

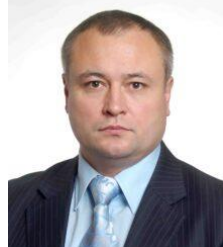
**РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ КУЗОВНИХ
ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ПРИ ЗІТКНЕННІ**

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING PLASTIC DEFORMATIONS
OF VEHICLE BODY PARTS DURING COLLISION**



Драгобецький Володимир Вячеславович, доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, kafedra.tehmash@gmail.com.

<http://orcid.org/0000-0001-9637-3079>



Мороз Микола Миколайович, доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, mykolai.moroz@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0001-6107-1230>



Молоштан Дмитро Васильович, кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, moloshtandima@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0001-8881-8541>



Черниш Андрій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, chernyshkrnu@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-9711-827X>



Нікітіна Альона Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, nikaalyonka@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-0495-0604>

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення точності автотехнічної експертизи дорожньо-транспортних пригод, яка безпосередньо впливає на об'єктивність встановлення обставин зіткнень та визначення швидкісних параметрів транспортних засобів. Існуючі методи оцінки пластичних деформацій кузовних деталей переважно базуються на статичних підходах, що не враховують динамічну природу ударних навантажень та інерційні властивості матеріалів у момент зіткнення. Це призводить до значних похибок у визначенні енергетичних параметрів удару та реконструкції механізму дорожньо-транспортних пригод.

Метою дослідження є удосконалення методу математичного опису процесів деформації та руйнування конструктивних елементів транспортних засобів, які виникають внаслідок ударних навантажень під час зіткнень. Робота спрямована на підвищення точності та об'єктивності автотехнічної експертизи шляхом уточнення підходів до визначення пластичних деформацій облицювальних деталей автомобілів, враховуючи сучасні вимоги до безпеки дорожнього руху та необхідність точного відтворення механізму ДТП.

Об'єкт дослідження – процес управління проєктами громадської участі.

Предмет дослідження – закономірності пластичного деформування кузовних деталей автомобілів з урахуванням динамічних характеристик матеріалів, інерційних властивостей та енергетичного балансу системи в умовах зіткнення.

Методика дослідження. У дослідженні використано комплексний підхід, що базується на феноменологічній теорії, методах механіки деформівного твердого тіла та теорії пластичності. Для математичного моделювання поведінки матеріалів при динамічному навантаженні застосовано аналітичні методи Ритца та рівняння Лагранжа другого роду. Методика включає аналіз енергетичного балансу системи, де враховується робота зовнішніх сил, інтенсивність напружень, ступінь деформації та об'єм матеріалу. Експериментальна частина базується на проведенні ударних випробувань (згинання, розтягування, стиснення) для вивчення механічних характеристик металів у динамічному режимі, зокрема із застосуванням методу пружного відскоку для визначення твердості деформованого металу. Також проведено класифікацію облицювальних деталей за типом їхньої кривизни та контуру (елементи одинарної та подвійної кривизни, замкнуті та незамкнуті контури).

Ключові слова: автотехнічна експертиза, руйнування, деформація, феноменологічна теорія, твердість, транспортні засоби, безпека дорожнього руху.

Вступ. Сучасний розвиток транспортної галузі супроводжується стрімким зростанням кількості автомобілів, що призводить до підвищення інтенсивності дорожнього руху. Незважаючи на досягнення в галузі транспортного машинобудування, збільшення динамічних характеристик транспортних засобів та недостатні темпи розвитку дорожньої інфраструктури спричиняють зростання кількості дорожньо-транспортних пригод (ДТП). ДТП мають суттєвий вплив на соціальну, економічну та екологічну сфери, вимагаючи точного та об'єктивного встановлення причин і механізму зіткнень. У цьому контексті особливої актуальності набуває розвиток ефективних методів автотехнічної експертизи, зокрема, уточнення і вдосконалення підходів до визначення пластичних деформацій облицювальних деталей автомобілів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сфері автотехнічної експертизи значна увага приділяється розробці та вдосконаленню методів визначення швидкості руху транспортних засобів на момент зіткнення. Найпоширенішими залишаються методи, що базуються на визначенні швидкості за довжиною гальмівного шляху та уповільненням під час гальмування. У той же час, для більш точного відтворення умов ДТП дослідники, зокрема В. А. Огородніков [1–6], пропонують використовувати моделі, що враховують повний енергетичний баланс системи. Розвиток методів ідентифікації пошкоджень спрямований на впровадження експериментально-розрахункових способів, зокрема, через вимірювання твердості пошкодженого металу з подальшим розрахунком роботи деформації. У сучасних дослідженнях обґрунтовано доцільність застосування ударних випробувань (згинання, розтягування) для уточнення фізико-механічних характеристик матеріалів у динамічному режимі. На

їх основі пропонується будувати діаграми деформацій та тарировочні графіки, які відображають реальні умови пошкоджень при ДТП.

Постановка завдання. У межах дослідження поставлено мету – удосконалити метод математичного опису процесів деформації та руйнування конструктивних елементів транспортних засобів під дією ударних навантажень. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі методи визначення параметрів деформації та швидкості транспортних засобів під час зіткнення, виявити їхні обмеження щодо врахування динаміки ударного процесу.

2. Розробити модель, яка враховує кінетичну енергію, витрачену на пластичну деформацію, а також інерційні та релаксаційні властивості матеріалів.

3. Вивчити механічні характеристики металів у динамічному режимі шляхом ударних випробувань (згинання, розтягування), зокрема з використанням методу пружного відскоку.

4. Удосконалити підходи до ідентифікації характеру пошкоджень транспортних засобів для більш точного відтворення механізму аварії в рамках автотехнічної експертизи.

Виклад основного матеріалу. Переважна більшість облицювальних елементів кузова автомобіля, що підлягають діагностиці, представлена деталями без бортів, які мають плоску або криволінійну поверхню з незамкнутим контуром. Вони поділяються на елементи одинарної та подвійної кривизни. Деталі одинарної кривизни, своєю чергою, класифікуються як з однозначною, так і з двозначною кривиною, подібний розподіл застосовується й до деталей подвійної кривизни. До найбільш вразливих у разі дорожньо-транспортних пригод належать компоненти паливної системи, зокрема глушники, резонатори, трубопроводи та патрубки. Ці елементи, як правило, мають замкнутий контур і характеризуються одинарною або подвійною кривизною, із можливістю однозначного чи двозначного профілю кривизни. Місцеві зони стоншення матеріалу у вм'ятинах різної форми, як правило, спостерігаються в центральній частині вм'ятини – полюсі, і залежать від взаємозв'язку між внутрішнім тиском і кривизною в цьому місці при настанні втрати стійкості конструкції. Використання методів пластичної теорії деформації для аналізу оболонок різної кривизни дозволяє обчислити граничні значення прогину та радіуса в області полюса деформації. Для низьковуглецевих сталей типу «автомат» із товщиною 0,8 мм встановлено граничне співвідношення між шириною вм'ятини та її прогином, яке дорівнює 3,10.

Однією з головних причин значної кількості аварій є виїзд на смугу зустрічного руху та перевищення допустимої швидкості. У випадках зіткнень за підвищених швидкостей участь кількох транспортних засобів ускладнює процес автотехнічного дослідження. Існують усталені методики розрахунку енергії удару й визначення швидкості зіткнення, яка спричинила пластичну деформацію конструктивних елементів автомобіля. В основі таких методів лежить поняття енергетично еквівалентної швидкості.

Один із сучасних підходів до оцінювання швидкості транспортного засобу полягає у встановленні функціонального зв'язку між величиною енергії, витраченої на пластичну деформацію, і зміною твердості металу в зоні деформації. Альтернативний підхід базується на порівнянні механічних характеристик матеріалу в деформованому та недеформованому стані.

У вітчизняній та зарубіжній літературі найчастіше приймають апроксимуючу залежність динамічної межі плинності від швидкості деформації у вигляді

$$\sigma_{sd} = \sigma_s \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/n} \right]. \quad (1)$$

де σ_{sd} – напруги динамічної межі плинності;

σ_s – напруги статичної межі плинності;

D, n – постійні величини.

Під час зіткнення транспортних засобів енергетичний баланс системи, утвореної автомобілями, що беруть участь у зіткненні, розглядається на трьох етапах: на момент початку зіткнення, у фазі його завершення, а також протягом періоду відкидання автомобілів після удару.

$$0,5 \sum_{i=1}^n m_i V_i^2 = \sum_{i=1}^n W_{ri} + \sum_{i=1}^n Ad_i ,$$

де n – кількість автомобілів, що зіткнулися;

m_i – маси автомобілів;

V_i – швидкості автомобілів на момент зіткнення;

W_{ri} – робота сил опору переміщенням автомобілів;

Ad_i – робота деформацій та руйнування деталей та конструкцій автомобілів.

Сила тертя дорівнює сумі двох складових $T = T_m + T_d$.

Сучасні методи оцінювання енергії деформації та руйнування, що виникають унаслідок зіткнення, ґрунтуються на обчисленні роботи, затраченої на деформування пошкоджених конструктивних елементів. Це значення визначається відповідно до встановлених залежностей [7, 8]:

$$\delta A = \iiint_v (\sigma_n dl_n) dV + \delta A_d \quad (2)$$

де A – робота зовнішніх сил;

σ_n – інтенсивність напружень;

l_n – ступінь деформацій;

V – об'єм матеріалу;

A_d – робота руйнування.

Пошкоджені елементи конструкції при швидкостях понад 50 м/с зазнають деформування, яке супроводжується локалізацією пластичних деформацій в окремих зонах. У таких умовах кінетична енергія, що накопичується в процесі швидкісного деформування, безпосередньо перетворюється у роботу пластичного деформування в місці її концентрації. Під час зіткнення транспортних засобів їх швидкість змінюється з часом, що призводить до виникнення інерційних сил першого порядку. У результаті цього рівняння, що описує напружено-деформований стан, набуває модифікованої форми.

$$\sigma_{11} = (\sigma + 2\mu\varepsilon_n) \left[0,5 + \sqrt{0,25 + \frac{2\mu\rho\dot{x}_{11}^2 \left(\dot{x}_{11}\varepsilon_{11} + \frac{\partial\dot{x}_{11}}{\partial t} \right)}{(\sigma + 2\mu\varepsilon_n)^2}} \right]; \quad (3)$$

$$\text{де } \sigma = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3}; \mu = \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i}.$$



Рисунок 1 – Пошкодження транспортних засобів
Figure 1 – Damage to vehicles

Розглянемо круглу вм'ятину як тонкостінну, жорстко зафіксовану по краю. Проаналізуємо розв'язання задачі за двох варіантів граничних умов.

1. У початковий момент задана кінетична енергія вм'ятини T_0 .

2. На поверхні вм'ятини заданий тиск $p = p(r, t)$, де r – координата, а t – час, в окремому випадку $p = p(t)$.

Відомо, що взаємодія ударної хвилі з вм'ятиною обмежених розмірів має складну природу. Так, при відображенні ударної хвилі від защемленої вм'ятини характер зміни тиску $p(r, t)$ на вм'ятині залежить від міцності, щільності, товщини та радіусу вм'ятини (рис. 2).

Для повного розв'язання цієї задачі у випадку розташування заряду вибухової речовини на осі симетрії необхідне чисельне інтегрування рівнянь розльоту продуктів детонації, динаміки середовища та поведінки вм'ятини під час її взаємодії з оточенням. При цьому слід враховувати як газодинамічні рівняння, так і співвідношення, що описують міцнісні властивості перешкоди. Такий підхід є досить складним і ресурсомістким.

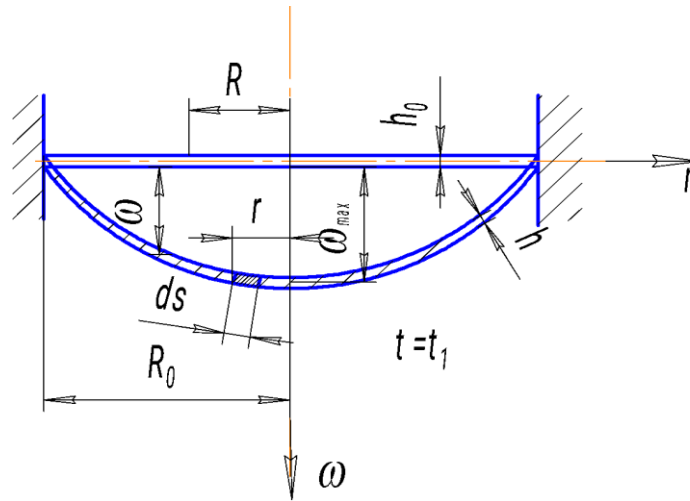


Рисунок 2 – Модель деформування круглої вм'ятини
Джерело: розроблено авторами
Figure 2 – Deformation model of a circular dent
Source: developed by the authors

Отже, похідні $\frac{\partial B}{\partial A}$, $\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial A}$ і $\partial \sqrt{1 + \frac{(A\phi)^2}{\partial A}}$, які визначають функцію $\frac{\partial E_\phi}{\partial A}$, обчислюються за допомогою виразів. Це завдання може бути вирішено за допомогою рівняння Лагранжа 2-го роду:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{A}} + \frac{\partial (E_\phi - T)}{\partial A} = 0.$$

Найпростіше рішення у даному випадку виходить, якщо задана початкова кінетична енергія вм'ятини T_0 .

Розглянемо випадок, коли на поверхні пластини задано тиск $p = p(r, t)$, в окремому випадку може бути $p = p(t)$. Нехтуємо кінетичною енергією $T_u \ll T_\omega$, тому рівняння Лагранжа можна записати у вигляді

$$-\iiint \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} \delta \omega \rho dv - \delta E_\phi + \iint_F p \delta \omega dF = 0. \quad (4)$$

Звідси можна визначити

$$B_1 = B_1(B_2, B_3, \dots, B_n, A_1, A_2, \dots, A_n). \quad (5)$$

Коефіцієнти B_2, B_3, \dots, B_n визначаються за умови, що з даної форми вм'ятини, т. к. е. фіксоване A_i значення E_ϕ має бути мінімальним. Звідси

$$\frac{\partial E_\phi}{\partial B_i} = 0, \quad (6)$$

де $i = 2, 3, \dots, n$. Коефіцієнти A_i визначаються з рівнянь (2.72) за умови, що $h = \sum B_i \varphi_i$.

Запишемо рівняння Лагранжа для цього випадку:

$$-\frac{\partial E_\phi}{\partial \Phi} - \int_0^{R_0} \ddot{A} \varphi^2 \rho dv + \int_0^{R_0} p dF = 0,$$

$$dF = 2\pi r \sqrt{1 + (A\varphi)^2} dr.$$

Це є типовим диференціальним рівнянням другого порядку.

Руйнування в центрі настає при досягненні $\varepsilon_n = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right)$ певного значення $\varepsilon_n = \varepsilon_{hp}$. Величина

ε_{hp} визначається з досвіду при руйнуванні защемленої вм'ятини.

На завершення наведемо приклад розрахунку за наведеною вище аналітичною методикою, що описує закон руху круглої вм'ятини, защемленої по контуру, з урахуванням зміни товщини матеріалу під час динамічного пластичного деформування. Механічні характеристики матеріалу вм'ятини приймемо рівними: $\sigma_s = 30,4$ кг/мм², $D = 46$ кг/мм².

Розміри вм'ятини: $R_0 = 76$ мм, $h_0 = 1,2$ мм, початкова кінетична енергія вм'ятини $T = \frac{mV_0^2}{2} = 180$ кГм. Її величина дорівнює після закінчення деформування вм'ятини $T_0 = E_\phi$. У процесі деформування вм'ятини повинен дотримуватися закон збереження енергії $T_0 = E_{\phi i} + T_i = const$, де $E_{\phi i}$ і T_i – енергія формозміни та кінетична енергія вм'ятини в момент часу t_i . Величини $E_{\phi i}$ і T_i визначаються за допомогою рівнянь (2.29) та (2.24):

$$E_{\phi i} = \sigma_{se} \int_0^{R_0} \varepsilon_i 2\pi r h \sqrt{1 + \left(\frac{d\omega}{dr}\right)^2} dr + \frac{D}{2} \int_0^{R_0} \varepsilon_i^2 2\pi r h \sqrt{1 + \left(\frac{d\omega}{dr}\right)^2} dr, \quad (7)$$

$$T_i = \left(\frac{dA}{dt}\right)^2 \int_0^{R_0} \pi \rho h \sqrt{1 + \left(\frac{d\omega}{dr}\right)^2} \left[1 - \left(\frac{r}{R_0}\right)^2\right]^{2m} dr. \quad (8)$$

В процесі цих розрахунків визначаються для кожного A_i розподілу деформацій $\varepsilon_h, \varepsilon_\phi, \varepsilon_i$ у різних точках вм'ятини для даного моменту часу t_i . На рис. 3 представлено розподіл ε_i для різних прогинів A_i .

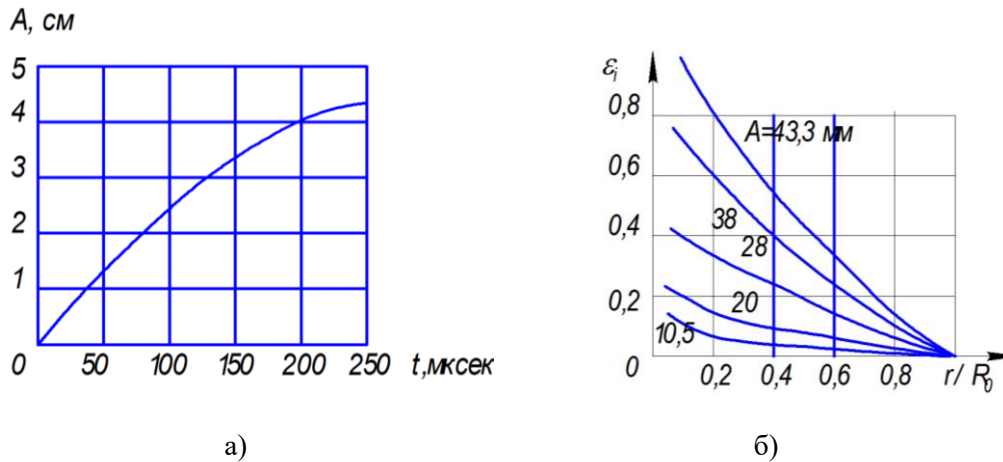


Рисунок 3 – Динамічні характеристики круглої вм'ятини: а) рівняння руху вм'ятини; б) зв'язок між радіусом та прогином
Джерело: розроблено авторами

Figure 3 – Dynamic characteristics of a circular dent: a) equation of motion of the dent; b) relationship between radius and deflection
Source: developed by the authors

Дана методика в деяких випадках може застосовуватися для приблизного аналізу мембранних датчиків, які фіксують вибухові хвилі у повітрі, воді або ґрунті, особливо коли час взаємодії мембрани із середовищем t_e , протягом якого передається основна частина енергії із середовища в мембрану, мало в порівнянні з часом деформування перешкоди t_d .

Спотворення цих ліній після досвіду дозволяє визначити кінцеві деформації $\varepsilon_r, \varepsilon_h$ в кожній точці мембрани і, отже, обчислити величину енергії формозміни. За прийнятих припущень

$$E_\phi = T_0 = \frac{MV_0^2}{2} = I_0 M, \text{ де } I_0 = K i_n S, \text{ якщо } R_q \gg R_0, \text{ и } I_0 = K \int_0^{R_0} i_n(R) ds, \text{ якщо } R \text{ порівняно з}$$

R_0 ; S – площа мембрани, M – маса мембрани, K – середній інтегральний коефіцієнт відображення,

$$K = \frac{I_0}{I_n}.$$

Величина відбитого питомого імпульсу дорівнює $i_0 = \int_0^{t_0} p_0(t) dt$. Тиск на перешкоді $p_0(t)$ може

мати складний характер. Так, наприклад, при взаємодії вибухової хвилі у воді з перешкодою спочатку йде процес відбиття ударної хвилі, і у разі тонкої перешкоди за дуже короткий час $t = 0$ (постійна часу) пластина розганяється до такої швидкості, що у воді виникають негативні напруження, які можуть призвести до розриву у рідині біля пластини.

При зіткненні транспортних засобів рівняння руху матеріалу вм'ятини сферичної форми має вигляд:

$$\rho \frac{du}{dt} - \frac{d\sigma_r}{dr} + 2 \frac{(\sigma_\phi - \sigma_r)}{r} = \frac{p_0}{\delta} S, \quad (9)$$

де ρ – щільність деформованого матеріалу;

u – швидкість матеріалу вм'ятини;

σ_r, σ_ϕ – радіальні та осьові напруження;

p_0 – тиск;

δ – товщина матеріалу облицювальної деталі транспортного засобу.

Пластини прямокутної форми широко використовуються в різних інженерних конструкціях, таких як капоти, двері, передні та задні крила автомобілів, елементи крила літаків, днища, палуби та бортові стінки суден, а також стінки суцільнометалевих вагонів тощо. Найчастіше вони виконують функцію обшивки, яка з'єднується з підкріплювальними ребрами жорсткості, утворюючи єдину конструктивну систему.

У таких конструкціях обшивка зазнає впливу локалізованих поперечних навантажень, наприклад, аеродинамічного тиску, а також бере участь у сприйманні основних силових впливів, що діють на всю конструкцію, зокрема від загального вигину або стиску листової частини. У багатьох випадках домінують саме основні зусилля, що спричиняють стискання, згин або зсув у площині пластини. За певних умов це може викликати втрату стійкості, що проявляється у вигляді витріщання або викривлення пластини (див. рис. 4).

У зв'язку з цим, розрахунок стійкості пластин є важливим етапом загального аналізу міцності та надійності всієї конструкції.

При визначенні критичних навантажень, коли розглядаються рівноважні стани, близькі до початкового, можна вважати, що напруження в серединній площині пластини, що виникають під час витріщання, є незначними порівняно з напруженнями вигину; також прогини пластини вважаються малими відносно її товщини. В окремих випадках допустиме застосування теорії жорстких пластин, яка нехтує напруженнями в серединній площині. Проте для аналізу поведінки пластини після досягнення критичного навантаження слід користуватися більш загальною теорією гнучких пластин, яка одночасно враховує напруження як у серединній площині, так і вигину.

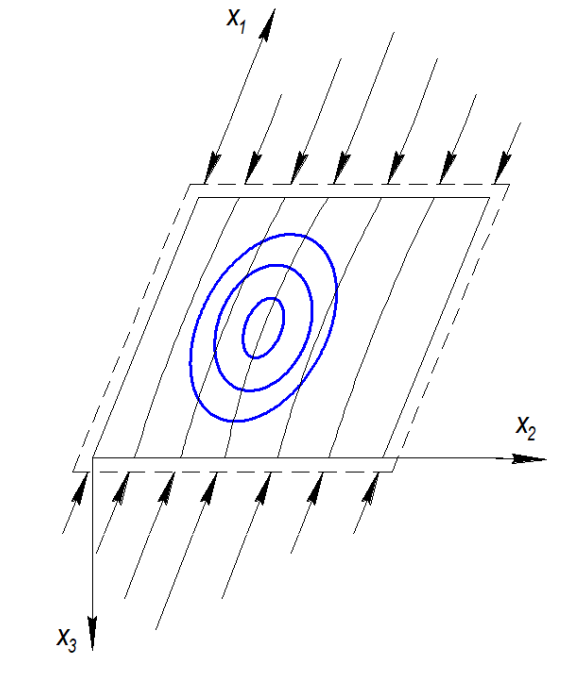


Рисунок 4 – Виступання частин конструкції автомобіля під впливом стиску, вигину та зсуву

Джерело: розроблено авторами

Figure 4 – Protrusion of vehicle structural parts under compression, bending and shear

Source: developed by the authors

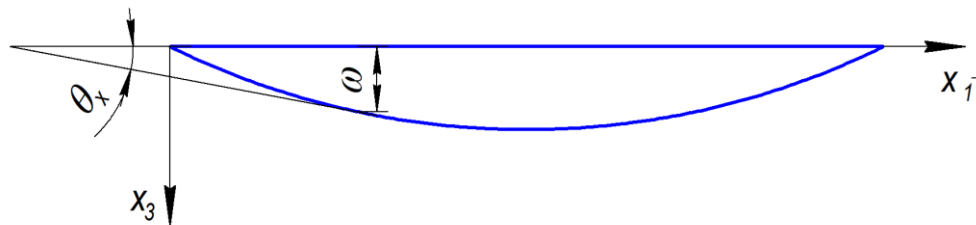


Рисунок 5 – Перетин зігнутої поверхні платівки

Джерело: розроблено авторами

Figure 5 – Cross-section of a curved surface of a plate

Source: developed by the authors

Координатна площина x_1x_2 збігається із серединною площиною пластинки; вісь x_1 будемо, як правило, проводитимемо вздовж довгої сторони, вісь x_2 – вздовж короткої сторони. Позначимо переміщення точок серединної поверхні вздовж осей x_1, x_2, x_3 через u, v, w .

Висновки. 1. Виявлено, що при визначенні умов і відновленні подій ДТП з використанням рівнянь і методів теорії пластичності необхідно враховувати вплив масових сил. Це змінює значення інваріантів тензора напружень і показника напруженого стану. Крім того, у фізичному законі вводиться залежність від швидкості деформацій.

2. Для визначення механічних властивостей матеріалів під час динамічних навантажень у ДТП доцільно застосовувати методи ударних випробувань на розтягування, стиснення та згинання, що дозволяє підвищити точність оцінки параметрів автомобілів у 1,5–1,6 раза.

3. Аналітично доведено необхідність врахування в часі не лише енергії деформації внутрішніх напружень, а й кінетичної енергії деформованих елементів конструкції. На початкових етапах зіткнення кінетична енергія пошкоджених елементів перевищує енергію деформації внутрішніх напружень у десятки разів.

Перелік посилань

1. Огородніков В. А., Сердюк В. Ф. Відновлення деталей машин методом пластичної формозміни. *Вісник ВПІ*. 1996. № 3. С. 58–62.

2. Огородніков В. А., Архіпова Т. Ф. Енергія деформації транспортних засобів в умовах дорожньо-транспортних пригод. *Наукові праці ВНТУ*. 2020. № 3. URL: <https://ntp.vntu.edu.ua/index.php/ntp/article/view/1234> (якщо це онлайн-видання, варто додати посилання).

3. Патент на корисну модель № 66462 А Україна, МПК6 G01N 19/00, G01N 33/20. Спосіб визначення швидкості транспортних засобів у момент зіткнення / Огородніков В. А. ; заявник і патентовласник Огородніков В. А. № 2003043308 ; заявл. 14.04.2003 ; опубл. 17.05.2004, Бюл. № 5.

4. Ogorodnikov V. A. The Physical Model of Motor Vehicle Destruction under Shock Loading for Analysis of Road Traffic Accident. *Proc. SPIE 10808. Photonics Application in Astronomy, Communications Industry and High-Energy Physics Experiments*. 2018. 186 p.

5. Макієнко О. М., Єщенко О. Д., Драгобецький В. В. Визначення показника напруженого стану заготовки при штампуванні вибухом по екстремальним значенням нормальних напружень. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства* : матеріали XXXI Міжнар. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених (Кременчук, 2024 р.). Кременчук : КрНУ, 2024. С. 113–115.

6. Огородніков В. А., Музичук В. І., Нахайчук О. В. Механіка процесів холодного формозмінення з однотипними схемами механізму деформації : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. 179 с.

7. Стеблюк В. І., Орлюк М. В., Холявік О. В. Визначення параметрів напружено-деформованого стану при витягуванні коробчастих деталей із заготовок, розрахованих методом потенціалу. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. 2012. № 46 (952). С. 98–101.

8. Драгобецький В. В. Розробка комбінованих методів вибухової металообробки як один з напрямків удосконалення деталей машин і агрегатів. *Наукові нотатки : міжвузівський збірник*. Луцьк, 2001. Вип. 9. С. 139–145.

9. Нахайчук О. В., Огородніков В. А., Музичук В. І., Деревенько І. А. Діагностування матеріалів для технічних експертиз і процесів обробки металів тиском. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2007. № 6. С. 102–110.

10. Музичук В. І., Войтенко В. В. Дослідження деформації кузовних деталей автомобіля при ДТП. *Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК* : матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. (Вінниця, 28–30 листоп. 2017 р.). Вінниця : ВНАУ, 2017. С. 96–100.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING PLASTIC DEFORMATIONS OF VEHICLE BODY PARTS DURING COLLISION

Dragobetskyi Volodymyr V., Dr. Sc. Tech., Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, kafedra.tehmash@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9637-3079>.

Moroz Mykola M., Dr. Sc. Tech., Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, mykolai.moroz@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6107-1230>.

Moloshtan Dmytro V., PhD, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, moloshtandima@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-8881-8541>.

Chernysh Andrii A., PhD, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, chernyshkrnu@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9711-827X>.

Nikitina Alyona V., PhD, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, nikaalyonka@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-0495-0604>.

Summary. The study is relevant because it aims to improve the accuracy of automotive technical expertise in road traffic accidents, which directly affects the objectivity of establishing collision circumstances and determining vehicle speed parameters. Existing methods for assessing plastic deformations of body parts are mainly based on static approaches that do not account for the dynamic nature of impact loads and the inertial properties of materials at the moment of collision. This leads to significant errors in determining the energy parameters of impact and reconstructing the mechanism of road traffic accidents.

The purpose of the study is to improve the method for describing the deformation and destruction processes of vehicle structural elements resulting from impact loads during collisions. The work aims to increase the accuracy and objectivity of automotive technical expertise by refining approaches to determining plastic deformations of vehicle body panels, taking into account modern requirements for road safety and the need for accurate reconstruction of traffic accident mechanisms.

Object of research – the process of public participation in project management.

Subject of research – regularities of plastic deformation of vehicle body parts, taking into account dynamic characteristics of materials, inertial properties, and energy balance of the system under collision conditions.

Research methodology. The study employs a comprehensive approach based on phenomenological theory, methods of deformable solid mechanics, and plasticity theory. For the mathematical modeling of material behavior under dynamic loading, Ritz analytical methods and the second-order Lagrange equations were applied. The methodology includes analysis of the system's energy balance, accounting for the work of external forces, stress intensity, degree of deformation, and material volume. The experimental part is based on impact tests (bending, tension, compression) to study the mechanical characteristics of metals in dynamic mode, particularly using the elastic rebound method to determine the hardness of deformed metal. Classification of body panels was also conducted according to curvature type and contour (single- and double-curvature elements, closed and open contours).

Keywords: automotive technical expertise, destruction, deformation, phenomenological theory, hardness, vehicles, road safety.

References

1. Ogorodnikov, V. A. and Serdiuk, V. F. (1996) *Restoration of machine parts by the method of plastic transformation*. Visnyk VPI. (3), pp. 58–62. [In Ukrainian].

2. Ogorodnikov, V. A. and Arkhipova, T. F. (2020) *Deformation energy of vehicles in road traffic accidents*. Naukovi pratsi VNTU. (3). Available at: <https://ntp.vntu.edu.ua/index.php/ntp/article/view/1234> (Accessed: 03.05.2026). [In Ukrainian].

3. Ogorodnikov, V. A. (2004) *Method for determining the speed of vehicles at the moment of collision*. Utility model patent No. 66462 A Ukraine, IPC G01N 19/00, G01N 33/20. Applicant and patent holder: Ogorodnikov V. A. No. 2003043308; appl. 14.04.2003; publ. 17.05.2004, Bul. No. 5. [In Ukrainian].

4. Ogorodnikov, V. A. (2018) *The Physical Model of Motor Vehicle Destruction under Shock Loading for Analysis of Road Traffic Accident*. Proc. SPIE 10808. Photonics Application in Astronomy, Communications Industry and High-Energy Physics Experiments. 186 p.
5. Makiienko, O. M., Yeshchenko, O. D. and Drahobetskyi, V. V. (2024) *Determination of the stress state index of the workpiece during explosive stamping by extreme values of normal stresses*. In: Actual problems of society's vital activity: Proceedings of the XXXI International Scientific and Practical Conference of students, graduate students and young scientists. Kremenchuk: KrNU, pp. 113–115. [In Ukrainian].
6. Ogorodnikov, V. A., Muzychuk, V. I. and Nakhaichuk, O. V. (2007) *Mechanics of cold transformation processes with typical deformation mechanism schemes: monograph*. Vinnytsia: Universum-Vinnytsia. 179 p. [In Ukrainian].
7. Stebliuk, V. I., Orliuk, M. V. and Kholiavik, O. V. (2012) *Determination of stress-strain state parameters during drawing of box-shaped parts from workpieces calculated by the potential method*. Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. (46), pp. 98–101. [In Ukrainian].
8. Drahobetskyi, V. V. (2001) *Development of combined methods of explosive metal processing as one of the directions for improving machine parts and units*. Naukovi notatky: Interuniversity collection. (9). Lutsk, pp. 139–145. [In Ukrainian].
9. Nakhaichuk, O. V., Ogorodnikov, V. A., Muzychuk, V. I. and Derevenko, I. A. (2007) *Diagnostics of materials for technical expertise and metal pressure processing*. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. (6), pp. 102–110. [In Ukrainian].
10. Muzychuk, V. I. and Voitenko, V. V. (2017) *Investigation of deformation of car body parts in road accidents*. In: Modern problems of production, processing of agricultural products, mechanical engineering and energy systems of agro-industrial complex: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Technical Conference. Vinnytsia: VNAU, pp. 96–100. [In Ukrainian].

Дата надходження до редакції 11.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 09.02.2026.