

САФАРОВ Елман Гасанбей огли,

канд. техн. наук,

доцент кафедри автомобільного транспорту

та сучасної інженерії,

Відкритий міжнародний університет розвитку людини

«Україна»

ORCID ID: 0000-0002-4584-5539

ПОВЕДІНКА МАТЕРІАЛІВ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

З метою вивчення закономірностей зміни опору конструкційних матеріалів деформуванню та руйнуванню в діапазонах швидкості деформації $10^4 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$ розроблено методи механічних випробувань матеріалів при різних видах високошвидкісного навантаження та створено спеціальне обладнання¹. Швидкості навантаження до 20 м/с реалізуються при випробуваннях на вертикальних копрах вільно падаючим вантажем, швидкості до 500 м/с і вище – на пневмопороховому копре. Нижче описано методики досліджень, обладнання, а також наведено деякі результати експериментів.

Пневмопорохові копри дозволяють проводити випробування матеріалів при швидкостях зіткнення до 1000 м/с, що викликає виникнення в зразках ударних хвиль навантаження².

Випробування проводяться в режимі постійної швидкості деформації ($\dot{\epsilon} = \text{const}$) з лінійним її наростанням в початковий період навантаження: при високошвидкісному деформуванні на пневмопорохових копрах енергія ковадла набагато перевищує роботу руйнування зразка і тому процес деформування зразка повністю контролюється рухом ковадла і не переривається відскоками бойка. Схема копра для динамічних випробувань на розтяг, пробій, зріз та ін. наведена на рис. 1.

Зразок 15, з'єднаний з динамометром 12, знаходиться в жорсткій трубі 9, встановленій в стволі 11. Один кінець труби закріплений в розподільнику повітря 2, а на іншому зафіксовано ковадло 16, за допомогою якого труба

1 Стрижало В. О., Бородій М.В. Експериментальні методи в механіці деформівного твердого тіла. Навчальний посібник. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2022. 306 с.

2 Степанов Г.В. Пружнопластичне деформування матеріалів під впливом імпульсних навантажень. Київ : Наук. думка, 1979. 268 с.

центрується щодо осі каналу ствола. Навантажуючий бойок-снаряд 13 розганяється по каналу ствола стисненням газом і при польоті не стикається з трубою 9, призначеної для захисту розміщених на динамометрі датчиків з кабелями від впливу газів, що розганяють. Вузол навантаження зі зразком розміщені у вакуумній камері копра, яка складається з двох частин. Стационарна частина камери 10, має кабельні вводи для з'єднання укріплених на динамометрі 12 датчиків з реєструючою апаратурою, укріплена нерухомо на станині 1. Рухлива частина камери 18 може відкочуватися по станині, відкриваючи вільний доступ до вузла кріплення зразка. За допомогою перехідного фланця зі стоволом з'єднана камера стисненого повітря 8. Повітря в камеру надходить від балона 5 через вентиль 4 і після досягнення в ній необхідного тиску руйнує діафрагму 3 і розганяє бойок, який при вильоті зі ствола вдаряє по ковадлу і руйнує зразок.

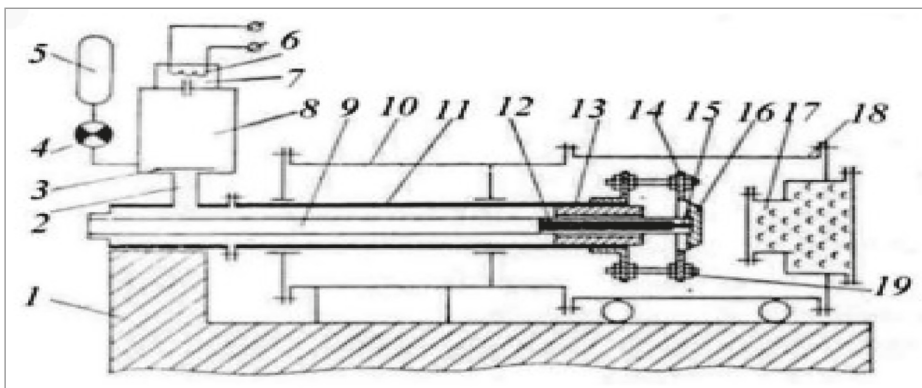


Рис. 1. Схема пневмопорохового копра

Швидкість польоту бойка перед зіткненням визначається за допомогою двох електричних контактів, один з яких вводиться в ствол на певній відстані від його кінця, а другий встановлюється поблизу поверхні зіткнення. При русі бойок замикає по черзі обидва контакти, сигнали від яких надходять на пуск та зупинку частотоміра.

Перед випробуваннями в камері створюється розрідження. Розгін бойка стисненим повітрям дозволяє проводити дослідження при швидкостях від 50 м/с до 300 м/с. Для отримання більш високих швидкостей тиск підвищують, спалюючи в камері 7 порох, який займається за допомогою електроспіралі 6. Після руйнування зразка його уламки разом з ковадлом і бойком потрапляють у уловлювач 17. У

зв'язку з істотним впливом на результати випробувань неплосчинності удару при підготовці випробувань особлива увага повинна приділятися дотриманню паралельності поверхонь пластин, що зіштовхуються.

У копрах для імпульсного навантаження плоскою хвилею можна отримувати швидкості зіткнення пластин від 10 до 1000 м/с.

Вище розглянуті системи силованаантаження забезпечують збудження в об'єктах дослідження таких швидкісних та імпульсних (ударних) навантажень, які дозволяють формувати необхідні режими випробувань ($\sigma = \text{const}$ і $\varepsilon = \text{const}$), досліджувати напружено-деформований стан і визначати характеристики міцності та пластичності.

Пробій.

З метою визначення опору конструкційних матеріалів пробиванню при високих швидкостях розроблено методику (рис. 2) безперервної реєстрації зусилля в пружно деформується бойку при його взаємодії з перешкодою³. Випробування проводилися на пневмопороховому копрі.

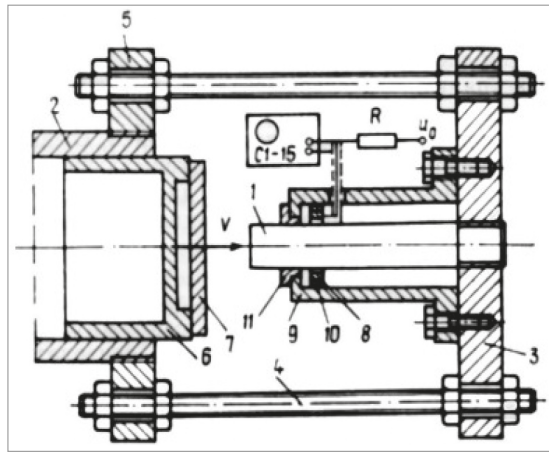


Рис. 2. Схема динамічних випробувань на пробій

Сталевий стрижневий боек діаметром 10 мм 1 з плоским торцем закріплювали поблизу дульного зрізу ствола 2 у тримачі 3, з'єднаному шпильками 4 з фланцем 5 на кінці ствола балістичної установки. Складку

3 Вщенко А.П., Степанов Г.В., Сафаров Е.Г. Динамічний опір конструкційних матеріалів зрізу / *Проблеми міцності*. 1987. № 2. С. 45-47; Вщенко А.П., Степанов Г.В. Методика вимірювання деформацій у стрижнях ємнісним тензодатчиком / *Проблеми міцності*. 1975. № 12. С. 104-105; Степанов Г.В., Сафаров Е.Г. Перфорація тонкої пластини ударом стрижня з плоским торцем / *Проблеми міцності*. 1988. № 6. С. 62-66; Степанов Г.В., Сафаров Е.Г. Імпульс сил при пробитті тонких пластин / *Проблеми міцності*. 1988. № 10. С. 95-98.

6 з легкого сплаву діаметром 64 мм із закріпленою на ньому пластиною 7 (зразок) з досліджуваного матеріалу розганяли по каналу ствола установки до заданої швидкості і завдавали удару по бойку. Зусилля пробивання розраховували за деформацією бойка, що реєструється за допомогою ємнісного тензодатчика при розповсюдженні пружної хвилі навантаження від його впровадженної частини.

Ємність датчика утворена бічною поверхнею бойка і латунним кільцем 8 з внутрішнім діаметром 12,5 мм і шириною 5 мм, закріпленим у втулці 9 за допомогою ізолюючого кільця 10. За допомогою шаблону бойок встановлювали по осі каналу ствола копра, що забезпечувало паралельність і співвісність поверхонь зразка і бойка. Типові осцилограми взаємодії стрижня з пластиною та форми вибитих пробок наведено на рис. 3 та рис. 4.

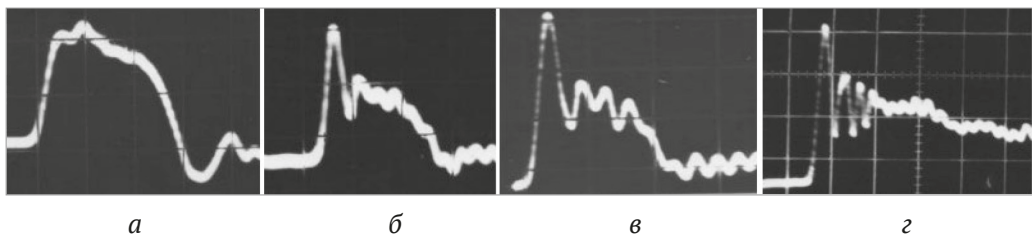


Рис. 3. Типові осцилограми взаємодії стрижня з конічною ($2a=1700$) (а, б, в) та плоскою головною частиною з пластиною товщиною 6 мм при швидкості удару 112 м/с (а), 141 м/с (б), 170 м/с(в), 84 м/с (г)

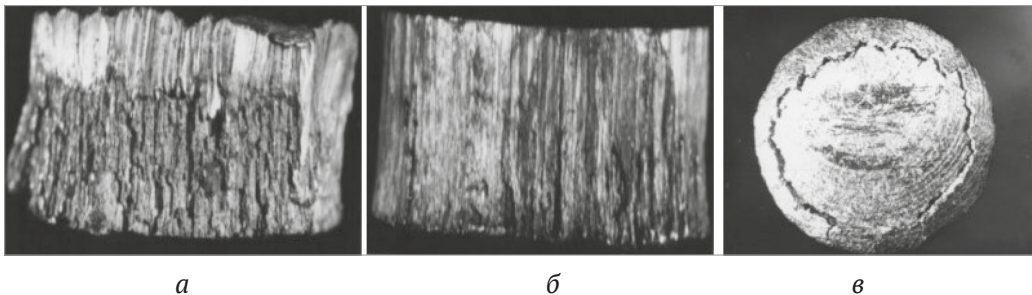


Рис. 4. Бічні (а, б) та тильна (в) поверхні пробок, вибитих з дюралюмінієвої пластины товщиною 4,9 мм: а- $v_0 = 145$ м/с, б- $v_0 = 167$ м/с, в- $v_0 = 80$ м/с

На рис. 5 наведено залежність опору деяких металів пробиванню від швидкості взаємодії.

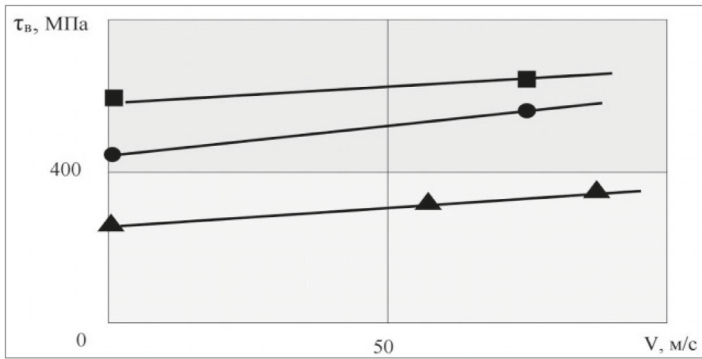


Рис.5. Залежність опору металів пробиванню від швидкості взаємодії

Зріз.

Для визначення характеристик міцності матеріалів при динамічному зрізі по реєстрованому зусил्लю взаємодії пластини зі стрижнем з плоским торцем необхідно виключити попередньої деформації за рахунок хвильових процесів описаних в роботах⁴. З цією метою розроблено методику, яка описана в роботі⁵ (рис. 6).

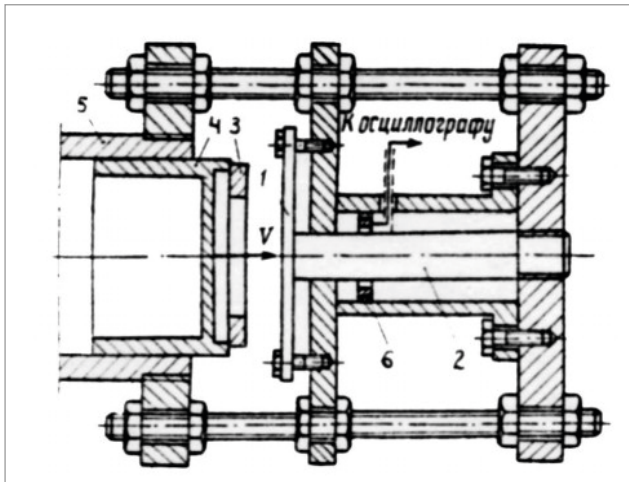


Рис.6. Схема експерименту

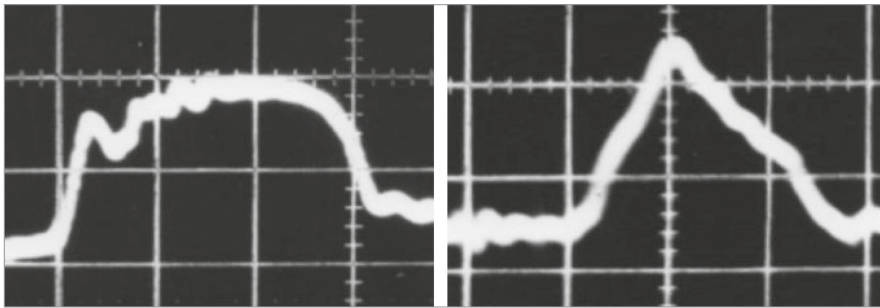
Випробувана пластина 1 кріпиться до бойка 2 без зазору, що виключає їх зіткнення. Навантаження проводиться осесиметричним ударом кільця 3, закріпленого на склянці 4, який розганяється по каналу ствола

4 Степанов Г.В., Сафаров Е.Г. Перфорация тонкой пластины ударом стрижня с плоским торцем / Проблемы прочности. 1988. № 6. С. 62-66; Степанов Г.В., Сафаров Е.Г. Импульс сил при пробитии тонких пластин / Проблемы прочности. 1988. №10. С. 95-98.

5. Сафаров Е.Г. Опір металів динамічному зрізу / Проблемы прочности. 1988. № 8. С. 121-123.

5 до заданої швидкості. Товщини та акустичні жорсткості кільця та пластини однакові, що призводить до практично повної передачі енергії (імпульсу) кільця пластині при першому зіткненні, виключаючи вторинний удар по пластині.

Рухаюча пластина впливає на бойок, в результаті чого відбувається її зріз з вибиванням пробки, діаметр якої приблизно дорівнює діаметру бойка. За допомогою ємнісного датчика б реєструється осцилограма “зусилля – час” (рис. 7).



а

б

Рис. 7. Типові осцилограми процесу зрізу зразків із сталі Ст.3:
а – $v = 64$ м/с, б – $v = 243$ м/с

На рис. 8 показана зміна напруження зрізу $\tau_{\text{в}}$ від швидкості взаємодії.

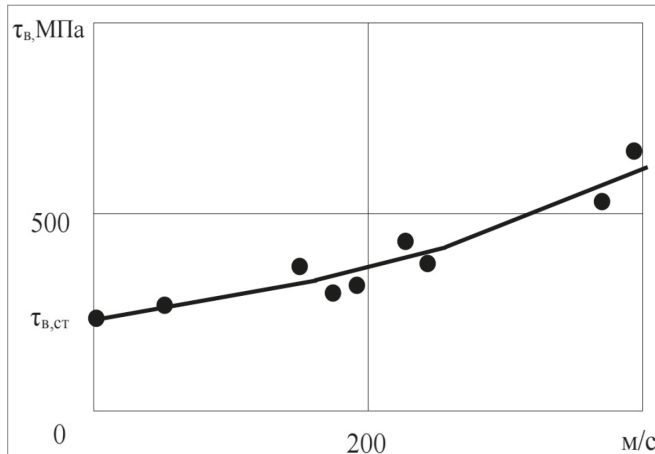


Рис. 8. Залежність опору зрізу сталі Ст.3 від швидкості удару

Залежність коефіцієнта динамічності K_d (відношення динамічного напруження зрізу $\tau_{\text{в}}$ до статичного $\tau_{\text{в,ст}}$) від швидкості зіткнення наведено на рис. 9.

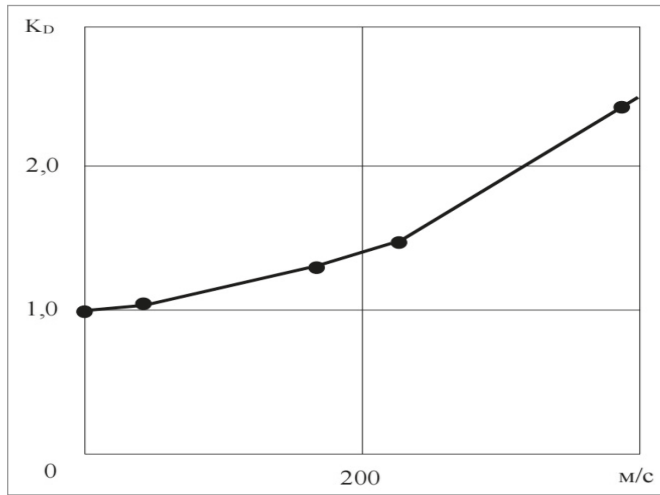


Рис. 9. Залежність коефіцієнта динамічності K_d сталі Ст.3 від швидкості удару

Отримані дані показують значний вплив швидкості деформування на характеристики міцності випробуваних матеріалів, що необхідно враховувати в конструкторських розрахунках.

DOI: 10.51587/9798-9917-51926-2025-023-231-237