

УДК 621.7.014

В. А. Огородніков, д. т. н., проф.; Г. Ф. Архіпова, к. т. н., доц.

ЕНЕРГІЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ В УМОВАХ ДОРОЖНЬО-ТРАНСПОРТНИХ ПРИГОД

Інтенсивність експлуатації транспортних засобів, а також зростання їх числа супроводжують численні дорожньо-транспортні пригоди (ДТП). У більшості випадків ДТП зумовлені порушенням швидкісних режимів. У зв'язку з цим актуальними є методи, здатні оцінювати енергію деформації, витрачену під час ударів транспортних засобів. У статті запропоновано метод оцінки енергії деформацій транспортних засобів. Методи визначення енергії деформації та руйнування елементів конструкції транспортних засобів важливо вміти застосовувати для визначення швидкості їх руху перед зіткненням. Крім того, інформація про витрачену енергію на деформацію транспортних засобів в умовах ДТП дозволяє виробникам автотранспортних засобів зменшити обсяг дорогих, малоінформативних і вкрай негнучких випробувань автомобілів. У роботі розв'язана задача визначення енергії перед ударом на основі натурних випробувань. На прикладі автотехнічної експертизи ДТП отримано вихідні дані для визначення величин швидкостей автомобілів, а також їхньої енергії деформацій, поглиненої під час удару.

Сутність моделі оцінки енергії деформацій полягає в тому, що будь-який непружний удар між транспортними засобами приводиться до еквівалентного пружного удару, за якого враховують сумарні енергетичні витрати, які складаються з роботи деформації, роботи сил опору переміщенням транспортних засобів у процесі відкидання після удару й кінетичних втрат під час удару. Достовірність розробленого методу оцінки енергії деформацій автотранспортних засобів підтверджена в умовах ДТП. На основі натурних випробувань енергія деформації визначена методом енергетичного еквівалента й методом твердості. Показана задовільна збіжність результатів розрахунку енергії деформації двома методами. Отримані результати підтверджують надійність розрахунку швидкості, визначеної двома методами, а також за допомогою відеоспостереження. Метод твердості, запропонований у якості альтернативи методу енергетичного еквівалента, дозволяє розраховувати енергію в умовах ДТП будь-яких транспортних засобів, зокрема й автомобілів, "crash-tests"-випробування для яких не проводять.

Ключові слова: енергія деформацій, автотранспортні засоби, дорожньо-транспортні аварії, технологічна спадковість, метод твердості, метод енергетичного еквівалента.

Вступ

Для визначення величин швидкостей автомобілів під час їх зіткнення розроблена модель, викладена в роботі [1]. Суть моделі полягає в тому, що будь-який непружний удар між транспортними засобами приводиться до еквівалентного пружного удару. При цьому враховують сумарні енергетичні витрати, які складаються з роботи деформації, роботи сил опору переміщенням транспортних засобів в процесі відкидання після удару й кінетичних втрат під час удару.

Головний недолік зазначеної моделі полягає в тому, що використані експериментальні дані є результатом «crash-tests», тобто випробування руйнуванням. Це – дорогі й водночас малоінформативні випробування, що проводяться переважно для легкових автомобілів.

Починаючи з 2003 року, з'явилися роботи [2 – 5], у яких розроблено експериментально-розрахунковий спосіб ідентифікації пошкоджених елементів конструкцій транспортних засобів вимірюванням твердості пошкодженого металу. Це дозволяє ефективно визначити роботу деформацій, спричинених цими пошкодженнями.

Застосування цієї методики дозволяє з достатнім ступенем точності [6] визначити роботу деформації пошкоджених транспортних засобів і тим самим усунути недоліки розробленої раніше моделі [1].

Визначення енергії деформації та руйнування елементів конструкції транспортних засобів важливо не тільки для визначення швидкості їхнього руху перед зіткненням. Під час конструювання й виготовлення сучасних автомобілів постала потреба створення безпечних

конструкцій, міцність і жорсткість яких має бути керована, прогнозована й забезпечена параметрами технології обробки металів тиском, тобто технологічною спадковістю [5].

Низка зарубіжних фірм, наприклад, німецька фірма «MATFEM» (Німеччина, Мюнхен) розробляє програмне забезпечення аварійного руйнування транспортних засобів із метою прогнозування очікуваних пошкоджень перед ударом за умови відомої швидкості руху.

Результати дослідження

Розвиваючи зазначені підходи, у цій роботі розв'язуємо завдання оцінки енергії перед ударом на основі натурних випробувань.

На прикладі автотехнічної експертизи, розглянутої нижче, отримано вихідні дані для визначення величин швидкостей автомобілів, а також енергії їхньої деформації, поглиненої під час удару.

Згідно з протоколом, складеним працівниками дорожньо-патрульної служби, водій автомобіля «Hyundai Accent» (надалі – автомобіль 1) виїхав на смугу зустрічного руху, що призвело до зіткнення з автомобілем «BMW» (надалі – автомобіль 2), у результаті чого обидва автомобілі пошкоджені.

З метою оцінки енергії деформації автомобілів 1 і 2 досліджено обсяги пошкоджень елементів конструкцій автомобілів. Ці елементи фотографували, а також вимірювали твердість у вузлах попередньо нанесеної ділильної сітки з кроком базової чарунки 50 мм за допомогою переносного твердоміра «Темп-3».

Дотримуючись методики, викладеної в роботах [2, 3], витрати на роботу пластичної деформації й руйнування елементів конструкцій автомобілів визначали за формулою:

$$W_{cap} = W_0 \exp \frac{\ln k_H / D}{c}, \quad (1)$$

де W_{cap} – питома потенціальна енергія, Дж/см³, $k_H = \frac{(H_T)_i}{(H_T)_0}$, $W_0 = \frac{\sigma_{0,2}^2}{2 \cdot E}$ – пружна питома потенціальна енергія, Дж/см³, $\sigma_{0,2}$ – границя текучості матеріалу, МПа, E – модуль пружності 1 роду (модуль Юнга), МПа.

D і c у формулі (1) – коефіцієнти апроксимації кривої $k_{HT} = f(k_W)$.

Величину W_{cap} розраховували також за формулою:

$$W_{cap} = \int_0^e \sigma_u d\varepsilon_u, \quad (2)$$

де σ_u – інтенсивність напружень, МПа, ε_u – інтенсивність деформацій (безрозмірна величина).

У теорії пластичності залежність інтенсивності напружень від інтенсивності деформацій $\sigma_u = f(\varepsilon_u)$ називають єдиною кривою текучості матеріалу. Вона не залежить від виду напруженого стану. Цю залежність апроксимували рівнянням:

$$\sigma_u = A \cdot \varepsilon_u^n. \quad (3)$$

Отже, після підстановки формули (3) у (2) отримуємо:

$$W_{cap} = A \int_0^e \varepsilon_u^n d\varepsilon_u = A \frac{\varepsilon_u^{n+1}}{n+1}, \quad (4)$$

де A , n – коефіцієнти апроксимації кривої текучості, які мають фізичний зміст, A – напруження текучості за інтенсивності деформацій $\varepsilon_u = 1$, n – ступінь деформації, що відповідає максимальному навантаженню на умовній діаграмі розтягування.

Величину ε_u у формулі (4) визначали в кожному конкретному випадку або за твердістю k_H , або за діаграмою пластичності чи стійкості [7].

Дані матеріалів, необхідних для проведення розрахунків, отримали з [7].

До визначених даних вихідну границю текучості $\sigma_{0,2}$ (МПа) ставлять у відповідність з вихідною твердістю H_{m0} , згідно з рівнянням:

$$\sigma_{0,2} = B + 0,33H_{m0}, \quad (5)$$

де коефіцієнт B під час вимірювання твердості твердоміром "Темп-3" дорівнює $B = 176$.

Вихідну границю текучості $\sigma_{0,2}$ ставлять у відповідність із коефіцієнтом апроксимації кривої течії матеріалів, зважаючи на рівняння:

$$A = 1000 \cdot \exp(-0,0008 \cdot \sigma_{0,2}), \quad (6)$$

де A – коефіцієнт апроксимації рівняння (3).

Коефіцієнт n у формулі (3) для різних матеріалів, що застосовують в автомобілебудуванні, у межах $0,35 \leq n \leq 0,1$ і може бути знайдений з рівняння:

$$N = 0,35 \cdot \exp(-0,0008 \cdot A). \quad (7)$$

Отримане за формулами (1) і (2) значення W_{cap} ставили у відповідність обсягу деформованого металу елемента конструкції, що дозволило розрахувати величину повної потенціальної енергії деформації:

$$W_{def} = \Sigma(W_{cap})_i \cdot V_i. \quad (8)$$

У результаті підсумовування енергетичних витрат за всіма перерахованими пошкодженими елементами конструкцій автомобілів 1 і 2 отриманотакі значення енергії деформації відповідно:

$$W_{def1} = (35500 \dots 36000) \text{ Дж} \text{ та } W_{def2} = (23500 \dots 23950) \text{ Дж}.$$

Визначаємо також роботу деформацій автомобілів 1 і 2 за константами енергоємності відповідно до [2]. Ці розрахунки проводили на програмному комплексі "КНДІСЕ АВТОФОРМУЛА" за затвердженою Мін'юстом України методикою.

Автомобіль 1 мав одне глобальне пошкодження:

- збоку – шириною $\delta_{21} = 1,3$ м і висотою $\lambda_{21} = 0,15$ м у формі прямокутника;
 $W_{def2} = 23,010$ Дж.

Автомобіль 2 мав одне глобальне пошкодження:

- спереду – шириною $\delta_{21} = 1,49$ м і висотою $\lambda_{21} = 0,2$ м у формі прямокутника;
 $W_{def1} = 35,164$ Дж.

Надалі користувалися цими значеннями, оскільки вони є нижчими за значення, отримані методом твердості. Отже, відповідають нижній межі швидкостей руху автомобілів.

Нехай у момент зіткнення в точці первинного контакту автомобілі 1 і 2 мали швидкості руху, позначені векторами \vec{V}_1 та \vec{V}_2 спрямованими вздовж їхніх поздовжніх осей відповідно, прикладеними до їхніх центрів мас C_1 і C_2 . Задаємо прямокутну систему координат на площині проїжджої частини дороги, направивши вісь OX по вектору швидкості горизонтально. Кут між поздовжніми осями транспортних засобів відповідно до спільних пошкоджень, а також інформації камери спостереження становить $\alpha \approx 90^\circ$.

У процесі руху після зіткнення центр мас C_2 автомобіля 2 перемістився на відстань $l_2 \approx 0,3$ м у стані заносу (згідно зі схемою ДТП), маючи деяку початкову швидкість цього руху, позначену вектором \vec{U}_{20} , прикладеним до центру мас C_2 і спрямованим уздовж горизонтальної осі.

У процесі руху після зіткнення з автомобілем 2 центр мас C_1 автомобіля 1 перемістився на відстань $l_2 \approx 1,9$ м (згідно зі схемою ДТП), маючи деяку початкову швидкість цього руху, позначену вектором \vec{U}_{10} , прикладеним до центру мас C_1 і спрямованим під кутом $\beta_1 \approx 10^\circ$ до напрямку вектора початкового руху. У результаті ДТП транспортні засоби зайняли положення 1 і 2, зафіксовані в схемі ДТП, складеної працівниками ДАІ (рис. 1).

Оскільки напрямки швидкостей руху автомобілів на момент зіткнення відомі, визначаємо їх величини відповідно до способу, викладеного у [2].

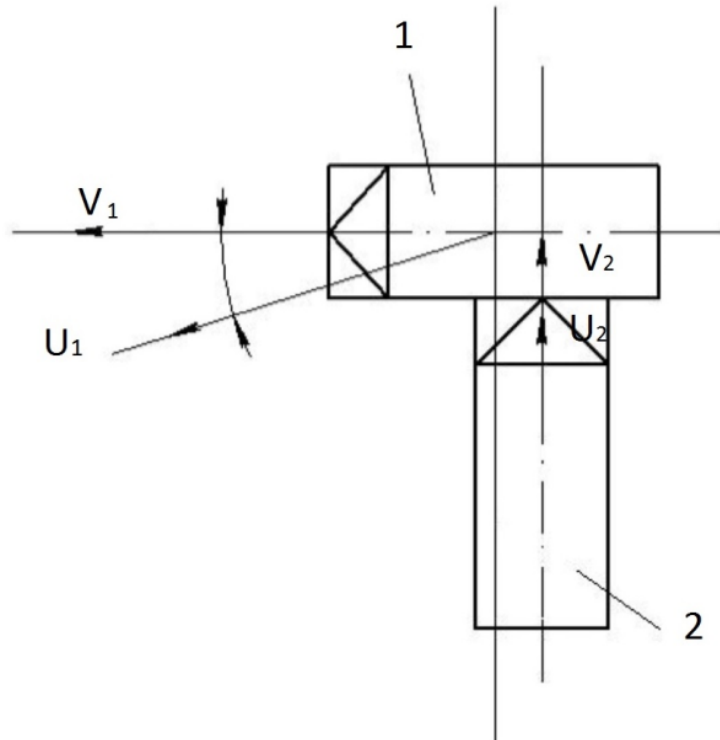


Рис. 1. Схема ДТП за участю автомобілів 1 і 2

Роботи сил опору переміщення автомобілів 2 і 1 після удару визначаються за формулами:

$$W_{rez1} = m_1 \cdot g \cdot l_1 \cdot f'_1, \quad (9)$$

$$W_{rez2} = m_2 \cdot g \cdot l_2 \cdot f'_2, \quad (10)$$

де $m_1 = 1280$ кг маса автомобіля 2 з урахуванням завантаження; $m_2 = 2100$ кг маса автомобіля 1 з урахуванням завантаження; $g = 9,81 \text{ М/с}^2$ прискорення вільного падіння; $f'_1 = f'_2 = (0,56 \dots 0,64)$ – коефіцієнт тертя бокового ковзання коліс по сухій поверхні з асфальтобетонним покриттям [5].

Згідно з розрахунком за формулами (9) та (10), зазначені параметри складають:

$$W_{rez1} = (13360 \dots 15269) \text{ Дж},$$

$$W_{rez2} = (3461 \dots 3955) \text{ Дж}.$$

Сумарні енергетичні витрати на переміщення транспортних засобів після зіткнення, на їхнє деформування та руйнування окремих деталей у процесі зіткнення визначають за формулами:

$$W_{\Sigma 1} = W_{rez1} + W_{def1}, \quad (11)$$

$$W_{\Sigma 2} = W_{rez2} + W_{def2}. \quad (12)$$

Підстановка чисельних значень параметрів, що входять у ці формули, дає:

$$W_{\Sigma 1} = (48524 \dots 50433) \text{ Дж},$$

$$W_{\Sigma 2} = (26471 \dots 26965) \text{ Дж}.$$

Початкові швидкості руху автомобілів під час їх переміщення після зіткнення відповідають сумарним енергетичним витратам і визначають за формулами:

$$U_{10} = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{\Sigma 1}}{m_1}}; U_{20} = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{\Sigma 2}}{m_2}}. \quad (13)$$

Підстановка чисельних значень параметрів, що входять у формули (13), дає:

$$U_{10} = (8,7 \dots 8,9) \text{ м/с}; \quad U_{20} = (5 \dots 5,1) \text{ м/с}.$$

На підставі закону збереження кількості руху механічної системи, що в цьому випадку складається з двох автомобілів, під час удару, еквівалентного абсолютно пружному удару, запишемо векторне рівняння, яке зв'язує швидкості руху транспортних засобів у моменти закінчення й початку удару:

$$m_1 \cdot \vec{U}_{10} + m_2 \cdot \vec{U}_{20} = m_1 \cdot \vec{V}_1 + m_2 \cdot \vec{V}_2 \quad (14)$$

Знаходимо проєкції векторних величин рівняння (14) на вісь координат ОУ і з отриманого виразу знаходимо формулу для визначення швидкості \vec{V}_2 :

$$V_2 = \frac{m_1 U_{10} \sin \beta_2}{m_2}. \quad (15)$$

Знаходимо проєкції векторних величин рівняння (14) на вісь координат ОХ і з отриманого виразу знаходимо формулу для визначення швидкості \vec{V}_1 :

$$V_1 = \frac{m_1 U_{10} \cos \beta_1 + m_2 U_{20}}{m_1}. \quad (16)$$

Підстановка чисельних значень параметрів, що входять у цю формулу, дає:

$$V_1 = (16,8 \dots 17,1) \text{ м/с} = (60,5 \dots 65,5) \text{ км/год}.$$

Швидкість автомобіля 1 у момент зіткнення під час ДТП склала (60,5 ... 65,5) км/год .

Швидкість автомобіля 1 до гальмування визначаємо за формулою:

$$V_{a1} = 1,8 \cdot (t_z + t_{OT}) \cdot j + \sqrt{26 \cdot j \cdot S_b + V^2}, \quad (17)$$

де t_z – час наростання вповільнення до максимального значення, 0,3 с; t_{OT} – час припинення процесу гальмування, 0,3 с; j – уповільнення автомобіля, (6,9..7,5) м/с²; S_b – довжина гальмівного шляху, 16,3 м.

Після підстановки чисельних значень у формулу (9) отримуємо:

$$V_{a1} = (88 \dots 94,6) \text{ км/год} .$$

Отже, з огляду на характер руху автомобіля 1 у цій ситуації та пошкодження транспортних засобів, швидкість його руху склала (88 ... 94,6) км/год .

Визначимо також швидкість руху автомобіля 1, використовуючи запис камери відеоспостереження. Автомобіль 1 з'являється в зоні видимості камери (на відстані близько 152 ... 160 м від місця ДТП) на момент часу 23:24:59. Зіткнення автомобілів відбувається після другого кадру з моменту часу 23:25:05, тобто через 6,2 с.

Швидкість руху автомобіля 1 визначають співвідношенням пройденого шляху до часу, за який автомобіль подолав указану відстань, і становить:

$$(152 \dots 160) / 6,2 = (24,52 \dots 25,81) \text{ м/с} = (88,3 \dots 92,9) \text{ км/год}.$$

Це практично збігається зі значенням швидкості автомобіля 1. Швидкість визначено з урахуванням пошкоджень, зафіксованих на місці аварії.

Зупинимося на результатах розрахунку енергії деформації, отриманих методом твердості [2] і методом енергетичного еквівалента [1].

За методом твердості енергія деформації:

$$W_{def1} = (35,500 \dots 36,000) \text{ Дж} \quad W_{def2} = (23,500 \dots 23,950) \text{ Дж} .$$

За методом Байкова В. П. [1]:

$$W_{def1} = 35,164 \text{ Дж} \quad W_{def2} = (23,500 \dots 23,950) \text{ Дж} .$$

Сумарне значення енергії деформації (див. (11), (12)) становить відповідно по твердості:

$$W_{\Sigma 1} = (48,860 \dots 51,269) \text{ Дж} \quad W_{\Sigma 2} = (26,961 \dots 27,905) \text{ Дж} .$$

За методом Байкова В. П. відповідно:

$$W_{\Sigma 1} = (48,524 \dots 50,433) \text{ Дж} \quad W_{\Sigma 2} = (26,471 \dots 26,965) \text{ Дж} .$$

Швидкість автомобіля 1 у момент втрати курсової стійкості:

$$V_{cp} = (88,85 \dots 92,05) = 90,45 \text{ км/год.}$$

За методом Байкова В. П.:

$$V_{cp} = (88,58 \dots 91,47) = 90,025 \text{ км/год.}$$

Отримані результати підтверджують надійність визначення швидкості, обчисленої двома методами, а також отриманої за допомогою камери відеоспостереження.

Висновки

1. Розроблено метод оцінювання енергії деформацій транспортних засобів в умовах дорожньо-транспортних пригод.
2. На основі натурних випробувань енергія деформації може бути визначена методом енергетичного еквівалента й методом твердості. Засвідчена задовільна збіжність результатів розрахунку енергії деформацій обома зазначеними методами.
3. Метод твердості, запропонований у якості альтернативи методу енергетичного еквівалента, дозволяє розраховувати енергію в умовах ДТП будь-яких транспортних засобів, серед яких автомобілі, "crash-tests" для яких не проводиться.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. 2275612 Российская Федерация, МПК⁶G01M 17/007. Способ определения скоростей движения транспортных средств при столкновении / Байков В. П., Киселев В. Б., Любарский К. А.; заявитель и патентообладатель Киевский научно-исследовательский институт судебных экспертиз Министерства Юстиции Украины. – №2001105490/28 ; заявл. 01.03.2001 ; опубл. 27.04.2006, Бюл. № 12.
2. Пат. 66462 А Україна, МПК⁶G01N 19/00, G01N 33/20. Спосіб визначення швидкості транспортних засобів у момент зіткнення / Огородніков В. А. ; заявник та патентовласник Огородніков В. А.– № 2003043308 ; заявл. 14.04.2003 ; опубл. 17.05.2004, Бюл. № 5.
3. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачиавтотехническойэкспертизы): монографія / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак. – Винница. Украина: ВНТУ, 2005. – 195 с.
4. Ogorodnikov V. A. The Physical Model of Motor Vehicle Destruction under Shock Loading for Analysis of Road Traffic Accident / V. A. Ogorodnikov. – Proc. SPIE 10808. Photonics Application in Astronomy, Communications Industry and High-Energy Physics Experiments, 2018. – 186 p.
5. Штамповка листовых заготовок и создание безопасных конструкций / В. А. Огородников, Т. Ф. Архипова, В. А. Макаров [та ін.] // Вісник машинобудування та транспорту. – 2019. – Т. 10, № 2. – С. 65 – 71. DOI: 10.31649/2413-4503-2019-10-2-65-71.
6. Огородников В. А. Оценка точности определения энергии деформации и разрушения по распределению твердости в условиях чистого изгиба / В. А. Огородников, М. И. Побережный, В. Б. Киселев// Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ, 2005. – С. 24 – 32.
7. Дель Г. Д. Деформируемость материалов с анизотропным упрочнением / Г. Д. Дель // Прикладные задачи механики сплошных сред. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1988. – 152 с.

Стаття надійшла до редакції 19.09.2020.

Стаття пройшла рецензування 26.09.2020.

Огородніков Віталій Антонович – д. т. н., професор, зав. кафедри опору матеріалів та прикладної механіки, e-mail: va.ogorodnikow@gmail.com.

Архіпова Тетяна Федорівна – к. т. н., доцент кафедри опору матеріалів та прикладної механіки, e-mail: tfarhipova@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет.