vol. 77, no. 4, pp. 103-112.
 11. Davydovskiy L.S., Bisyk S.P., Korbach V.H. Doslidzhennia enerhophlynaicho elementa protymynnoho sydynnia boiovoi bronovanoi mashyny [Investigation of energy-absorbing elements of crew antimine seat of combat armored vehicles]. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*. 2017, vol. 13, no. 1, pp. 24-33.
 12. Bisyk S.P. Analiz pryoritetnykh napriamiv vdoskonalennia protymynnoho zakhystu boiovykh bronovanykh mashyn [Analysis of priority directions of improvement of antimine protections of armored vehicles]. *Zb. nauk. prats TsNDI OVT ZSU*. 2011, vol. 41, no. 19, pp. 77-81.
 13. Bisyk S.P., Chepkov I.B., Vaskivskiy M.I., Davydovskiy L.S., Korbach V.H., Vysotskiy O.M., Zakharevych D.V. Teoretychna otsinka protymynnoi stiiikosti bahatotsilovoho taktychnoho avtomobilia «Kozak-2» [Theoretical evaluation of continuous stability of the multiple tactical car "Kozak-2"]. *Ozbroiennia i viiskova tekhnika*. 2016, vol. 9, no. 1, pp. 26-31.
 14. Bisyk S.P., Holub V.A., Korbach V.H. Chyslove vyrishennia zadachi udarno-shkvylovoho navantazhennia plastyny [Numerical simulation of shock loading of plate]. *Viiskovo-tekhnichnyi zbiryk*. 2011, vol. 5, no. 2, pp. 3-6.
 15. Bisyk S.P. Pidkhd do otsinky protymynnoi stiiikosti korpusiv boiovykh bronovanykh mashyn z urakhuvanniam zvamykh ziednan [Approach to evaluation of mine resistant levels of armored vehicles taking into account welded joints]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl ZS Ukrainy*. 2017, vol. 28, no. 3, pp. 121-127.
 16. Bisyk S.P., Krukovskiy-Sinevych K.B., Chepkov I.B., Volhin L.O., Holub V.A., Larin O. Yu. Doslidzhennia navantazhennia vybukhom maketiv dnyshch boiovykh mashyn / [Research the explosion of the bottom dummy of combat vehicles]. *Mekhanika ta mashynobuduvannia*. 2012, no. 2, pp. 110-118.
 17. Bisyk S.P., Chepkov I.B., Holub V.A., Korbach V.H. Otsinka vplyvu sposobu kriplennia protymynnoho ekrana na protymynnu stiiikost boiovykh bronovanykh mashyn [Estimation of the influence of the method of fastening of the screen on the antimine resistance of armored vehicles]. *Sistemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. 2013, vol. 33, no. 1, pp. 8-12.
 18. Bisyk S.P., Davydovskiy L.S., Skhabytskyi V.R. Kryterii travmuвання orhanizmu liudyny pry udarnomu ta vybukhovomu navantazhenniakh [Criteria of injury human body percussion and explosive loading]. *Sistemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. 2015, vol. 41, no. 1, pp. 153-159.
 19. Bisyk S.P., Kuprinenko O.M., Korbach V.H. Otsinka protymynnoi stiiikosti lehkoj boiovoi kolisnoi mashyny [Research of the antimine protections of a lightweight military vehicle]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya: *Mashynoznavstvo ta SAPR*. 2015, vol. 1140, no. 31, pp. 11-20.
 20. Bisyk S.P., Davydovskiy L.S. Analiz mekhanohenezu travmuвання ekipazhu boiovykh bronovanykh mashyn pry pidryvi na minno-vybukhovyykh prystroiakh [Analysis of the crew injury mechanogenesis at armored combat vehicles blast on mine-explosive devices]. *Viiskovo-tekhnichnyi zbiryk*. 2015, no. 13, pp. 34-40.
 21. Bisyk S.P. Doslidzhennia konstruksii zakhyshnoho protymynnoho ekrana [Study construction protective mine screen]. *Viiskovo-tekhnichnyi zbiryk*. 2015, no. 12, pp. 110-117.
 22. Kondryakov E.A. Chislennoye modelirovaniye udarnih ispitaniy obrazchov sharpy v dvuhmemoy i tryehmemoy postanovkye// *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya *mashynobuduvannya*. 2014, № 2(71), pp. 110-113.
 23. ISO 14556. Steel Charpy V-Notch Pendulum Impact Test – Instrumented Test Method. 05.01.2005.
 24. GOST 9454-78. Metalli. Metod ispitaniya na udarniy izgib pri ponizhenih, komnatnoy i povishenih temperaturah. Vved. 01.01.79.
 25. Bisyk S.P., Chernozubenko O.V., Skhabytskyi V.R., Slyvinskyy O.A., Hanyukov V.A. Chislove modelyuvannya probittya gomogennoi pereshkodi udamikami z ryznoyu formoyu golovnoyi chastini// *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*. 2017, no. (14), pp. 17-22.
 26. Bisyk S.P., Chernozubenko O.V., Slyvinskyy O.A., Skhabytskyi V.R., Korbach V.H. Porivnyannya efektyvnosti pydhodiv do chislovogo modelyuvannya probittya udamikom gomogennoi pereshkodi // *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*. – 2017. – №3 (15). – pp. 8-15.
 27. Škrlec A. Estimating the Strain-Rate-Dependent Parameters of the Cowper-Symonds and Johnson-Cook Material Models using Taguchi Arrays // *Journal of Mechanical Engineering*. 2016, no. 62 (4), pp. 220-230.
 28. Krivoruchko D.V., Zaloga V.A. Modelirovaniye processov rezaniya metodom konechnih elementov: metodologicheskiye osnovi: monografiya. – Sumi: Universityetskaya kniga, 2012. – 496 p.
 29. Krivoruchko D.V., Zaloga V.A., Korbach V.H. Osnovi 3D-modelyuvannya procesiv mekhanichnoi obrobki metodom skinchennih elementiv. – Sumi: Vidavnicтво SumDU, 2010. – 209 p.
 30. LS-DYNA keyword user's manual Version 970. Livermore: LSTC, 1998. 498 c.

Надійшла (received) 15.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бісик Сергій Петрович (Bisyk Sergey Petrovich, Bisyk Serhii) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник науково-дослідної лабораторії Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ; тел.: (044) 271-08-74; e-mail: sergey-new@ukr.net

Широков Андрій Володимирович Широков Андрей Владимирович, Shirokov Andriy) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач лабораторії Інституту проблем міцності імені Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ; тел. (044) 286-63-57; e-mail: Shirokov.Andrey.V@gmail.com

Сливінський Олексій Анатолійович (Slyvinskii Aleksey Anatolievich, Slyvinsky Olexsiy) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: +38(067)1450024; e-mail: o.slyvinsky@gmail.com

Аристархов Олег Михайлович (Aristarkhov Oleg Mikhailovich, Aristarkhov Oleg) – ад'юнкт кафедри технічного забезпечення інституту оперативного забезпечення та логістики Національного університету оборони України імені Івана Черняховського, м. Київ; тел.: +38(093) 717-57-33; e-mail: aristarkhovolex@gmail.com