

УДК 620.178.7

Євген Кондряков, к.т.н.; Андрій Кравчук, к.т.н.; Валерій Харченко, д.т.н.; Володимир Жмака

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

МОДЕРНІЗАЦІЯ ІНСТРУМЕНТОВАНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО КОПРА ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИК ПРОВЕДЕННЯ УДАРНИХ ВИПРОБУВАНЬ РІЗНИХ ТИПІВ

Анотація. Проведено модернізацію інструментованого вертикального копра з метою розширення його функціональності, а саме встановлено новий динамометр та вузли закріплення зразків для проведення випробувань на ударний зсув, стиск та динамічне продавлювання. Також копер був оснащений системою відеофіксації, яка включає високошвидкісну камеру, що дозволяє проводити запис процесу деформування та руйнування зі швидкістю до 200 000 кадрів за секунду. За результатами тестових випробувань на ударний згин та зсув отримано відеосигнали процесу деформування та руйнування зразків.

Ключові слова: інструментований вертикальний копер, високошвидкісна система реєстрації, ударний зсув, ударний стиск, динамічне продавлювання, високошвидкісна відеокамера.

Eugene Kondryakov, Ph.D.; Andriy Kravchuk, Ph.D.; Valery Kharchenko, Ph.D.; Volodymyr Zhmaka

MODERNIZATION OF THE INSTRUMENTED VERTICAL DROP WEIGHT IMPACT TESTING MACHINE AND IMPROVEMENT OF DIFFERENT TYPES OF IMPACT TESTING METHODS

Abstract. Modernization of the instrumented vertical drop weight impact testing machine has been carried out to expand its functionality, specifically by installing a new dynamometer and sample mounting units for conducting impact shear, compression, and dynamic perforation tests. The impact testing machine was also equipped with a video recording system, which includes a high-speed camera capable of recording the deformation and fracture process at speeds up to 200,000 frames per second. From the results of impact bending and shear test, video signals of the specimen deformation and fracture process were obtained.

Keywords: instrumented vertical drop weight impact testing machine, high-speed registration system, impact shear, impact compression, dynamic perforation, high-speed video camera.

При високошвидкісному деформуванні властивості матеріалів можуть суттєво відрізнятися від їх квазістатичних властивостей, які отримують при стандартних випробуваннях. Зокрема, границя плинності та міцності зростають, а пластичність зменшується. Крім того, при високих швидкостях деформування активізуються різні механізми руйнування і для їх врахування потрібно проводити випробування різних типів зразків. До таких методик належать випробування на ударний згин, розтяг, зсув, стиск тощо, більшість з яких не регламентуються вітчизняними нормативними документами [1-5]. У зв'язку з необхідністю отримання характеристик міцності та пластичності в залежності від термомеханічних параметрів у широкому діапазоні швидкостей деформації, часто комбінують різні види випробувань як при статичному, так і при динамічному навантаженні. Тому розробка універсального експериментального обладнання, яке здатне забезпечити проведення широкого класу випробувань, а також підвищення інформативності таких випробувань за рахунок

використання сучасних високошвидкісних засобів реєстрації, залишається актуальною задачею.

Для забезпечення можливостей проведення на одній установці всіх видів випробувань, описаних вище, було проведено модернізацію інструментованого вертикального копра ВК-350. Конструкцію цього копра було розроблено в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України для проведення випробувань на ударний трьохточковий згин зразків типу Шарпі. Спеціально для вертикального копра була розроблена багатоканальна система високошвидкісної реєстрації деформації і температур з частотою дискретизації до 20 МГц та система нагріву та охолодження зразків, що дозволяє проводити випробування в широкому діапазоні температур [6].

Для розробки нової конструкції вузла навантаження та зразків було використано метод чисельного експерименту. Проводилась серія розрахунків з використанням методу скінчених елементів, при цьому варіювались конструкція та розміри ударника, опори та зразків. За результатами розрахунків було спроектовано оптимальні конструкції вузлів навантаження (динамометр та опори), які дозволяють отримати якісні результати (рис. 1,а).

За результатами аналізу літературних джерел та сучасних методів випробувань на ударний зсув для досліджень була обрана форма зразка з двома зонами зсуву. Довжина L зон зсуву може бути змінена для створення різних швидкостей деформування в цих зонах. З такою конструкцією зразка деформація стиску, що виникає у верхній його частині, перетворюється у локальний зсув у відповідних зонах. Такий зразок може бути випробуваний як на статичний, так і на динамічний зсув з використанням стандартних сервогідравлічних машин та різних типів копрів. При цьому швидкість деформування може варіюватися у межах $10^{-3} \div 10^5 \text{ с}^{-1}$ (рис.1,б).

Для випробувань на ударний стиск розроблено циліндричні зразки діаметром $d = 9 \text{ мм}$ та висотою $h = 11 \text{ мм}$. Зразок встановлюється на масивну загартовану опору з твердістю, вищою за твердість зразка, для уникнення його вдавлення в опору. Навантаження зразка проводиться ударником з динамометром з різними швидкостями деформування.

В якості зразків для випробувань на динамічне продавлювання використовувались квадратні пластини $50 \times 50 \text{ мм}$ товщиною 1 мм . Для закріплення тонколистових зразків була розроблена спеціальна опора з отвором для встановлення змінних пуансонів різної форми.

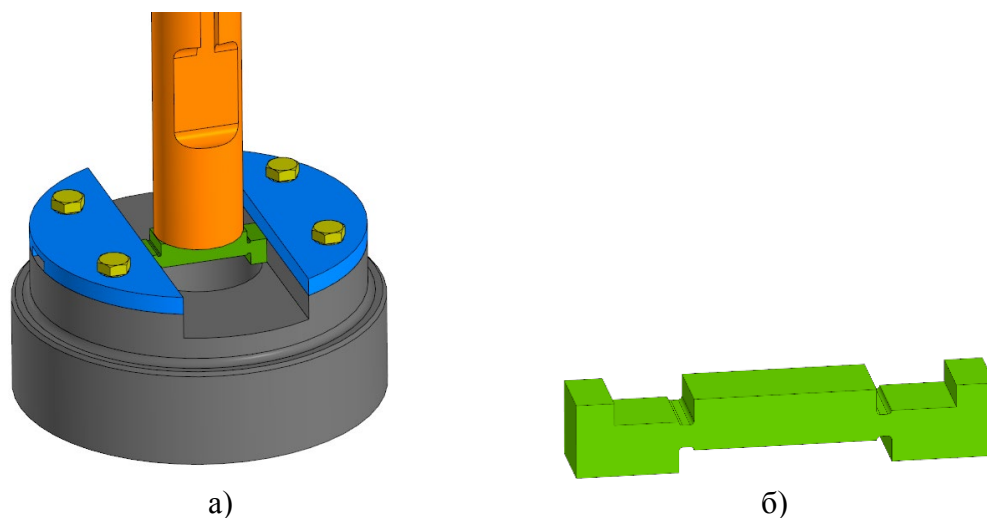


Рис. 1. Модернізована конструкція вузла навантаження (а) та форма зразка для проведення випробувань на ударний зсув (б).

За результатами всіх типів випробувань, описаних вище, записується діаграма навантаження в координатах зусилля-час. Для цього використовується високошвидкісна система реєстрації з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) Adlink NuDAQ PCI-9812. Сигнал з тензорезисторів, наклеєних на спеціальних площадках динамометра, через блок підсилення та плату АЦП передається на персональний комп'ютер для обробки, аналізу та зберігання даних. Для підвищення інформативності випробувань для відеофіксації процесу навантаження було використано високошвидкісну відеокамеру PHOTRON FASTCAM NOVA S9, яка дозволяє записувати відеосигнал зі швидкістю до 200 000 кадрів за секунду. Камера забезпечує високошвидкісне завантаження зображень на персональний комп'ютер за допомогою набору технологій Fast Gigabit Ethernet та багатофункціонального програмного забезпечення Photron FASTCAM Viewer. Для покращення якості зображення використовувався додатковий об'єктив з 12-кратним збільшенням та стробоскопічні +високочастотні лампи для підсвічування з системою керування GSVITEC MultiLED G8. Камера розташовувалась так, що її оптична вісь була перпендикулярна до поверхні зразка, а відстань до зразка складала 150мм. При цьому просторова розподільна здатність складала 240 пікселів/мм. Схематичне зображення процесу реєстрації даних при різних видах ударних випробувань показано на рис. 2.

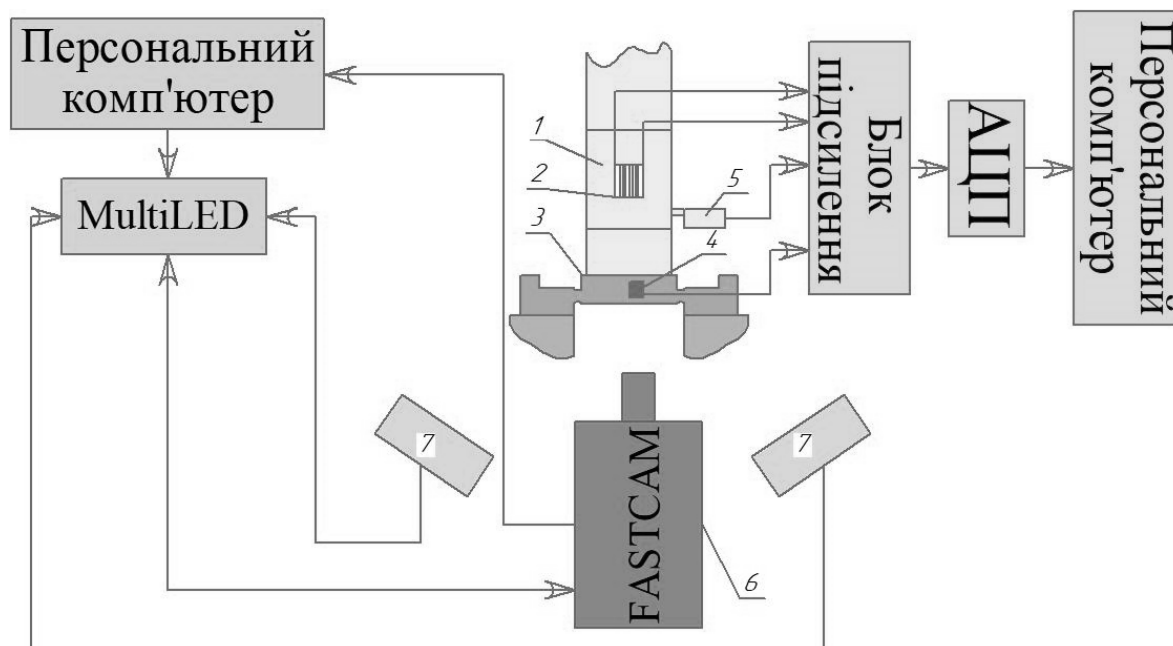


Рис. 2. Схема реєстрації параметрів навантаження зразка при випробуваннях на ударний зсув: 1 – динамометр; 2 – тензорезистори; 3 – зразок; 4 – датчик температури; 5 – система вимірювання швидкості навантаження; 6 – високошвидкісна камера; 7 - високочастотні освітлювачі.

Тестування відеофіксації процесу навантаження проводилось при випробуваннях на ударний згин та зсув. При проведенні тестових випробувань було відпрацьовано методику синхронізації сигналу з тензорезисторів, наклеєних на ударнику, та відеосигналу з високошвидкісної камери. При цьому швидкість системи реєстрації сигналу з датчиків складає $5 \cdot 10^6$ точок за секунду, а частота відеореєстрації – $8 \cdot 10^4$ кадрів за секунду, отже приблизно на 60 точок діаграми навантаження припадає 1 кадр відеосигналу. Відеофіксація процесу руйнування зразків також дозволяє оцінити швидкість розповсюдження тріщини. Швидкість реєстрації відеосигналу дозволяє отримувати зображення зразка з високою дискретністю, таким чином, вимірюючи

довжину тріщини на поверхні зразка, можна оцінити швидкість її розповсюдження з високою точністю.

Результати ударних випробувань зразків різних типів можуть бути використано для чисельного моделювання процесів деформування та руйнування матеріалів та елементів конструкцій. При таких розрахунках використовують різні моделі матеріалів та критерії руйнування (модель Джонсона-Кука, модель Гарсона-Твергаарда-Нідлмана та інші) [7-9]. Для моделювання високошвидкісних процесів, таких як балістичне пробиття перешкоди, вибухові навантаження тощо, необхідно визначати параметри таких моделей, які чутливі до впливу швидкості деформації. Таким чином, використання результатів комплексних випробувань з різними швидкостями деформації дозволяє отримати повний набір параметрів для різних моделей матеріалу. Тому використання для проведення таких випробувань інструментованих методів дозволить отримати додаткову інформацію о процесах деформування та руйнування матеріалів при динамічному навантаженні в діапазоні швидкостей деформацій $10^2 \div 10^4 \text{ c}^{-1}$.

Перелік посилань

1. Xu Zejian et al. Determination of shear behavior and constitutive modeling of the 603 steel over wide temperature and strain rate ranges. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2019. Vol. 129. P. 184-204.
2. Astakhov, M.M., Loginov, A.V., Loshmanov, L.P. et al. Combined experimental and theoretical method of determining strength characteristics of materials under quasistatic tensile conditions. *Strength Mater* 23, 963–966 (1991).
3. Viehrig H.-W., Boehmert J., Dzigan J. Use of instrumented Charpy tests for master curve determination. IAEA Specialists Meeting on Master Curve Testing and Results Application, 17-19 September 2001. Prague, Czech Republic, 2001. 8 p.
4. Xu, Z., Ding, X., Zhang, W., Huang, F., 2017. A novel method in dynamic shear testing of bulk materials using the traditional SHPB technique. *Int. J. Impact Eng.* 101: 90–104.
5. A. Popławski, P. Kędzierski, A. Morka Identification of Armox 500T steel failure properties in the modeling of perforation problems. *Materials & Design*. 2020. Vol. 190. P. 1-28.
6. Харченко В.В., Кондряков Е.А., Жмака В.Н., Бабуцкий А.А (2006) Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности. *Надёжность и долговечность машин и сооружений*, №27. 121-130.
7. Yuguang Cao et al. Determination of Johnson–Cook parameters and evaluation of Charpy impact test performance for X80 pipeline steel. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. Vol. 179.
8. A. Banerjee et al. Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel. *Materials Science & Engineering A*. 2015. Vol. 640. P. 200-209.
9. Є.О. Кондряков, А.В. Кравчук, В.В. Харченко Чисельне моделювання процесів зародження та розповсюдження тріщини в зразках різних типів з використанням моделі пошкоджуваності матеріалу GTN. *Mech. Adv. Technol.* 2021. Vol.5, N1. P. 1-8.