

Куриляк В. В.

ОЦІНКА ЯКОСТІ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ В УМОВАХ ВИСОКОШВИДКІСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Практично досліджено процес поведінки параметрів матеріалів в умовах високошвидкісного навантаження. Встановлено, що феритно-перлитні сталі мають низьку відкольну міцність, а мартенситні сталі — високу. Доведено, що зі збільшенням швидкості деформації відкольна міцність зростає для сталей. Визначені параметри опору матеріалу відколу і витрати енергії на розпорошення уламків при взаємодії ударника і поверхні матеріалу.

Ключові слова: високошвидкісне навантаження, відкольна міцність, ударник, мішень.

1. Вступ

Імпульсивний ударний вплив на конструкцію викликає складний напружений стан, кінцевою стадією якого є руйнування. Особливістю умов роботи матеріалів є одночасний прояв декількох видів руйнувань, механізми яких суттєво відрізняються. Опір матеріалу по видам навантаження і механізмам руйнування при імпульсивному навантаженні описується визначеними характеристиками, котрі пов'язують зовнішні навантаження і навантаження, котрі виникають в матеріалі. До них відносять: опір загальної деформації, котрий визначається ударною в'язкістю, яка у сталей є вищою ніж і у титана та алюмінію; опір «зрізу пробки», котрий є пропорціональний границі міцності (наприклад, $0,5 Q_1$) і є найбільшим у сталей; опір відколу, котрий визначається межею міцності і розподіленням дефектів на площині, котра є перпендикулярною розповсюдженню головної складової удару і як відомо залежить від динамічної в'язкості руйнування; енергія утворення кратеру імовірно пропорціональна динамічній границі міцності; при імпульсивному ударному навантаженні частина енергії переходить в теплоту, і як результат, (якщо матеріал залишається в пластичному стані) межа міцності і ударна в'язкість знижуються, а пластичність зростає; в'язкість при невисокій температурі може зростати, а потім знижуватися [1–3].

В загальному вигляді високошвидкісний удар та вибух можуть призвести до різних ефектів: в напрямку, зворотньому розповсюдженню ударної хвилі і утворенню кратера при закритих локальних деформаціях в середку контакту і переході матеріалу в гідродинамічний, турбулентний режим; пружно-пластична деформація з можливими фазовими перетвореннями, котра призводить до режиму з можливими фазовими природженнями, які в свою чергу утворюють режим пластичної течії по товщині в розрізі плями контакту; виникнення хвиль розвантаження із-за відображення ударних хвиль від вільних поверхонь всередині матеріалу (поверхонь розділу фаз і тріщин) і тильній поверхні, що і призводить до внутрішнього руйнування і тильному відколу [4].

Оскільки, матеріали, котрі були взяті для дослідження широко використовуються в якості броні у воєнній техніці, деталях апаратів, ізоляції космічної та підвод-

ної техніки, тому актуальними є дослідження, котрі спрямовані на розробку рекомендацій по застосуванню комплексно-кількісних методів для проведення оцінки якості матеріалів в умовах високошвидкісного навантаження.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом даного дослідження є процес аналізу параметрів металів та сплавів в умовах високошвидкісного навантаження. Одним із найбільш проблемних місць в даному процесі дослідження є взаємодія ударника і мішені, котра характеризується одночасно проявом різних ефектів, котрі визначають властивості мішені і в загальному випадку ударника і співвідношення діючого тиску і напружень, які виникають. Іншою проблемою є зміна властивостей матеріалів по координаті і в часі. Можливо в залежності від співвідношення тиску і виникаючої напруги виокремити області найбільшого прояву конкретних ефектів, при цьому для визначеності розглядаються сталеві мішені з початковою твердістю $HV = 5000$ МПа, і відповідає межі міцності $Q_b = 1700-1900$ МПа. При контакті з ударником можливі прояви наступних ефектів взаємодії (рис. 1).

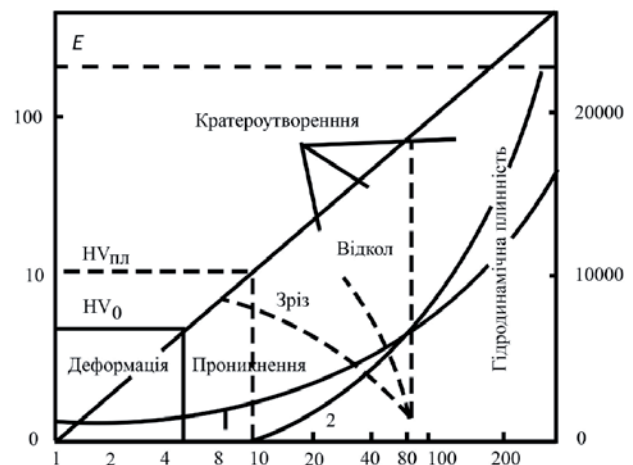


Рис. 1. Схема механізмів взаємодії ударника і сталеві мішені

Існує декілька механізмів поглинання енергії в перешкоді, які відбуваються взаємопов'язано або незалежно, одночасно або послідовно.

1. Пружно-пластична течія і кратероутворення, яке відбувається на передній поверхні перешкоди.

2. Деформаційне зміцнення, адіабатичний зсув та зріз пробки, яке відбувається в розрізі перешкоди по контуру плями контакту, в якому найбільші градієнти масової швидкості.

3. Пружно-пластична деформація перешкоди, присквиднення тильної сторони поверхні в відкол.

Спостереження за процесом поглинання визначає різні шляхи процесу взаємодії, дана обставина складно піддається аналізу, але підкоряється балансу енергії. Для обмеження діючих факторів перешкоди прийнято поділяти на товсті (напівбезкінечні) і тонкі. В тонких перешкодах виявляються два механізми поглинання — деформаційне зміцнення і кратероутворення, при цьому адіабатичний зсув, зріз пробки, загальна пружна деформація і явище відколу практично не виявляються із-за великої жорсткості перешкоди. Тонкі перешкоди застосовуються в основному для вивчення поведінки ударника.

Тому основним напрямком удосконалення техніки оцінки якості матеріалів, які знаходяться в умовах високошвидкісного навантаження є дослідження та оцінка якості параметрів металів та сплавів під час практичних та експериментальних досліджень.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження — удосконалення системи оцінки якості параметрів феритно-перлитних сталей в умовах високошвидкісного навантаження та доведення неможливості достовірно оцінити якість феритно-перлитних сталей шляхом експертного підходу. Дослідження у цьому напрямку дозволять запропонувати новий більш досконалий підхід для оцінки параметрів матеріалів в умовах високошвидкісного навантаження та підвищити якість оцінки отримуваних даних на виробництві.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- визначити вплив ударника на підвищення матеріалу до відколу;
- встановити межі локального розігріву, при якому перехід матеріалу в крихкий стан зміщується в область з великою питомою енергією удару;
- вивчити розхід енергії на розгін уламків при взаємодії ударника і матеріалу.

4. Аналіз літературних даних

В умовах ударно-хвильових випробовувань матеріал перед руйнуванням зазнає швидке стиснення та розігрів в ударній хвилі. В роботі [5] разом із співавторами були проведені експерименти з зразками титанових і алюмінієвих сплавів при інтенсивності ударних хвиль $(2-90) \cdot 10^3$ МПа. Була виміряна швидкість вільної поверхні зразків титанового сплаву ВТ8. В ході дослідження було виявлено, що з навантаженням зразків алюмінієвими ударниками товщиною 2 мм при швидкості удару 660, 1900 і 5300 м/с, тиск ударного стиснення в цих експериментах змінювався від $6,5 \cdot 10^3$ до $77 \cdot 10^3$ МПа. Вимірювання підтвердили, що відкольна міцність сплаву практично не залежить від амплітуди

ударного навантаження і рівна $4,16 \cdot 10^3$ МПа. А сумарна деформація в циклі ударного стиснення і розвантаження перед руйнуванням в цих експериментах доходила до 50 %, при цьому залишковий розігрів дорівнював 1100 К. В роботі [6] автори досліджували вплив попереднього деформаційного зміцнення шляхом рівноканального кутового пресування титану ВТ1-0 на його механічні характеристики при квазістому і високошвидкісному навантаженні. В ході дослідження було виявлено, що не всі структурні фактори, які впливають на зміцнення при малих швидкостях деформування можуть бути ефективними в умовах високошвидкісної деформації. Відомо, що ударно-хвильовий вплив призводить до зміцнення матеріалів внаслідок інтенсивного розмноження дислокацій, навіть при незначних інтегральних деформаціях [7]. Діаграма деформування титану в вихідному і субмікроструктурному стані при ударному стисненні показує, що хоча подрібнення зерна призвело до невеликого зменшення динамічної межі плинності динамічне зміцнення для субмікроструктурного титану вище, ніж для початкового. Подібні недосконалості структури послаблюють залежність межі плинності від швидкості деформування. А різниця швидкісних залежностей може бути настільки великою, що з переходом від квазістатичного до високошвидкісного навантаження вплив цих ефектів на напругу течії може змінювати знак.

Отже, з однієї сторони недосконалості структури можуть бути зміцнюючим фактором, а з іншої сторони представляти собою джерела носіїв пластичної деформації дислокацій. Одні і ті ж дефекти можуть визначати підвищення опору деформування в квазістатичних умовах і бути джерелами носіїв пластичної деформації при високих швидкостях деформування і тим самим знижувати опір пластичному деформуванню [8].

Крім того в роботі [9] приведені результати визначення відкольної міцності для сталей типу 12Х18Н10Т з оцінкою тиску в ударній хвилі і швидкості деформування, а також з вимірюванням товщини відколу методом зважування. Залежність від відкольної міцності від тиску ударної хвилі невизначена, оскільки має широке поле розсіювання. В цьому випадку можливо говорити [10] про тенденцію зниження відкольної міцності з підвищенням тиску, оскільки відкольна міцність і товщина відколу взаємопов'язані. І як показано в роботі [4] при високому значенні відкольної міцності (властивості матеріалу) товщина знижується, а з збільшенням швидкості деформації відкольна міцність зростає, що в свою чергу визначається декількома факторами: особливо підвищенням опору матеріалу деформації відколу; при котрому локальним розігрівом перехід матеріалу в крихкий стан зміщується в область з великою питомою енергією удару, а також розходом енергії на розгін уламків.

Таким чином, результати аналізу наукової літератури дозволяють зробити висновок, що єдиної думки відносно можливості отримання достовірних даних при оцінці якості параметрів металів та сплавів в умовах високошвидкісного навантаження немає. Тому є очевидним факт, що необхідно вибрати альтернативний метод оцінки якості матеріалів, який буде найбільш прийнятним технічним рішенням і буде базуватися на даних, котрі отримуються з реально діючих умов високошвидкісного навантаження.

5. Матеріали та методи досліджень

Проведення повного дослідження процесу поведінки взаємодії ударника та матеріалів є достатньо складним і трудомістким процесом. Тому в якості показників міцності були взяті міцнісні характеристики деяких марок сталей. Це пов'язано з тим, що дані марки представляють практичний інтерес при виготовленні силових оболонок вибухозахисних камер, які мають великий розмір.

Зразки для дослідження виготовлялись круглої форми. Це пов'язано з тим, що вісь на диску орієнтована в поперечному і повздовжньому напрямку, що в свою чергу виділяє матеріал текстури.

Експеримент виконується з застосуванням ударника, котрий виконує роль зовнішніх чинників на механізм, а особливо показує деформацію металу в умовах ударно-імпульсного навантаження.

Повне описання методики, яка була застосована в дослідженні можливо знайти в роботі [8].

6. Результати досліджень

Досліджувані міцнісні характеристики деяких марок сталей вивчалися в роботі [3]. Досліджувались марки сталей 20 и 09Г2С, так як ці марки представляють практичний інтерес при виготовленні силових оболонок вибухозахисних камер великого розміру. Досліджувані зразки виготовлювались в вигляді диску з віссю, яка орієнтована в поперечному і повздовжньому напрямках відносно виділяємої в матеріалі текстури. Зразки діаметром 50 мм запресували в обойму із сталі СТЗ з зовнішнім діаметром 95 мм і товщиною рівній товщині зразка 5, 10 и 20 мм. По профілю визначали динамічну межу плинності Y , відкольную міцність Q_p і швидкість деформації досліджуваного матеріалу ϵ .

$$y = 0,5 \frac{1 - \vartheta}{1 + \vartheta} \rho_0 c_1 w_{\text{упр}},$$

$$\sigma_p = 0,5 \rho_0 c_0 \left(w_1 - w_2 + \delta w \right),$$

$$\epsilon = \frac{\delta - w_1}{d_t} / 2C_1,$$

де ρ_0 — густина; c_1, c_0 — поперечна і об'ємна швидкість звуку; ϑ — коефіцієнт Пуассона; $w_{\text{упр}}$, w_1 , w_2 — швидкість вільної поверхні на пружному предвіснику в першому максимумі і мінімумі на профілі; $\delta \cdot w$ — пружно-пластична поправка.

Експерименти по високошвидкісному удару мішеній дозволяють провести оцінку розподілення енергії по двом складовим — енергії кратероутворення $E_{\text{кр}}$ та енергії поля деформацій $E_{\text{деф}}$. Відношення енергії кратероутворення до енергії поля деформації складає: для алюмінію біля 0,5; для міді від 0,1–0,2; для сталей марки 15 при енергії співудару $E_{\text{уд}} = 2$ кДж співвідношення $E_{\text{кр}}/E_{\text{деф}} = 0,3-0,5$, при $E_{\text{шт}} = 8$ кДж співвідношення $E_{\text{кр}}/E_{\text{деф}} = 0,4-0,75$.

Отже, мідь має великий запас пластичності і не схильна до утворення кратерів за рахунок вносу матеріалу з передньої поверхні. В алюмінію, котрий схильний до зміцнення, а доля енергії кратероутворення не чутлива до швидкості удару (енергії). Сталь

навіть маловуглецева, яка має гетерогенну структуру і складається із фериту та 2 % цементу, дуже чутлива до енергії співудару.

При підвищенні енергії співудару з товстими мішенями глибина проникнення ударника збільшується нестабільно. При швидкості $\vartheta = (4-5) \cdot 10^3$ м/с глибина проникнення з урахуванням розкиду збільшується в 1,5 рази, при підвищенні енергії в 4 рази (рис. 2).

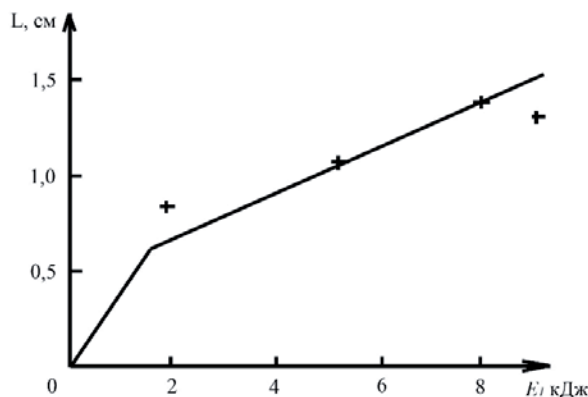


Рис. 2. Залежність глибини проникнення ударника в м'яку сталь

Проникаюча здатність ударника суттєво залежить від початкової структури перешкоди, причому гетерогенна структура має значно більший опір удару. В нормальних умовах межа плинності і міцності титану збільшуються, а пластичність зменшується зі збільшенням вмісту кисню. Експерименти підтверджують вплив кисню на межі плинності при високих швидкостях, але не на динамічні границі плинності з нагрівом при ударному стисненні м'якого високочистого титану, в той час як поведінка технічного титану подібна тому, що має місце в подібних умовах.

Для сталей були встановлені дані в ході експериментального визначення відкольної міцності:

1. Сталі в пластичному стані після відпалювання в тому числі армкожезело, Ст 3 і сталь 45 із структурою, котра включає ферит і перлит з межею міцності до $\sigma_b = 600$ МПа та має низьку відкольную міцність в інтервалі $\sigma_{\text{відк}} = 1,6-2,2$ ГПа.

2. Нержавіюча сталь типу 12Х18Н10Т із структурою аустеніту і з межею міцності до $\sigma_b = 600$ МПа має відкольную міцність $\sigma_{\text{відк}} = 1,8-2,3$ ГПа.

3. Конструктивні сталі в термообробленому стані при твердості НRC 40-50 (міцності $\sigma_b = 1200-1800$ ГПа) зі структурою сорбіту, трооститу або відпущеного мартенситу мають високу відкольную міцність $\sigma_{\text{відк}} = 4,0-5,0$ ГПа. Зі збільшенням товщини відколу, який утворився, значення відкольної міцності знижується із-за енергії удару на деформацію в зоні відколу і розгону уламків (рис. 3).

Відкольна міцність зразків із сталі 09Г2С збільшується з 0,7 до 1,4 ГПа при зменшенні товщини зразків з 20 до 5 мм, а при збільшенні швидкості деформації з $5 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$ с⁻¹. Крім того для зразків із сталі 09Г2С товщиною 20 мм спостерігається руйнування при тиску на зразок, котрий не перевищує динамічної межі плинності. Для сталі 20 відкольна міцність вище і складає 1,3–1,6 і 1,6–1,8 ГПа для зразків з дією розтягуючої напруги відповідно в поперечному і повздовжньому напрямках відносно виділеної текстури зразка.

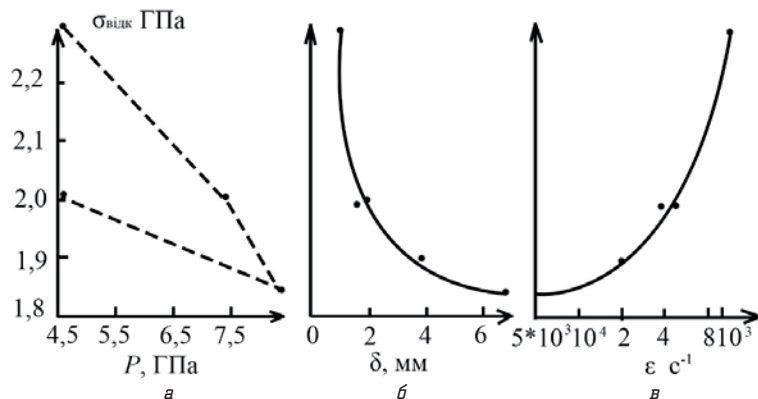


Рис. 3. Залежність від тиску ударної хвилі сталі марки 12Х18Н10Т: а — товщини відколу; б — швидкості деформації; в — відкольної міцності

7. Аналіз результатів дослідження

Серед сильних сторін даного дослідження необхідно відмітити наочну практичність отриманих даних. На користь цього твердження приведені вище аналіз періодичних даних, котрі довели, що на сьогоднішній день відсутня можливість оцінки якості параметрів матеріалів в умовах високошвидкісного та ударного навантаження.

Слабкі сторони даного дослідження полягають в обмеженому використанні великого діапазону матеріалів в практичному експерименті, оскільки дослідження були проведені тільки для групи матеріалів зі сталі.

Дослідження в даній області дозволять створити альтернативний експертному методу інструмент оцінки якості матеріалів в умовах ударно імпульсного навантаження. Застосування подібного інструменту допоможе значно спростити процедуру прийняття рішень і вибору необхідних матеріалів для підприємств, котрі займаються розробкою виробів, котрі працюють в умовах ударних впливів.

В світовій практиці для вимірювання параметрів та оцінки якості матеріалів, котрі знаходяться в умовах високошвидкісного та ударно-хвильового навантаження, зазвичай застосовується експертний підхід. Головним недоліком такого підходу є присутність при вимірюванні фахівця, оцінка якого може радикально відрізнитися від експертного оцінювання іншого фахівця при однакових умовах дослідження.

Таким чином, SWOT-аналіз результатів дослідження дозволяє виокремити основні напрямки для успішного досягнення мети дослідження. Серед них: проведення аналізу характеристик матеріалів, котрі використовуються в умовах ударних навантажень; провести аналіз комплексно-кількісних методів, котрі використовують для оцінки якості матеріалів; визначити критерії оцінки якості матеріалів в умовах екстремальних навантажень; удосконалити комплексно-кількісні методи, котрі вибрані для оцінки якості матеріалів в умовах ударного навантаження; розробити алгоритм і методичні рекомендації для оцінки якості матеріалів, а також здійснити практичну реалізацію розроблених положень.

8. Висновки

В ході практичного дослідження було встановлено, що існуючий експертний підхід до оцінки якості параметрів матеріалів в умовах високошвидкісного навантаження не забезпечує виробництво математичного достовірними даними. Оскільки доведено, що:

1. Матеріали сталевго походження при дії на них ударника реагують підвищенням опору відколу.

2. При локальному розігріві в матеріалах сталевго походження, здійснюється перехід матеріалу в крихкий стан зі зменшенням в область з більшою питомою енергією удару.

3. Розхід енергії на розгін уламків збільшується пропорційно зі збільшенням товщини відколу, а значення відкольної міцності знижується із-за енергії удару на деформацію в зоні відколу і розгону уламків.

Таким чином, встановлено, що феритно-перлитні сталі мають низьку відкольную міцність, а мартенситні сталі — високу відкольную міцність.

Література

- Аксененко, А. В. Работоспособность оболочечных конструкций при локальном ударном нагружении [Текст] / А. В. Аксененко, В. С. Гудрамович, А. П. Дзюба, А. К. Козлов. — Днепропетровск: ДНУ, 2006. — 216 с.
- Белов, Н. Н. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления [Текст] / Н. Н. Белов, Н. Т. Югов, Д. Г. Копаница, А. А. Югов. — Томск: STT, 2005. — 356 с.
- Садовый, А. А. Прочность, разрушение и диссипативные потери при интенсивных ударно-волновых нагрузках [Текст]: сб. науч. ст. / А. А. Садовый, С. В. Михайлов. — Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. — 420 с.
- Герасимов, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел [Текст] / под ред. А. В. Герасимова. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. — 572 с.
- Грабченко, А. И. Система моделирования рабочих процессов, интегрированных технологий [Текст]: сб. науч. ст. / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, С. И. Чернышов // Сучасні технології у машинобудуванні. — Х.: НТУ «ХП», 2007. — С. 236–268.
- Тимофеев, Ю. В. Обобщенная структура жизненного цикла машиностроительного производства и его изделий [Текст] / Ю. В. Тимофеев, В. А. Фадеев, М. С. Степанов, С. А. Назаренко // Вісник НТУ «ХП»: Серія «Машинобудування». — 2009. — Вип. 1. — С. 86–95.
- Криворучко, Д. В. Исследование влияния параметров модели трения на распределение контактных напряжений, силы и температуры резания при механической обработке сталей [Текст] / Д. В. Криворучко, В. А. Залого, О. А. Залого // Вісник НТУУ «КП»: Серія «Машинобудування». — 2009. — № 57. — С. 132–138.
- Кузнецов, Ю. М. Високоточні надшвидкісні патрони для хвостового різального інструменту [Текст] / Ю. М. Кузнецов, О. А. Гуменюк // Вісник НТУУ «КП»: Серія «Машинобудування». — 2004. — № 45. — С. 80–83.
- Meyer, L. W. Material behavior under dynamic mono- and biaxial loading [Text] / L. W. Meyer, N. Herzig, F. Pursche, S. Abdel-Malek // Proceedings Seventh International Symposium on Impact Engineering. — Warsaw, Poland, 2010. — P. 472.
- Bragov, A. M. Tension and Compression Behavior of Pre-Stressed Steel Strands at High Strain Rate rate [Text] / A. M. Bragov, E. Cadoni, A. Konstantinov, A. Lomunov // Applied Mechanics and Materials. — 2011. — Vol. 82. — P. 154–159. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.82.154

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Практически исследован процесс поведения параметров материалов в условиях высокоскоростного нагружения. Установлено, что феррито-перлитные стали имеют низкую откольную прочность, а мартенситные стали — высокую. Доказано, что из-за увеличения скорости деформации откольная прочность для сталей увеличивается. Определены параметры сопротивления материала отколу и потеря энергии на распыление осколков при взаимодействии ударника и поверхности материала.

Ключевые слова: высокоскоростная нагрузка, откольная мощность, ударник, мишень.

Куриляк Валентина Васильевна, аспирант, кафедра метрологии, стандартизации та сертифікації, Київський національний університет технологій і дизайну, Україна, e-mail: valentina.kuryliak@gmail.com.

Куриляк Валентина Васильевна, аспирант, кафедра метрологии, стандартизации и сертификации, Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина.

Kurylyak Valentina, Kyiv National University of Technology and Design, Ukraine, e-mail: valentina.kuryliak@gmail.com