

УДК 621.7

DOI 10.31891/2307-5732-2020-285-3-17

І. Ю. КИРИЦЯ

Вінницький національний технічний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ ПРИ ПРОНИКНЕННІ ІНДЕНТОРА В ПЛАСТИЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ

В роботі запропоновано визначення енергетичних витрат при проникненні індентора в пластичне середовище (броньовану сталь). Наведено приклад розрахунку енергетичних витрат при проникненні твердого індентора (кулі) через пластину певної товщини з броньованої сталі марки 45Х2НМФБА.

Уточнено розрахунок коефіцієнту опору середовища броньованих сталей та отримано залежність, яка враховує падіння швидкості руху індентора в середовищі, що зміцнюється.

Базуючись на підходах наведених в феноменологічній теорії деформування запропоновано визначення деяких характеристик напружено-деформованого стану як в статичних так і динамічних умовах.

Використовуючи функції (крива течії, діаграма пластичності), що формують технологічний паспорт матеріалу та враховуючи зміцнення матеріалу визначено питому потенціальну та енергію деформування.

Використовуючи залежності отримані в даній роботі розробники на стадії проектування зможуть надавати рекомендації при побудові технологічних процесів виготовлення елементів та конструкцій бронезахисту належної якості.

Ключові слова: теорія деформування, енергетичні витрати, енергія деформування, питома потенціальна енергія деформування, броньована сталь.

I. KYRYTSYA

Vinnytsia national technical University

DETERMINATION OF ENERGY COSTS WHEN THE INDENTOR PENETRATES IN A PLASTIC MEDIUM

In this paper the determination of energy costs during the penetration of the indenter into the plastic medium (armored steel) is proposed. An example of calculation of energy costs during the penetration of a solid indenter (bullet) through a plate of a certain thickness of armored steel grade 45H2NMFBA is presented.

The calculation of the resistance factor of the medium of the armored steels is refined and the dependence which takes into account falling of speed of movement of an indenter in the strengthened medium is received.

Based on the approaches presented in the phenomenological theory of deformability, it is proposed to determine some characteristics of the stress- determination state in both static and dynamic conditions.

Using the functions (flow curve, plasticity diagram) that form the technological passport of the material and taking into account the strengthening of the material, the specific potential and deformation energy are determined.

Using the dependences obtained in this work, the developers at the design stage will be able to provide recommendations for the construction of technological processes for the manufacture of elements and structures of armor of proper quality.

Keywords: deformability theory, energy costs, deformation energy, specific potential deformation energy, armored steel.

Феноменологічна теорія деформування металів, дає можливість знаходження ступеня деформації (накопиченої до моменту руйнування інтенсивності деформації) в умовах складного немонотонного деформування і дозволяє оцінювати граничну формозміну заготовок оброблюваних тиском, а також знаходити енергію деформування в задачах технічних експертиз.

Визначення енергетичних витрат або ж енергії деформування і руйнування засобів в умовах динамічних навантажень, полягає в оцінці напружено-деформованого стану на кожній стадії обробки тиском і на подальших етапах динамічного деформування.

При визначенні енергії пластичного деформування найбільш доступно для застосування є методика оцінки питомої потенційної енергії деформування елементів конструкцій методом твердості, яка враховує вплив пластичного деформування у процесі виготовлення елемента.

Визначення енергії пластичного деформування значно ускладнюється у випадку руйнування досліджуваних елементів конструкції, коли неможливо виміряти твердість безпосередньо зруйнованого металу.

Визначення енергії пластично деформованих тіл базується на принципах феноменологічної теорії деформування металів [1]. Для визначення енергії необхідно мати у своєму розпорядженні механічні характеристики матеріалу пошкоджених елементів у вигляді спеціальних функцій, які формують технологічний паспорт матеріалу, серед яких – крива течії та діаграма пластичності. Зазначені функції були отримані та апроксимовані в роботі [2].

В роботах [1, 3–5] розроблений алгоритм розрахунку енергії пластичного деформування, що дозволяє визначати енергію пластичного деформування як у технологічних процесах обробки металів тиском, так і при деформуванні конструкцій в результаті ударів о перешкоди.

Метою роботи є визначення енергетичних витрат, а саме питомої потенційної та енергії деформування при проникненні індентора в броньовану сталь (як в статичних так і динамічних умовах) та уточнення розрахунку коефіцієнту опору середовища броньованих сталей, а також отримання залежностей, які дозволять в подальшому надавати рекомендації при побудові технологічних процесів виготовлення елементів (конструкцій) бронезахисту.

Розглянемо алгоритм розрахунку енергетичних витрат на проникнення індентора в середовище, що пластично деформується. Слідуючи роботі [1], в якій розроблено феноменологічний підхід для визначення

енергії деформування, витраченої на деформацію і руйнування транспортних засобів, питому потенційну енергію визначають інтегруванням функції зміцнення металів, де верхня межа інтеграла може бути визначена експериментально.

Використаємо цей підхід до вирішення задачі для визначення коефіцієнта опору середовища при проникненні в нього твердого індентора.

В роботі [2] сформовано карту матеріалу для броньованої сталі марки 45Х2НМФБА, що враховує ізотропне зміцнення, яка включає криву течії в координатах «інтенсивність напружень σ_u , інтенсивність деформацій e_u » і діаграму пластичності в координатах «граничний ступінь накопиченої інтенсивності деформацій до моменту руйнування e_p , показник напруженого стану η ».

Крива течії, яка не залежить від виду напруженого стану в координатах σ_u – інтенсивність напружень

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (1)$$

та e_u – інтенсивність деформацій

$$e_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}, \quad (2)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження,

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – головні деформації.

Як зазначалось, з метою використання кривої течії в розрахунках, її представляють у вигляді степеневі функції

$$\sigma_u = A e_u^n, \quad (3)$$

але при динамічних навантаженнях швидкість деформацій впливає на здатність матеріалів до зміцнення.

Використовуючи модель матеріалу, чутливу до різних швидкостей деформування, розроблену в роботі [1], наведемо формулу, що апроксимує криву течії в умовах прояву швидкісного ефекту:

$$\sigma_u = A_v e_u^{n_v}, \quad (4)$$

де A_v і n_v відповідно дорівнюють

$$A_v = A \left[1,045 + \frac{\ln(0,0027 + \dot{\varepsilon}_u)}{135} \right] \quad (5)$$

$$n_v = n \exp[-0,1273 \ln(1 + \dot{\varepsilon}_u)]. \quad (6)$$

В формулах (4), (5) і (6) A_v – коефіцієнт апроксимації кривої течії, що враховує вплив швидкості деформування, $\dot{\varepsilon}_u$ – швидкість інтенсивності деформацій, n_v – показник степені, що враховує вплив швидкості деформування.

Питому потенціальна енергія деформування отримується шляхом інтегрування виразу:

$$W_{num} = \int_0^{e_u^*} \sigma_u de_u, \quad (7)$$

Після підстановки (4) в (7), отримаємо:

$$W_{num} = \int_0^{e_u^*} A e_u^n de_u = A \int_0^{e_u^*} e_u^n de_u = \frac{A e_u^{n+1}}{n+1}. \quad (8)$$

Енергія деформування визначається за формулою:

$$W_{def} = W_{num} V_{def}, \quad (9)$$

де V_{def} – об'єм охоплений пластичною деформацією визначається за формулою

$$V_{def} = \frac{\pi d_i^2}{4} h_i, \quad (10)$$

d_i – поточний діаметр пластичної хвилі;

h_i – поточна товщина пластини.

Тоді

$$W_{def} = W_{num} \frac{\pi d_i^2}{4} h_i. \quad (11)$$

Для визначення коефіцієнта опору середовища броньованих сталей врахуємо, що на індентор (кулю, снаряд), що рухається в броньованій сталі діє сила опору, яка пропорційна швидкості ($R = k \dot{x}$), а також базуючись на принципах запропонованих в роботі [1] справедливим буде запис:

$$R = k \dot{x} = \frac{W_{def}}{h_i} \quad (12)$$

Таким чином, коефіцієнт опору середовища броньованих сталей визначається:

$$k = \frac{W_{def}}{h_i \dot{x}} = \frac{W_{def}}{h_i v_{def}} \quad (13)$$

де v_{def} – швидкість проходження індентора (від v_0 до v_1) в середовищі, що зміцнюється.

Падіння швидкості руху індентора в середовищі (броньована сталь), що зміцнюється визначимо за формулою

$$v_{def} = v_0 \exp\left(\frac{h_i}{h_0} \ln \frac{v_0}{v_1}\right) \quad (14)$$

Наведемо приклад розрахунку енергетичних витрат при проникненні твердого індентора (кулі калібру 7,62 мм автомата АКМ) через пластину товщиною $h = 5,5$ мм з броньованої сталі [6], у якій наступні механічні характеристики: $\sigma_b = 1700$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1550$ МПа, показник степені у формулі (3.3) $n = 0,23$, коефіцієнт зміцнення $A = 2893$ МПа, швидкість кулі $v_0 = 700$ м/с, $\dot{\epsilon}_u = 7825$ с⁻¹.

Розрахунок коефіцієнтів A_v і n_v за формулами (5) і (6) відповідно дає $A_v = 3215$ МПа і $n_v = 0,0783$.

В статичних умовах при деформації, наприклад, $e_u = 0,6$, інтенсивність напружень $\sigma_u = 2572$ МПа, а в динамічних $\sigma_u = 3089$ МПа. Отже, в динамічних умовах при $e_u = 0,6$, σ_u зростає в 1,2 рази, а питома потенційна енергія (W_{num}) в 1,15 рази.

Об'єм, охоплений пластичною деформацією, визначимо приймаючи об'єм $V_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} h_0$ плюс об'єм зміцненої зони (пластичної хвилі).

Слідуючи роботі [7] при впровадженні сферичного наконечника в пластичне середовище:

$$d_i = d_0 + \frac{d_0}{2} \quad (15)$$

В нашому випадку d_0 – діаметр індентора (кулі), $d_0 = 7,62$ мм, відповідно

$$d_i = 7,62 + \frac{7,62}{2} = 11,43 \text{ мм} = 1,143 \text{ см.}$$

При обчисленні питомої енергії за формулою (8), необхідно знати величину деформації, при якій сталося руйнування металу в умовах зсуву з накладенням гідростатичного тиску.

В роботі [8] наведено експериментальні результати оцінки граничних деформацій, що залежать від безрозмірних показників напруженого стану

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u} \quad (16)$$

При впровадженні індентора в пластичне середовище найбільше значення в момент руйнування показник $\eta = -1,73$ [8].

Використовуючи апроксимацію діаграм пластичності, наведену в роботі [2], для броньованої сталі в нашому випадку $e_p(\eta = -1) = 1$ – стиск, $e_p(\eta = 0) = 0,65$ – зсув, $e_p(\eta = 1) = 0,65$ – розтяг, $\lambda = 0,431$, тоді $e_p = 1,37$. Підставив $e_p = 1,37$ у формулу (8) отримаємо $W_{num} = 4187$ МПа.

Енергію деформування розраховуємо за формулою (11), причому h_i визначається з умови постійності об'єму $V_0 = V_{def}$ або

$$\frac{\pi d_0^2}{4} h_0 = \frac{\pi d_i^2}{4} h_i \quad (17)$$

звідки

$$h_i = \frac{d_0^2 \cdot h_0}{d_i^2} = \frac{7,62 \cdot 5,5}{11,34} = 2,44 \text{ мм} = 0,244 \text{ см} . \quad (18)$$

Тоді

$$V_{def} = \frac{\pi d_i^2}{4} h_i = \frac{\pi \cdot 11,43^2}{4} \cdot 2,44 = 250 \text{ мм}^3 = 0,25 \text{ см}^3 . \quad (19)$$

Енергія деформування:

$$W_{def} = W_{num} V_{def} = 4187 \cdot 0,25 = 1046,75 \text{ Дж} . \quad (20)$$

При конструюванні і виготовленні сучасних броньованих елементів захисту актуальним постає питання створення найбільш безпечних засобів, які при експлуатації, наприклад, в результаті потрапляння кулі або снаряду в броньований елемент (бронешилети, броньові пластини для бронетехніки) забезпечать максимальний захист людині.

Безпека конструкцій може бути досягнута і створенням конструкцій, міцність і жорсткість яких керована і прогнозована на стадії проектування і виготовлення. Керованість міцності і жорсткості елементів конструкції забезпечується параметрами процесів обробки тиском і вибором технологій, які забезпечують сприятливу технологічну спадковість – залишкові напруження, деформаційне зміцнення і його напрям, твердість деформованого металу, градієнт деформацій і інші чинники. Перераховані параметри технології створюють «пам'ять матеріалу», яка забезпечує керованість міцністю і жорсткістю елементів конструкції. При створенні цього алгоритму розрахунку технологічних параметрів виготовлення елементів захисних конструкцій необхідно знати енергетичні витрати, які очікуються при динамічних навантаженнях у різних напрямках.

Питання визначення енергії пластичного деформування в технологічних процесах обробки металів тиском, пов'язаних з формозміною матеріалу, важливе і актуальне. Його вирішення дає змогу розраховувати енерговитрати обладнання на процеси пластичного деформування. За відомими геометричними розмірами деталі, що виготовляється, можливо також визначити зусилля деформування. Відома енергія пластичного деформування деталі при технологічному процесі виготовлення у сукупності з інформацією про геометричні розміри деталі, дають повне уявлення про енергосилові параметри процесу. Разом з тим, енергія деформування, поглинута елементом захисної конструкції внаслідок удару, є одним із важливих параметрів технологічної спадковості відповідного елемента конструкції.

Висновки. В цій роботі, на основі феноменологічної теорії деформуєміст визначено питому потенціальну енергію та енергію деформування, що затрачена на проникнення індентора (кулі) в броньовану сталь марки 45Х2НМФА. Базуючись на підходах наведених в феноменологічній теорії деформуєміст запропоновано визначення деяких характеристик напружено-деформованого стану як в статичних так і динамічних умовах.

Уточнено розрахунок коефіцієнту опору середовища броньованих сталей та отримано залежність, яка враховує падіння швидкості руху індентора в середовищі, що зміцнюється.

Крім того, розглянуто сучасні феноменологічні підходи, які дозволять інженерам-конструкторам та інженерам-технологам ще на стадії проектування створювати безпечні елементи бронезахисту.

Література

1. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) : [монография] / Огородников В.А., Киселев В. Б., Сивак И. О. – В. : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005. – 204 с.
2. Кириця І. Ю. Особливості формування технологічного паспорту матеріалу для броньованої сталі // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 2. – С. 68-71 (DOI 10.31891/2307-5732-2020-283-2-68-71).
3. Кириця І.Ю. Особливості розрахунку параметрів напружено-деформованого стану та побудови діаграм пластичності в зоні локалізації деформації під час розтягу циліндричних зразків // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 2. – С. 101 – 107.
4. Огородников В. А. Диагностика материалов в задачах технологической механики и автотехнических экспертизах / Огородников В. А., Перлов В. Е., Кириця И. Ю. // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія: «Машиностроение». – 2008. – № 52. – С. 21–26.
5. Огородников В. А. Механіка процесів холодного пластичного деформування вісесиметричних заготовок з глухим отвором : [монография] / Огородников В. А., Кириця І.Ю., Перлов В.Є. – Вінниця: – ВНТУ, 2015 – 164 с.
6. Частные вопросы конечной баллистики / Григорян В. А., Белобородько А.Н., Дорохов Н.С. и др. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 591 с.: ил. – ISBN 5-7038-2798-1.
7. Дель Г.Д. Технологическая механика / Дель Г.Д. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
8. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / Огородников В. А. – К.: Вища школа. Головное изд – во, 1983. – 175 с.

References

1. Ogorodnikov V. A. Energiya. Deformaczi. Razrushenie (zadachi avtotehnicheskoy e`kspertizy) : [monografiya] / Ogorodnikov V. A., Kiselev V. B., Sivak I. O. – V. : UNI VERSUM–Vi`nniczya, 2005. – 204 s.
2. Kyrytsia I. Yu. Osoblyvosti formuvannia tekhnolohichnoho pasportu materialu dlia bronovanoi stali // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2020. – № 2. – S. 68-71 (DOI 10.31891/2307-5732-2020-283-2-68-71).
3. Kyrytsia I.Iu. Osoblyvosti rozrakhunku parametriv napruzhenno-deformovanoho stanu ta pobudovy diahram plastychnosti v zoni lokalizatsii deformatsii pid chas roztiahu tsylindrychnykh zrazkiv // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2014. – № 2. – S. 101 – 107.
4. Ogorodnikov V. A. Diagnostika materialov v zadachakh tekhnologicheskoy mekhaniki i avtotehnicheskikh e`kspertizakh / Ogorodnikov V. A., Perlov V. E., Kiricza I.Yu. // Vi`snik Naczi`onal`nogo tekhnichnogo uni`versitetu Ukraini "KPI". Seri`ya: "Mashinostroenie" – 2008 - № 52. – S. 21-26.
5. Ohorodnykov V. A. Mekhanika protsesiv kholodnoho plastychnoho deformuvannia visesymetrychnykh zahotovok z hlukhym otvorom : [monohrfyia] / Ohorodnykov V. A., Kyrytsia I.Iu., Perlov V.Ie. – Vinnytsia: – VNTU, 2015 – 164 s.
6. Chastny`e voprosy` konechnoj ballistiki / Grigoryan V. A., Beloborod`ko A.N., Dorokhov N.S. i dr. – M. : MGТУ im. N. E. Baumana, 2006. – 591 s.: il. – ISBN 5-7038-2798-1.
7. Del` G.D. Tekhnologicheskaya mekhanika / Del` G.D.– M.: Mashinostroenie, 1978. – 174 s.
8. Ogorodnikov V.A. Ocenka deformiruemosti metallov pri obrabotke davleniem/ Ogorodnikov V. A. – K.: Vishha shkola. Golovnoe izd – vo, 1983. – 175 s.

Надійшла / Paper received: 20.04.2020

Надрукована / Paper Printed : 02.06.2020