

PACS numbers: 06.20.-f, 06.60.Jn, 46.40.Cd, 62.50.Ef, 81.05.Zx, 81.70.Bt, 83.85.Ns

## **Застосування кваліметричних метод для оцінювання якості ударно-навантажених матеріалів**

В. В. Куриляк, Г. І. Хімічева

*\*Київський національний університет технологій та дизайну,  
кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій та виміральної техніки,  
вул. Немировича-Данченка, 2,  
01011 Київ, Україна*

У зв'язку з тим, що в сучасній метрологічній базі даних відсутня чітка методика оцінювання якості матеріалів за умов ударних і високошвидкісних навантажень, у даній статті проводиться та представляється експериментальне дослідження практичного застосування кваліметричних метод задля оцінювання якості матеріалів за таких умов. Виконано аналізу характеристик матеріалів за умов ударних навантажень, а також проаналізовано кваліметричні методи, котрі адаптовано для оцінювання якості високонавантажених матеріалів. Визначено критерії оцінювання якості матеріалів за умов екстремальних навантажень. Розроблено алгоритм і методичні рекомендації для оцінювання якості матеріалів, а також здійснено практичну реалізацію розроблених положень. Представлено алгоритм виконання оцінювання якості матеріалів, відповідно до якого відбувається вибір методи випробування, згідно з якою визначаються необхідні кваліметричні методи оцінювання якості. Виявлено на основі експериментальних даних, що найбільш прийнятним для практичного використання є застосування в якості основної кваліметричної методи так званої «павутини» якості. В якості додаткових доцільно користатися методами секторних діаграм і побудови ранжованого ряду. Оцінювання якості за допомогою цінового коефіцієнту є ефективним для ринкових і конкурувальних матеріалів, таких як метали та криці. Для імпульсного навантаження ефективно застосовувати кваліметричну методу оцінювання, таку як побудова номограм. Вирішено завдання з розроблення градацій якості, які покладено в основу побудови номограм.

Since in a contemporary metrological database, there is no clear method for evaluation of the quality of materials under high and shock loads, this article presents results of experimental studies of practical application of qualimetric methods for evaluation of the quality of materials under such conditions. The analysis of the characteristics of materials under shock

loads is performed along with qualimetric methods, which are adapted for evaluation of the quality of high-loaded materials. Criteria for evaluation of quality of materials under extreme loads are determined. The algorithm and methodical recommendations for evaluation test of materials are developed along with realization of practical implementation of developed recommendations. The algorithm for performance of evaluation test for materials is presented and specifies a choice of test method for determining necessary qualimetric methods of the quality evaluation. Based on experimental data, it is established that the most appropriate for practical application is using so-called 'cobweb' of quality as a primary qualimetric method. In addition, one can use methods of pie charts and construction of the ranked data. The quality evaluation with a price ratio is quite effective for the market and competing materials such as metals and steel. For an impulsive load, the qualimetric evaluation method such as the construction of nomograms is effective. The problem of the quality gradation development, which is basic during the construction of nomograms, is solved.

В связи с тем, что в современной метрологической базе данных отсутствует чёткая методика оценки качества материалов в условиях ударных и высокоскоростных нагрузок, в данной статье проводится и представляется экспериментальное исследование практического применения квалиметрических методов для оценки качества материалов при таких условиях. Выполнен анализ характеристик материалов, используемых в условиях ударных нагрузок, а также проанализированы квалиметрические методы, которые адаптированы для оценки качества высоконагруженных материалов. Определены критерии оценки качества материалов в условиях экстремальных нагрузок. Разработан алгоритм и методические рекомендации для оценки качества материалов, а также осуществлена практическая реализация разработанных положений. Представлен алгоритм выполнения оценки качества материалов, в соответствии с которым происходит выбор метода испытания, согласно которому определяются необходимые квалиметрические методы оценки качества. Установлено на основе экспериментальных данных, что наиболее приемлемым для практического использования является применение в качестве основного квалиметрического метода так называемой «паутины» качества. В качестве дополнительных целесообразно пользоваться методами секторных диаграмм и построения ранжированного ряда. Оценка качества с помощью ценового коэффициента весьма эффективна для рыночных и конкурирующих материалов, таких как металлы и стали. Для импульсной нагрузки эффективно применять квалиметрический метод оценки, такой как построение номограмм. Решена задача по разработке градаций качества, которые положены в основу построения номограмм.

**Ключові слова:** кваліметричні методи, оцінювання якості матеріалів, мікроструктурні дослідження.

**Keywords:** qualimetric methods, estimation of quality of materials, microstructural studies.

**Ключевые слова:** кваліметрические методы, оценка качества материалов, микроструктурные исследования.

*(Отримано 14 березня 2017 р., остаточний варіант — 21 березня 2017 р.)*

## 1. ВСТУП

У роботах [1–5] розглянуто критерії якості сировини для виробництва металів, стопів нікеліду титану, поліметилметакрилату (ПММА) та сферопластику. Згідно з наявними даними відсутність критеріїв і метод контролю якості сировини обумовлено недостатнім рівнем вивченості складу сировини та ролі домішок [6–8]. У зв'язку з цим пропонується ряд критеріїв оцінювання придатності перерахованих вище матеріалів. Першим критерієм є ступінь ураженості газиво-рідкими включеннями. Другим — коефіцієнт світлопропускання сировини, який повинен становити не менше 40%. Третім — вміст хемічних домішок [9–10]. Відповідними факторами якості сировини є наступні: порушення однокомпонентності сировини (себто, появлення інших домішок, включень, фаз), відхилення від хемічного складу та структурний фактор — співвідношення «корисного» та «шкідливого» компонентів. В роботах [11–15] розглянуто методологію оцінювання якості, ідентифікацію дефектів в сировині матеріалів, нормування якості сировини, співвідношення аналітичних і технологічних метод, а також методу діагностики певних матеріалів, що володіють (не)металічними властивостями [16–22] та/або містять дефекти (домішки) [23–44].

Проте, на даний момент немає чіткої методики оцінювання якостей різних матеріалів. В кожному окремому випадку дана проблема вирішується самостійно, виходячи з переваг, що склалися умов та, звісно, виду самого матеріалу. У наявному на сьогодні вигляді такі способи оцінювання не можуть бути використані задля вироблення критеріїв та оцінювання якостей матеріалів, що піддаються високошвидкісному навантаженню. Постає необхідність шляхом узагальнення представлених даних розробити критерії якості матеріалів, підібрати кваліметричні методи оцінювання якостей в умовах ударного навантаження. У зв'язку з цим, оглянувши та проаналізувавши наявні методи, метою даної роботи є розроблення механізму кваліметричного оцінювання та вибору матеріалів для виробів, що зазнають високошвидкісних впливів.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРІЯЛІВ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження було обрано три типи таких матеріалів, зразки яких широко використовуються в експериментах з ударних на-

ТАБЛИЦА 1. Характеристики накопичувача.<sup>1</sup>

Зразок	Розмір накопичувача, мкм	Товщина стінки скляної мікросфери,	
		мкм	
1	48,5	15,5	
3	35,1	14,7	
4	21,1	14,4	
6	30,5	13,1	

вантажень. Метали обиралися таким чином, щоб для порівняння було представлено різні кристалічні ґратниці. Наведемо загальні характеристики матеріалів, обраних для дослідження.

Стопи нікеліду титану містили 44,9% Ti і 55,1% Ni. Окрім того задля зменшення гістерезису та контролю міцності додавалось 3% Cu (50% Ti, 47% Ni, 3% Si).

Полімерні матеріали містили поліметилметакрилат (ПММА) і сфероластик. У ПММА, що використовувався як оргскло, було виявлено наступні фізико-механічні характеристики: поздовжня швидкість пружних хвиль  $c_1 = 1970$  м/с; поперечна швидкість пружних хвиль  $c_2 = 1130$  м/с; граничний коефіцієнт інтенсивності при статичному навантаженні  $K_{Ic} = 1,47$  МПа/м<sup>2</sup>. В таблиці 1 представлено характеристику накопичувача та параметри скляних мікросфер, котрі використовувалися в експериментальному дослідженні.

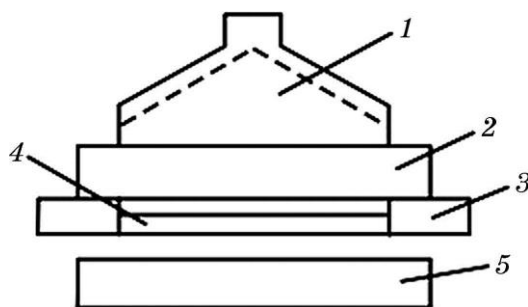
Сфероластик містив матрицю з поліефірної смоли та наповнювач зі скляних мікросфер, вміст яких складав 41%. У різних зразках розмір мікросфер змінювався в інтервалі від 6–60 мкм до 12–60 мкм із середнім значення від 21 мкм до 31 мкм.

Механічні характеристики сфероластику: питома щільність за результатами зважування  $\rho = (0,79 \pm 0,01) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; модуль Юнга при розтягуванні  $E = 2400 \pm 50$  МПа; тимчасовий опір при розриві  $\sigma_c = 12,4 \pm 0,9$  МПа; в'язкість руйнування (критичний коефіцієнт інтенсивності напруги)  $K_{Ic} = 0,52 \pm 0,03$  МПа/м<sup>2</sup>; швидкість поздовжніх хвиль  $c_1 = 2196 \pm 50$  м/с.

Тип ґратниці досліджуваних металів: ОЦК, ГЦК, ГЦУ. ОЦК-метали було представлено перлітною конструкційною крицею 30ХН4М. ГЦК-металами слугувала мідь різного очищення: М2 (99,7% Si) і МОЗ (99,5% Si), а також аустенітна нержавіюча криця 12Х18Н10Т. У якості ГПУ-металів об'єктом дослідження були технічно чистий титан ВТ1 і однофазний титановий  $\alpha$ -стоп ВТ5.

## 2.1. Методи навантаження

В ході експерименту використовували три методи навантаження для відповідних матеріалів дослідження.



**Рис. 1.** Схема пристрою для метання вибухом плоских ударників: 1 — плоско хвильовий генератор (вибухова лінза), 2 — заряд вибухової речовини, 3 — фокусне кільце, 4 — метал-ударник, 5 — мішень (зразок).<sup>2</sup>

У першій методі навантаження здійснювалося за допомогою спеціальних вибухових пристроїв. Імпульси навантаження різної тривалості створювалися ударом алюмінієвих пластин-ударників товщиною від 0,2 до 4,0 мм. При цьому досягалися швидкості удару в діапазоні 600–700 м/с. Метання ударників здійснювалося детонацією зарядів вибухової речовини. На рисунку 1 приведено схему даного вибухового пристрою.

Ударник зберігає плоску форму в центральній частині незважаючи на те, що через радіальне розлітання продуктів вибуху тиск на периферії заряду падає швидше, ніж у його вісі. Корекція імпульсу тиску, що діє на край ударника, досягається використанням фокусуючого кільця, яке спричинює підйом тиску на периферії заряду при відображенні детонаційної хвилі і додаткове натікання продуктів вибуху в порожнину над ударником. Порожнина також служить для пом'якшення процесу навантаження ударника і запобігання його відколеного руйнування.

Другу методу було використано для полімерних матеріалів (ПММА і сферопластику) ударний вплив створювався імпульсним магнетним полем. Методика виготовлення зразків з ПММА полягала у наступному. В плоскій заготовці з оргскла товщиною 10 мм виготовлявся паз шириною 3 мм і довжиною 100 мм. У верхній частині паза здійснювався пропили глибиною близько 3 мм і шириною 0,3 мм. Досліджувався розвиток тріщини з верхньої частини цього пропили під час імпульсного тиску, розподіленого рівномірно по довжині паза. Імпульс тиску формувався плоскою струмопровідною шиною шириною 10 мм із мідної фольги товщиною 250 мкм. Генератор імпульсних струмів розряджався в коливальному режимі з періодом коливань  $T \approx 5,5\text{--}6,0$  мкс і постійною часу загасання близько  $T \approx 1\text{--}4$  мкс. Амплітуда імпульсу струму варіювалася в діапазоні 150–300 кА, що відповідає амплітуді напруги в навантаженні від 140 МПа до 320 МПа.

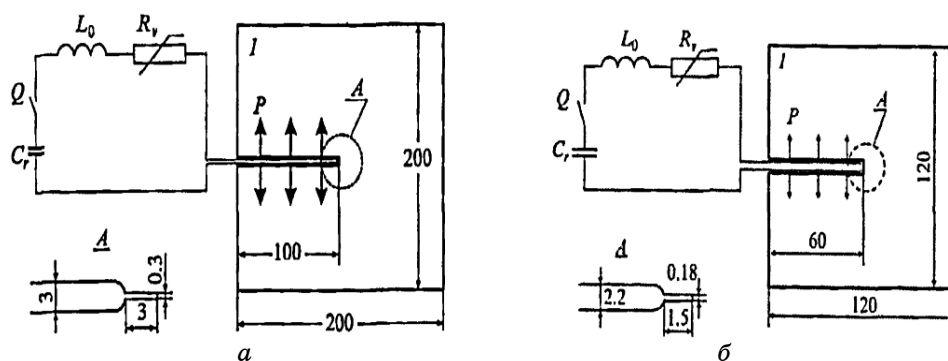


Рис. 2. Схеми установки і навантаження зразка.<sup>3</sup>

Реєстрація струму проводилася поясом Роговського на осцилографі (рис. 2, а). Зразки з сферопластику досліджувалися на аналогічній то тієї, що на рис. 2, а установці, але мали форму пластин розміром  $120 \times 120 \times (9-16)$  мм з серединним крайовим наскрізним пазом шириною 2,2 мм і довжиною 60 мм, а також симетричним по відношенню до його берегів надрізом у вершині паза глибиною 1,5 мм і шириною 0,18 мм (рис. 2, б).

На рисунку 3 наведено схему візуалізації процесу розвитку тріщини під дією імпульсного навантаження. Як фоторегістратор використана швидкісна камера типу СФР-2, оптичну схему якої було зібрано у режимі фотохронографії. Джерелом світла слугувала імпульсна лампа-спалах типу ІФП-120. Випробуваний зразок 7 встановлювався таким чином, що на плівці 1 будується зображення, яке вирізується регульованою оптичною щілиною 5 частини досліджуваного об'єкта. За допомогою обертового дзеркала

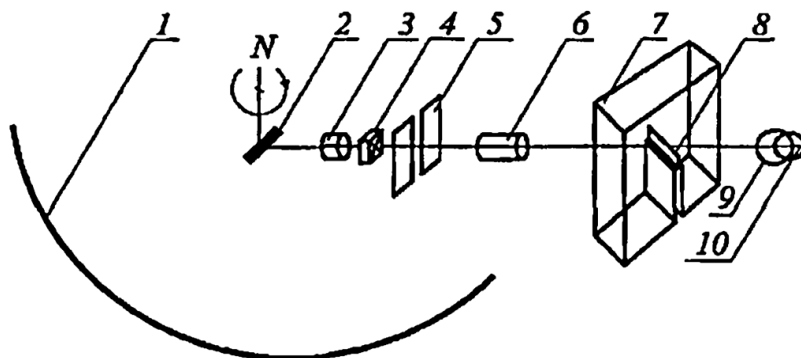


Рис. 3. Оптична схема реєстрації: 1 — фотоплівка, 2 — дзеркало, 3 і 6 — система фотооб'єктивів, 4 — затвор, 5 — регульована щілина, 7 — зразок, 8 — рухома тріщина, 9 — лампа-спалах ІФП-120, 10 — світловод.<sup>4</sup>

2 це переноситься на фільмовий шлях. На плівці фіксується зміна освітленості, викликана перекриттям оптичного каналу, яка просовується тріщиною. Межа поділу зон різної освітленості (різної оптичної щільності зображення) є межею поділу, а зруйнований матеріал — цілісний. Для синхронізації процесу просування тріщини з моментом програми навантаження за допомогою світловоду в поле зору камери виведено випромінювання з розрядного проміжку.

Третю методу було використано для металів. Для них було застосовано пневматичні гармати калібру 37 мм. Зразки мішені представляли собою пласкі шайби діаметром 52 мм і товщиною 5 мм. Установка включає камеру високого тиску, стовбур, вакуумну камеру та копіювальну шайбу. Ударники мали форму стаканчика, який, як правило, виготовляють з того ж матеріалу, що і мішень. В цьому випадку масова швидкість частинок у хвилі навантаження в початковий момент часу дорівнювала половині швидкості польоту ударника. З метою забезпечення площинності зіткнення ударник вмонтували в поліетиленовий піддон, що має форму циліндра з трьома пасками для щільного прилягання до стінок стовбура. При швидкості навантаження 150–650 м/с ударником товщиною 1–3 мм в умовах одноосного деформування був реалізований тильний відкол. Площинність зіткнення становить  $10^{-5}$  радіан. Поточне значення монотонно змінної швидкості відбивається від поверхні  $W(t)$  і визначається за кількістю зареєстрованих биттів інтенсивності світла  $N(t)$  зі співвідношення

$$W(t) = \frac{\lambda}{2\Delta t} \frac{N(t)}{(1 + \delta)}, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{n}{n^2 - 1} \lambda \frac{dn}{d\lambda}, \quad (2)$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі зонduючого випромінення,  $n$  — показник заломлення скла лінії затримки,  $N$  може бути і нецілим числом.

Визначення міцності відколу базувалося на вимірюванні профілю швидкості вільної поверхні зразку. Аналіза профілю швидкості дозволяє знайти величину розтягуючої напруги, що діяла на зразок в момент початку руйнування. З цією метою з профілю швидкості  $W(t)$  знаходяться величини максимальної швидкості  $W_0$  і швидкості поверхні перед виходом на неї фронту імпульсу відколу  $W_m$ . Величина напруги, що розтягують в площині відколу визначалась в акустичному наближенні:

$$\sigma = \rho_0 c_0 (W_0 - W_m) / 2$$

де  $\rho_0$  є початкова щільність матеріалу,  $c_0$  є об'ємна швидкість звуку.

## 2.2. Мікроструктурні дослідження

Мікроструктуру поперечних шліфів мішеней досліджували на оптичному мікроскопі Neophot-32 і растровому електронному мікроскопі Philips, як без травлення, так і після нього. Мікрошліфи готувалися з метою створення поверхні необхідної якості. Процедура включала 5 етапів: вирізка зразку, закріплення (втім, не обов'язково), шліфування, полірування, травлення. Вирізка, шліфування та полірування зразку здійснювалася таким чином, щоб на поверхні шліфа залишався мінімальний по глибині шар деформованого (спотвореного) металу, що необхідний для виявлення істинної структури металу при травленні.

Виявлення мікроструктури зводиться до виявлення кордонів між окремими структурними складовими і до одержання рельєфу на поверхні шліфа, що дозволяє з'ясувати розташування окремих фаз, двійкових утворень, форму, розміри, орієнтування окремих зерен тощо.

Для виявлення мікроструктури металів і сплавів використовувалося хемічне травлення, в основному, розчином плавикової кислоти (TiNi), азотної кислоти, хлорного заліза FeCb (міді). Хемічне травлення здійснювалося шляхом занурення зразка в реактив або протирання зразка реактивом за допомогою тампона. Під час травлення поверхню шліфа у більшості матеріалів втрачає свій блиск, що й свідчить про протікання процесу травлення. Метода протирання використовувалася в тому випадку, коли при травленні утворювалися плівки, що перешкоджають проведенню процесу виявлення структури. Тривалість травлення найчастіше становила близько декількох хвилин. Після закінчення травлення проводилася промивка і сушка зразків. Мікротвердість зразків по Кнупу ( $H_K$ ) вимірювали на приладі Buehler-MetAg при навантаженні 100 г для сталевих зразків і на приладі ПМТЗ з навантаженням 20 г для міді й алюмінію.

## 2.3. Аналіза характеристик якості матеріалів

При оцінюванні якості матеріалів в умовах високошвидкісного навантаження необхідно враховувати специфічність досліджень, тому використовуваними характеристиками якості в даному випадку будуть параметри, котрі пов'язані з ударним навантаженням. При цьому визначальною характеристикою якості для ударно-навантажених матеріалів є міцність відколу — міра опору матеріалу динамічному руйнуванню.

Характеристики якості для стопу з пам'яттю форми — нітинолу: товщина зразка, товщина ударника, швидкість ударника, швидкість відколу, міцність відколу. Характеристики якості по-



ліметилметакрилате: амплітуда імпульсу, довжина тріщини, енергія зламу. Характеристики якості для сферопластику: амплітуда імпульсу, довжина тріщини, розмір наповнювача. Характеристики якості для металів: швидкість навантаження, поперечна швидкість зсуву, поздовжня швидкість зсуву, швидкість зсувної деформації, міцність відколу.

### 3. ЗАСТОСУВАННЯ КВАЛІМЕТРИЧНИХ МЕТОД

Диференціальна метода оцінювання якості зразків матеріалів здійснюється шляхом зіставлення характеристик окремих властивостей оцінюваного зразка з відповідними базовими показниками. При цьому визначають чи досягнуто відповідність якості оцінюваного зразка, які показники властивостей оцінюваного зразку перевершують або не відповідають показникам базового зразка, а також наскільки відрізняються один від одного аналогічні показники властивостей. Рівень якості ( $Y_k$ ) розраховується як визначення середнього арифметичного значення всіх рівнів врахованих властивостей ( $Y_i$ ) зіставлених (оцінюваного і базового) зразків матеріалів наступним чином:

$$Y_k = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n Y_i, \quad (4)$$

$$Y_k = \frac{\Pi_{\text{оц}}}{\Pi_{\text{баз}}}. \quad (5)$$

Проте, оскільки в разі експериментальних випробувань впливу ударно хвильової деформації на стопи неможливо визначити базові значення властивостей, то в даному випадку доцільним є в якості базових значень задатися максимально можливими (граничними) в умовах експерименту значеннями показників.

Наведемо базові значення для нітинолу. Товщина зразка — 1,5 мм (значення мінімальне, оскільки товщина мішені-зразка повинна прагнути до мінімуму); товщина ударника — 2 мм; швидкість ударника — 700 м/с; швидкість відколу — 300 м/с; міцність відколу — 10 ГПа.

Базові значення для криці: швидкість навантаження — 400 м/с, поперечна швидкість зсуву — 70 м/с, поздовжня швидкість зсуву — 40 м/с, швидкість зсувної деформації —  $2,0 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ , міцність відколу — 10 МПа.

Базові значення для міді: швидкість навантаження — 210 м/с, поперечна швидкість зсуву — 30 м/с, поздовжня швидкість зсуву — 15 м/с, швидкість зсувної деформації —  $1,0 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ , міцність відколу — 3 МПа.

Базові значеннями для титану: швидкість навантаження — 700 м/с, поперечна швидкість зсуву — 35 м/с, поздовжня швидкість зсуву — 60 м/с, швидкість зсувної деформації —  $0,5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ , міцність відколу — 10 МПа.

«Павутина» визначення рівня якості зразків будується наступним чином. Відповідно до кількості оцінюваних показників (характеристик) якості в різні боки, подібно павутині, відкладається  $n$ -на кількість кваліметричних шкал у відповідному масштабі. На шкалах відкладається кожне значення показників властивостей, після чого точки з'єднуються між собою й одержують число багатокутників згідно кількості оцінюваних зразків. Площа, яку займає кожний багатокутник, відповідає якості конкретного зразка та дозволяє порівняти її з іншими.

Секторні діаграми будуються за відносними показниками якості та їх коефіцієнтами вагомості. Кожен показник зображується на діаграмі у вигляді кругового сектору, радіус якого дорівнює значенню показника щодо обраного аналогу, а центральний кут — коефіцієнту вагомості, виражений умовною величиною в градусах або радіанах. Базові значення для всіх показників зображуються колом з радіусом, який дорівнює одиниці. Центральний кут для  $i$ -го показника з коефіцієнтом вагомості  $\alpha_i$  визначається як  $\varphi = 2\pi\alpha_i$ .

Рівень якості зразка визначається на основі комплексного середнього зваженого показника  $Y_K$ , іменованого тут середнім зваженим круговим показником. Він дорівнює радіусу кола, площа якого дорівнює сумі площ секторів діаграми. Його розрахунок здійснюється за формулою

$$Y_K = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i r_i^2}, \quad (6)$$

де  $n$  — число відносних показників якості,  $\alpha_i$  — коефіцієнт вагомості,  $r_i$  — значення  $i$ -го показника.

Коефіцієнти вагомості показників визначалися експертною методикою ранжирування. Задля цього залучалися п'ять експертів, які складали ранжирувані ряди для характеристик зразків за зростаючою шкалою порядку. Далі визначалися суми рангів кожного із об'єктів експертної оцінки та визначалися коефіцієнти вагомості за формулою

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^n Q_{i,j}}{\sum_{i,j=1}^{n,m} Q_{i,j}}, \quad (7)$$

де  $n$  — кількість експертів,  $m$  — число оцінюваних показників,  $Q$  — коефіцієнт вагомості  $j$ -го показника в рангах (балах), кот-

рий надав  $i$ -й експерт. Точність експертних оцінок характеризує якість експертизи і виражається коефіцієнтом координації, котрий визначається за формулою

$$W = \frac{12S}{n^2(m^3 - m)} = \frac{12S}{mn^2(m^2 - 1)} = \frac{12S}{mn^2(m + 1)(m - 1)} \quad (8)$$

де  $S$  — сума квадратів відхилень рангів або балів кожного об'єкту від середнього арифметичного значення,  $n$  — кількість експертів,  $m$  — число оцінюваних об'єктів, при  $W = 0$  наявна абсолютна неузгодженість, а при  $W = 1$  — повне збігання думок (оцінок). Отже,  $0 \leq W \leq 1$ .

При застосуванні функції «бажаності» показниками бажаності є безрозмірні недискретні характеристики якості, що змінюються в межах від нуля до одиниці у будь-якому діапазоні зміни розмірних показників якості  $x_i$ . Обчислюють показники бажаності  $q$  за допомогою допоміжних показників  $y$  за формулою

$$q = \exp\left(-\frac{1}{y}\right) = \frac{1}{e^{1/y}} \quad \text{для } 0 < y < \infty. \quad (9)$$

Розмірні значення  $x_i$  — натуральних показників якості перераховують в безрозмірні допоміжні показники  $y$  за формулою

$$y = a_0 + a_1 x_1. \quad (10)$$

Щоб знайти коефіцієнти  $\alpha_0$  і  $\alpha_1$ , слід знати нормативні значення показників бажаності  $q$ , значення безрозмірних показників  $y$ , а також значення розмірних показників  $x_i$  — для двох рівнів градацій якості. Значення функції  $y$ , а також коефіцієнти  $\alpha_0$  і  $\alpha_1$  визначаються в залежності від того, які значення  $q$  задані для основних рівнів якості (табл. 2). За даними табл. 2 помічають зони встановлених (в даному випадку чотирьох) якісних градацій, а відповідно до даних табл. 3 будують безперервний графік функції бажаності.

Для побудови функції  $y$  використовуються базові точки функції бажаності (табл. 2) і граничні значення натурального показ-

**ТАБЛИЦА 2.** Значення показників бажаності  $q$  та відносних безрозмірних допоміжних показників  $y$ .<sup>5</sup>

Градація якості	$Q$	$y$
«Відмінно»	$\geq 0,80$	$\geq 4,50$
«Добре»	$\geq 0,60$	$\geq 1,96$
«Задовільно»	$> 0,20$	$> 1,62$
«Погано»	0,00	0,00

ТАБЛИЦА 3. Значення функції бажаності в основних і проміжних точках.<sup>6</sup>

Числові значення			
У	Q	У	q
-2,00	не визначається	1,50	0,51
-1,50	не визначається	2,00	0,61
-1,00	не визначається	2,50	0,67
-0,50	не визначається	3,00	0,72
0,00	0,00	3,50	0,75
0,50	0,14	4,00	0,78
0,77	0,28	4,50	0,80
1,00	0,37	5,00	0,82

ника, визначаються стандартом або іншим нормативно-технічним документом.

Номограма будується індивідуально для кожного з натуральних одиничних показників якості. Для різних натуральних значень  $x_i$  наочніше та простіше визначати величини  $y$  і  $q$  за тривісним номограмам  $xuq$ . Відповідно до формули (9) і табл. 3 будуть криву залежності  $q$  від  $y$ . Вертикальна вісь розмірних показників  $x_i$  є продовженням вниз осі  $q$  і становить з віссю нижню частину номограми. Масштаб по осі  $x_1$  призначається кожен раз у відповідності з граничними значеннями розмірного показника. Для перерахунку натуральних значень показника якості намічають по осях  $xu$  три нормативні точки з координатами  $A_1(x_{s1}, y_1)$ ,  $B_2(x_{s2}, y_2)$ ,  $C_3(x_{s3}, y_3)$ . Норми  $x_{s1}$ ,  $x_{s2}$ ,  $x_{s3}$ ,  $x_{s4}$  беруться з нормативних значень окремих матеріалів, а значення  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ ,  $y_4$  відповідають граничним нормам величини в табл. 2 для різних градацій якості. Через позначені точки проводяться прямі. Із знайденої точки перетину опускається перпендикуляр на вісь  $y$ , який продовжують до перетину з кривою в осях  $qx$ . Опустивши потім із знайденої точки перпендикуляр на вісь  $q$ , знаходять на ній шукані показники бажаності  $q$  для досліджуваного матеріалу.

### 3.1. Кореляційна аналіза

Оскільки ця метода дозволяє виявити залежність між декількома випадковими величинами, то при проведенні незалежних вимірювань різних параметрів для одного типу об'єктів з цих даних можна одержати якісно нову інформацію про взаємозв'язок цих параметрів. Незважаючи на те, що величини носять випадковий характер, в загальному, спостерігається деяка кореляція величин. Можлива поява позитивної кореляції (при збільшенні одного параметра збільшується й інший), негативна кореляція або її відсутність. Для того, щоб чисельно охарактеризувати дані взає-

мозв'язку проводиться розрахунок коефіцієнта кореляції. Він розраховується наступним чином.

Є масив з  $n$  точок  $(x_{1i}, x_{2i})$ . Розраховуються середні значення для кожного параметра:

$$\langle x_1 \rangle = \frac{\sum x_{1i}}{n}, \quad \langle x_2 \rangle = \frac{\sum x_{2i}}{n}. \quad (11)$$

Коефіцієнт кореляції  $r$ ,

$$r = \frac{\sum (x_{1i} - \langle x_1 \rangle)(x_{2i} - \langle x_2 \rangle)}{\sqrt{\sum (x_{1i} - \langle x_1 \rangle)^2} \sqrt{\sum (x_{2i} - \langle x_2 \rangle)^2}}, \quad (12)$$

змінюється в межах від  $-1$  до  $1$ . У даному випадку це лінійний коефіцієнт кореляції, який показує лінійний взаємозв'язок між  $x_1$  і  $x_2$ :  $r$  дорівнює  $1$  або  $-1$ , якщо зв'язок лінійний. Коефіцієнт  $r$  є випадковою величиною, оскільки обчислюється за випадковими величинами.

### 3.2. Діаграма розкидання

Діаграму розкидання добре використовувати для того, щоб показати взаємовідношення між двома змінними. Діаграма спочатку чітко показує чи існує зв'язок між двома змінними. Позитивний зв'язок: якщо  $X$  збільшується, то  $Y$  теж збільшується. Негативний зв'язок: якщо  $X$  збільшується, то  $Y$  зменшується. Зв'язок відсутній: одна кількість ніяк не співвідноситься (не корелює) з іншою.

Діаграма розкиду будується наступним чином. Збираються набори пар даних  $(X, Y)$ . Визначаються найменше та найбільше значення для  $X$  і  $Y$ . Визначається шкала осей так, щоб вони були приблизно рівні по довжині. Розподіляється вісь так, щоб рушійний фактор (незалежна змінна) знаходилася на осі  $X$ , а той, що знаходиться під його впливом (залежна змінна) — на осі  $Y$ . Після подання даних на графік аналізуються дані та зв'язок між ними.

### 3.3. Ранжований ряд

Побудова рангового ряду використовується для оцінювання якості матеріалів і являє собою методичний підхід, заснований на одержанні узагальнених показників, котрий базується на безлічі приватних характеристик з урахуванням їх ваги значущості. При цьому має місце наступний алгоритм.

Визначаються показники, що характеризують властивості матеріалу. Визначаються значення показників по кожному з альтернативних варіантів (в натуральних одиницях виміру, а за необхідності в балах),  $A$ . За допомогою експертної методи вибудовується послідовність індивідуальних показників, ранжованих за ступенем їх значущості. Вибирається варіант-«еталон», який є базовим при зіставленні індивідуальних показників (як еталон може бути використаний будь-який із альтернативних варіантів). Оскільки розрахунок наводиться до оцінки в 100 балів аналізованого матеріалу, то для всіх показників «еталона» проставляються значення в 100 балів. Індивідуальні показники зіставляються з «еталонним» варіантом і визначаються індекси особистих показників ( $B_i$ ) по кожному варіанту за формулою

$$B_i = A_1 / A_{iB} , \quad (13)$$

де  $A_{iB}$  — індивідуальний показник, котрий відвідає кожному варіанту-«еталону». Для обліку цінової складової встановлюються показники ціни (в умовних одиницях) для кожного зразку матеріалу  $P_i$ . Розраховується відносний економічний показник за формулою

$$P'_i = \frac{P_i}{\sum B_i} \cdot 100 . \quad (14)$$

На підставі сукупної оцінки в балах і ціни в 100 балів, яка повинна прагнути до мінімуму, можна зробити висновок про найбільш зручні матеріали і, відповідно, про набір їх необхідних властивостей.

#### 4. ПОБУДОВА АЛГОРИТМУ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ МАТЕРІЯЛІВ

Усі методичні рекомендації щодо проведення випробувань та одержання даних, а також виконання оцінювання якості узагальнено в алгоритмі, представленим на рис. 4. Відповідно до даного алгоритму відбувається вибір методи випробування в залежності від матеріалу, а точніше умов його застосування. В залежності від виду випробування визначаються відповідні кваліметричні методи оцінювання. Слід зазначити, що визначення кваліметричних метод в залежності від виду випробування обумовлено сутністю самих експериментів. В експериментах з газовими гарматами і в експериментах з вибуховим навантаженням в основному одержують кінцеві дані (величини). Тому в даному випадку найбільш прийнятним і рекомендованим є використання в якості основної кваліметричної методи «павутини» якості.

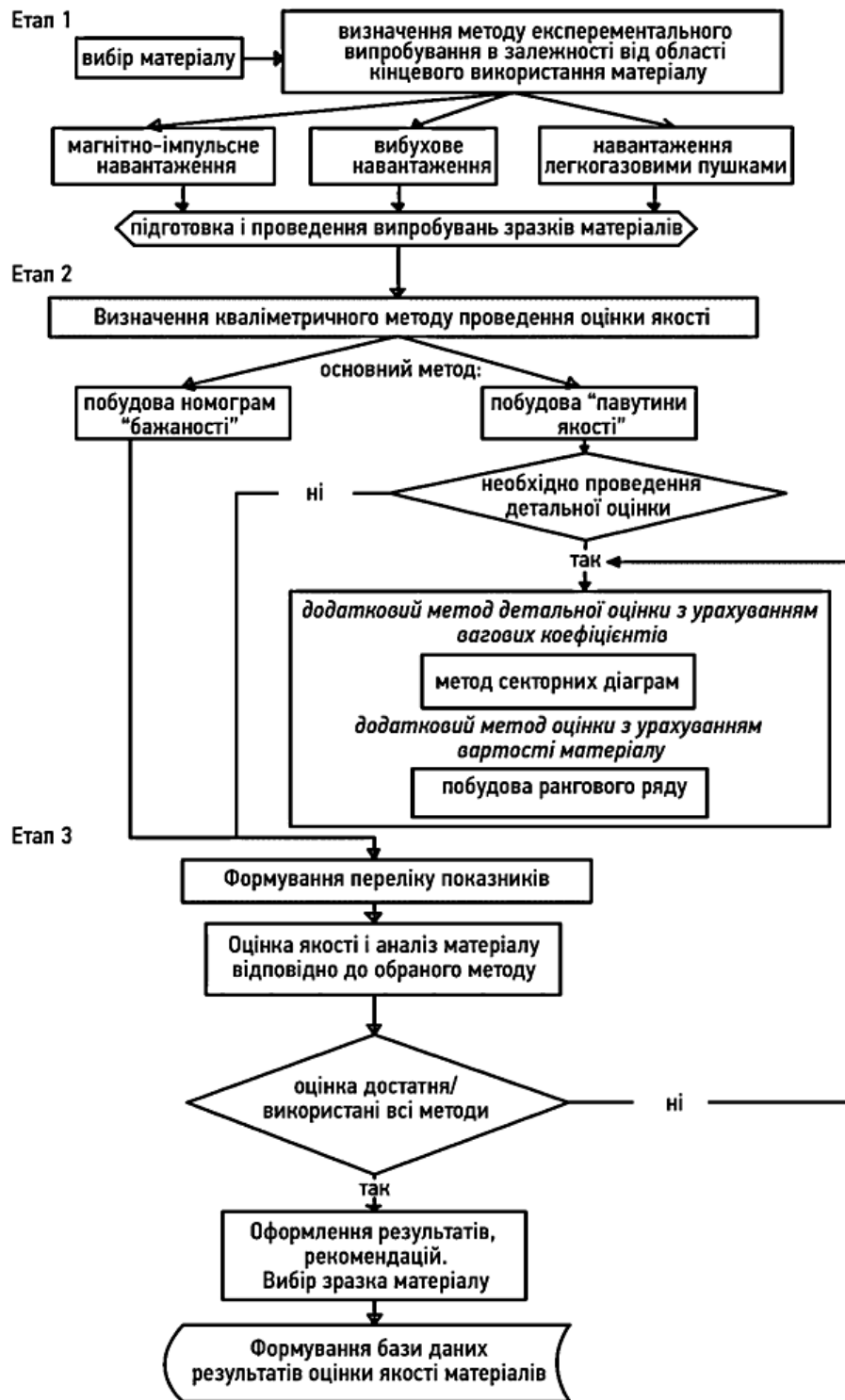


Рис. 4. Алгоритм визначення метод оцінювання якості матеріалів.<sup>7</sup>

У цій методі підрахунок рівня якості ґрунтується на співвідношеннях кінцевих величин. В якості додаткових метод авторами запропоновано методу секторних діаграм і методу побудови ранжованого ряду. При значних кількостях об'єктів дані методи дозволяють розробляти додаткову оцінку впливу ринкової ціни на підсумковий показник. Оцінювання за допомогою цінового коефіцієнту вельми ефективно для ринкових і конкуруючих матеріалів: металів, криць, стопів тощо. Для імпульсного навантаження авторами визначено кваліметричну методу оцінювання — побудову номограм. Це пов'язано з тим, що за таких випробувань одержують залежності різних величин, в основному довжини поширення тріщин. В даному випадку метода побудови номограм є підходящою і єдино можливою для проведення оцінювання якості матеріалів при подібних випробуваннях.

Авторами було вирішено задачу з розроблення градацій якості, які покладено в основу побудови номограм. Для цього авторами проаналізовано поведінку матеріалів в умовах імпульсного навантаження та визначено залежності для складання таблиць градацій. В результаті аналізу запропоновано варіанти таблиць градацій для двох матеріалів: оргскла та сферопластику.

В алгоритмі визначено порядок використання додаткових метод і випадки їх можливого використання. Метода секторних діаграм передбачає використання при значних кількостях об'єктів процедуру порівняння, якщо складно визначити об'єкт з найліпшими характеристиками. Метода побудови ранжованого ряду використовується там, де доцільна аналіза з точки зору ринкової ціни. Дана метода більш характерна для металів, криць, оскільки оцінює й цінову конкурентоспроможність матеріалу, що може бути важливим при виборі матеріалу для розроблення. Порядок проведення оцінювання в загальному вигляді представлено в етапі 3 і складається з формування переліку показників, оцінювання якості та висновків за результатами оцінювання з відповідними рекомендаціями. Результати всіх проведених оцінювань можуть бути зведені в єдину базу, а в подальшому використовуватися для аналізу і зіставлення. В деяких випадках накопичені дані можуть слугувати основою для прогнозування якостей матеріалів за певних умов. Саме тому важливим є зберігання й узагальнення результатів оцінювань.

## 5. ВИСНОВКИ

Таким чином, сутність представленого підходу складається з трьох головних моментів. Це, по-перше, результати аналізу сучасних проблем оцінювання якості різних матеріалів. По друге, результати аналізу експериментальних метод випробування ма-



теріалів ударним способом, їх основних характеристик і параметрів, які впливають на їх (не)рівноважні властивості. На основі цих двох моментів сформульовано основний принцип підходу, який полягає в тому, що основними критеріями якості для навантажених матеріалів можуть бути динамічні характеристики. Рештою характеристик і показників якості в даному випадку можна знехтувати, прийнявши їх не настільки важливими, а точніше врахувавши їх у вигляді певної константи, яка впливає на підсумковий рівень якості подібних матеріалів.

Третій момент підходу є наслідком виконаного припущення на основі аналізу сучасного досвіду застосування комплексно-кількісних метод про вибір найбільш прийнятних метод оцінювання матеріалів в умовах високошвидкісного навантаження. Як показує представлена аналіза матеріалів, це вирішує проблему оцінювання якості імпульсно-навантажених матеріалів і створює альтернативний механізм оцінювання якості поряд з експертним методом. Крім того, дані методи найбільшою мірою є підходящими при експериментальних випробуваннях, є наочними та легко відтворюваними. За наявності відповідних рекомендацій щодо застосування даних метод вони можуть бути легко впроваджені на виробництві або в навчальному процесі.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, *Предельная прочность — кристаллы, металлы, элементы, конструкции* (Київ: Наукова думка: 2008).
2. B. Tang, X.-S. Wang, S.-S. Li, D.-B. Zeng, and R. Wu, *Mater. Sci. Techn.*, **21**, No. 5: 574 (2005).
3. K. Khantha, V. Vitek, and D. P. Pope, *Mater. Sci. Eng. A*, **319–321**: 484 (2001).
4. В. Г. Ткаченко, *Успехи физики металлов*, **10**, № 1: 103 (2009).
5. И. П. Суздалев, П. И. Суздалев, *Успехи химии*, **75**, № 8: 715 (2006).
6. А. И. Химичева, В. В. Куриляк, *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, **5**, № 1 (77): 70 (2015).
7. В. В. Куриляк, Г. І. Хімичева, *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія «Проблеми механічного приводу»*, № 35 (1144): 80 (2015).
8. Г. І. Хімичева, В. В. Куриляк, *Вісник Київського національного університету технологій і дизайну*, № 6 (92): 67 (2015).
9. Г. І. Хімичева, В. В. Куриляк, *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія «Нові рішення в сучасних технологіях»*, № 62 (1171): 40 (2015).
10. Г. І. Хімичева, В. В. Куриляк, *Вісник Чернігівського державного технічного університету. Серія «Технічні науки»*, № 2 (78): 76 (2015).
11. В. В. Куриляк, *Технологічний аудит та резерви виробництва*, **4**, № 3 (30): 53 (2016).
12. Г. І. Хімичева, В. В. Куриляк, *Вісник національного технічного*

- університету «Харківський політехнічний інститут», № 25 (1197): 125 (2016).
13. В. Г. Ткаченко, К. Ч. Ким, Б. Г. Мун, А. И. Дегтяр, О. П. Карасевская, А. С. Вовчок, *Успехи физики металлов*, **11**, № 2: 249 (2010).
  14. О. В. Овсянников, *Особливості деформації та руйнування перехідних ОЦК металів у нанооб'ємі* (Дисер. ... канд. фіз. мат. наук) (Київ: Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України: 2006).
  15. В. В. Куриляк, Г. І. Хімічева, *Успехи физики металлов*, **17**, № 4: 375 (2016).
  16. В. Е. Громов, Е. В. Капралов, С. В. Райков, Ю. Ф. Иванов, Е. А. Будовских, *Успехи физики металлов*, **15**, № 4: 213 (2014).
  17. В. Е. Громов, К. В. Волков, Ю. Ф. Иванов, К. В. Морозов, К. В. Алсараева, С. В. Коновалов, *Успехи физики металлов*, **15**, № 1: 1 (2014).
  18. Д. А. Романов, В. Е. Громов, Е. А. Будовских, Ю. Ф. Иванов, *Успехи физики металлов*, **16**, № 2: 119 (2015).
  19. В. Е. Громов, К. В. Соснин, Ю. Ф. Иванов, О. А. Семина, *Успехи физики металлов*, **16**, № 3: 175 (2015).
  20. В. Е. Громов, К. В. Аксёнова, С. В. Коновалов, Ю. Ф. Иванов, *Успехи физики металлов*, **16**, № 4: 265 (2015).
  21. В. Е. Громов, Е. Н. Никитина, Ю. Ф. Иванов, К. В. Аксёнова, Е. В. Корнет, *Успехи физики металлов*, **16**, № 4: 299 (2015).
  22. В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, Е. Г. Белов, В. Б. Костерев, Д. А. Косинов, *Успехи физики металлов*, **17**, № 4: 303 (2016).
  23. В. Б. Молодкин, В. Е. Сторижко, В. В. Лизунов, С. В. Лизунова, Н. Г. Толмачёв, Л. Н. Скапа, Е. В. Фузик, В. В. Молодкин, Е. С. Скакунова, Б. В. Шелудченко, С. В. Дмитриев, Е. В. Кочелаб, Р. В. Лехняк, *Успехи физики металлов*, **16**, № 2: 159 (2015).
  24. В. О. Коцюбинский, В. М. Пылыпив, Б. К. Остафийчук, И. П. Яремий, О. З. Гарпуль, С. И. Олиховский, Е. С. Скакунова, В. Б. Молодкин, Е. Н. Кисловский, Т. П. Владимиров, О. В. Решетник, Е. В. Кочелаб, *Успехи физики металлов*, **15**, № 3: 121 (2014).
  25. В. В. Лизунов, В. Б. Молодкин, С. В. Лизунова, Н. Г. Толмачев, Е. С. Скакунова, С. В. Дмитриев, Б. В. Шелудченко, С. М. Бровчук, Л. Н. Скапа, Р. В. Лехняк, В. В. Молодкин, Е. В. Фузик, *Успехи физики металлов*, **15**, № 2: 55 (2014).
  26. Т. М. Радченко, В. А. Татаренко, *Успехи физики металлов*, **9**, № 1: 1 (2008).
  27. В. А. Татаренко, Т. М. Радченко, *Успехи физики металлов*, **3**, № 2: 111 (2002).
  28. Т. М. Радченко, В. А. Татаренко, І. Ю. Сагалянов, Ю. І. Прилуцький, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **13**, № 2: 201 (2015).
  29. V. A. Tatarenko and T. M. Radchenko, *Intermetallics*, **11**, Nos. 11–12: 1319 (2003).
  30. Т. М. Radchenko, V. A. Tatarenko, and S. M. Vokoch, *Металлофизика и новейшие технологии*, **28**, № 12: 1699 (2006); arXiv:1406.0147.
  31. В. А. Татаренко, Т. М. Радченко, *Успехи физики металлов*, **3**, № 2: 111 (2002).
  32. В. А. Татаренко, Т. М. Радченко, В. М. Надутов, *Металлофизика и новейшие технологии*, **25**, № 10: 1303 (2003).
  33. І. Ю. Сагалянов, Ю. І. Прилуцький, Т. М. Радченко, В. А. Татаренко, *Успехи физики металлов*, **11**, № 1: 95 (2010).

34. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, and H. Zapolsky, *Solid State Phenomena*, **138**: 283 (2008).
35. V. A. Tatarenko, S. M. Bokoch, V. M. Nadutov, T. M. Radchenko, and Y. B. Park, *Defect and Diffusion Forum*, **280–281**: 29 (2008).
36. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, H. Zapolsky, and D. Blavette, *J. Alloys and Compounds*, **452**, No. 1: 122 (2008).
37. T. M. Radchenko and V. A. Tatarenko, *Defect and Diffusion Forum*, **273**: 525 (2008).
38. T. M. Radchenko and V. A. Tatarenko, *Physica E*, **42**, No. 8: 2047 (2010).
39. T. M. Radchenko and V. A. Tatarenko, *Solid State Sciences*, **12**, No. 2: 204 (2010).
40. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, I. Yu. Sagalianov, Yu. I. Prylutskiy, P. Szroeder, and S. Biniak, *Carbon*, **101**: 37 (2016).
41. T. M. Radchenko and V. A. Tatarenko, *Solid State Phenomena*, **150**: 43 (2009).
42. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, I. Yu. Sagalianov, and Yu. I. Prylutskiy, *Physics Letters A*, **378**, Nos. 30–31: 2270 (2014).
43. С. М. Бокоч, Н. П. Кулиш, Т. М. Радченко, В. А. Татаренко, *Металлофизика и новейшие технологии*, **26**, № 3: 387 (2004).
44. С. М. Бокоч, Н. П. Кулиш, В. А. Татаренко, Т. М. Радченко, *Металлофизика и новейшие технологии*, **26**, № 4: 541 (2004).

## REFERENCES

1. S. A. Kotrechko and Yu. Ya. Meshkov, *Predel'naya Prochnost'—Kristally, Metally, Elementy, Konstruktsii* [Ultimate Strength—Crystals, Metals, Elements, Constructions] (Kiev: Naukova Dumka: 2008) (in Russian).
2. B. Tang, X.-S. Wang, S.-S. Li, D.-B. Zeng, and R. Wu, *Mater. Sci. Techn.*, **21**, No. 5: 574 (2005).
3. K. Khantha, V. Vitek, and D. P. Pope, *Mater. Sci. Eng. A*, **319–321**: 484 (2001).
4. В. Г. Ткаченко, *Успехи физики металлов*, **10**, № 1: 103 (2009) (in Russian).
5. I. P. Suzdalev and P. I. Suzdalev, *Russian Chemical Reviews*, **75**, No. 8: 637 (2006).
6. A. I. Khimicheva and V. V. Kurylyak, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **5**, No. 1 (77): 70 (2015) (in Ukrainian).
7. V. V. Kurylyak and G. I. Khimicheva, *Bulletin of the National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute'. Series 'Problems of Mechanical Drive'*, No. 35 (1144): 80 (2015) (in Ukrainian).
8. G. I. Khimicheva and V. V. Kurylyak, *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*, No. 6 (92): 67 (2015) (in Ukrainian).
9. G. I. Khimicheva and V. V. Kurylyak, *Bulletin of the National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute'. Series New Solutions in Modern Technologies'*, No. 62 (1171): 40 (2015) (in Ukrainian).
10. G. I. Khimicheva and V. V. Kurylyak, *Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series Technical Sciences*, No. 2 (78): 76 (2015) (in Ukrainian).
11. V. V. Kurylyak, *Technology Audit and Production Reserves*, **4**, No. 3 (30): 53 (2016) (in Ukrainian).
12. A. I. Khimicheva and V. V. Kurylyak, *Bulletin of the National Technical*

- University Kharkiv Polytechnic Institute. Series 'New Solutions in Modern Technologies*, No. 25 (1197): 125 (2016) (in Ukrainian).
13. V. G. Tkachenko, K. H. Kim, B. G. Moon, O. I. Dekhtyar, O. P. Karasevska, and O. S. Vovchok, *Uspehi Fiziki Metallov*, **11**, No. 2: 249 (2010) (in Russian).
  14. O. V. Ovsyannikov, *Osoblyvosti Deformatsii ta Ruinuvannya Perekhidnykh OTsK Metaliv u Nanoob'yemi* [Peculiarities of Plastic Deformation and Fracture of Transition B.C.C. Metals on Nanoscale] (Thesis of Dissert. for Cand. Phys.-Math. Sci.) (Kyiv: G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of N.A.S. of Ukraine: 2006) (in Ukrainian).
  15. V. V. Kurylyak and G. I. Khimicheva, *Uspehi Fiziki Metallov*, **17**, No. 4: 375 (2016) (in Ukrainian).
  16. V. E. Gromov, E. V. Kapralov, S. V. Raikov, Yu. F. Ivanov, and E. A. Budovskikh, *Uspehi Fiziki Metallov*, **15**, No. 4: 213 (2014) (in Russian).
  17. V. E. Gromov, K. V. Volkov, Yu. F. Ivanov, K. V. Morozov, K. V. Alsarayeva, and S. V. Konovalov, *Uspehi Fiziki Metallov*, **15**, No. 1: 1 (2014) (in Russian).
  18. D. A. Romanov, V. E. Gromov, E. A. Budovskikh, and Yu. F. Ivanov, *Uspehi Fiziki Metallov*, **16**, No. 2: 119 (2015) (in Russian).
  19. V. E. Gromov, K. V. Sosnin, Yu. F. Ivanov, and O. A. Semina, *Uspehi Fiziki Metallov*, **16**, No. 3: 175 (2015) (in Russian).
  20. V. E. Gromov, K. V. Aksyonova, S. V. Konovalov, and Yu. F. Ivanov, *Uspehi Fiziki Metallov*, **16**, No. 4: 265 (2015) (in Russian).
  21. V. E. Gromov, E. N. Nikitina, Yu. F. Ivanov, K. V. Aksyonova, and E. V. Kornet, *Uspehi Fiziki Metallov*, **16**, No. 4: 299 (2015) (in Russian).
  22. V. E. Gromov, Yu. F. Ivanov, E. G. Belov, V. B. Kosterev, and D. A. Kosinov, *Uspehi Fiziki Metallov*, **17**, No. 4: 303 (2016) (in Russian).
  23. V. B. Molodkin, V. Yu. Storizhko, V. V. Lizunov, S. V. Lizunova, M. G. Tolmachov, L. M. Skapa, K. V. Fuzik, V. V. Molodkin, O. S. Skakunova, B. V. Sheludchenko, S. V. Dmitriev, Ye. V. Kochelab, and R. V. Lekhnyak, *Uspehi Fiziki Metallov*, **16**, No. 2: 159 (2015) (in Ukrainian).
  24. V. O. Kotsyubyns'kyi, V. M. Pylypiv, B. K. Ostafiychuk, I. P. Yaremii, O. Z. Garpul', S. J. Olikhovskyy, O. S. Skakunova, V. B. Molodkin, Ye. M. Kyslovs'kyi, T. P. Vladimirova, O. V. Reshetnyk, and Ye. V. Kochelab, *Uspehi Fiziki Metallov*, **15**, No. 3: 121 (2014) (in Ukrainian).
  25. V. V. Lizunov, V. B. Molodkin, S. V. Lizunova, N. G. Tolmachev, O. S. Skakunova, S. V. Dmitriev, B. V. Sheludchenko, S. M. Brovchuk, L. M. Skapa, R. V. Lekhnyak, V. V. Molodkin, and K. V. Fuzik, *Uspehi Fiziki Metallov*, **15**, No. 2: 55 (2014) (in Russian).
  26. T. M. Radchenko and V. A. Tatarenko, *Uspehi Fiziki Metallov*, **9**, No. 1: 1 (2008) (in Ukrainian).
  27. V. A. Tatarenko and T. M. Radchenko, *Uspehi Fiziki Metallov*, **3**, No. 2: 111 (2002) (in Ukrainian).
  28. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, I. Yu. Sagalyanov, and Yu. I. Pryluts'kyi, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **13**, No. 2: 201 (2015) (in Ukrainian).
  29. V. A. Tatarenko and T. M. Radchenko, *Intermetallics*, **11**, Nos. 11–12: 1319 (2003).
  30. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, and S. M. Bokoch, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **28**, No. 12: 1699 (2006); arXiv:1406.0147.

31. V. A. Tatarenko and T. M. Radchenko, *Uspehi Fiziki Metallov*, **3**, No. 2: 111 (2002) (in Ukrainian).
32. V. A. Tatarenko, T. M. Radchenko, and V. M. Nadutov, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **25**, No. 10: 1303 (2003) (in Ukrainian).
33. I. Yu. Sagalyanov, Yu. I. Prylutsky, T. M. Radchenko, and V. A. Tatarenko, *Uspehi Fiziki Metallov*, **11**, No. 1: 95 (2010) (in Ukrainian).
34. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, and H. Zapolsky, *Solid State Phenomena*, **138**: 283 (2008).
35. V. A. Tatarenko, S. M. Bokoch, V. M. Nadutov, T. M. Radchenko, and Y. B. Park, *Defect and Diffusion Forum*, **280–281**: 29 (2008).
36. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, H. Zapolsky, and D. Blavette, *J. Alloys and Compounds*, **452**, No. 1: 122 (2008).
37. T. M. Radchenko and V. A. Tatarenko, *Defect and Diffusion Forum*, **273**: 525 (2008).
38. T. M. Radchenko and V. A. Tatarenko, *Physica E*, **42**, No. 8: 2047 (2010).
39. T. M. Radchenko and V. A. Tatarenko, *Solid State Sciences*, **12**, No. 2: 204 (2010).
40. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, I. Yu. Sagalyanov, Yu. I. Prylutsky, P. Szroeder, and S. Biniak, *Carbon*, **101**: 37 (2016).
41. T. M. Radchenko and V. A. Tatarenko, *Solid State Phenomena*, **150**: 43 (2009).
42. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, I. Yu. Sagalyanov, and Yu. I. Prylutsky, *Physics Letters A*, **378**, Nos. 30–31: 2270 (2014).
43. S. M. Bokoch, M. P. Kulish, T. M. Radchenko, and V. A. Tatarenko, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **26**, No. 3: 387 (2004) (in Russian).
44. S. M. Bokoch, M. P. Kulish, V. A. Tatarenko, and T. M. Radchenko, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **26**, No. 4: 541 (2004) (in Russian).

---

\*Kyiv National University of Technologies and Design,  
2 Nemirovich-Danchenko Str.,  
UA-01011 Kyiv, Ukraine

<sup>1</sup> TABLE 1. Characteristics of storage device.

<sup>2</sup> Fig. 1. Experimental setup for throwing of flat shock device via explosion: 1—flat-wave generator (explosion lens), 2—explosive charge, 3—focal ring, 4—methan-hammer, 5—target (sample).<sup>2</sup>

<sup>3</sup> Fig. 2. Experimental setup and sample loading.

<sup>4</sup> Fig. 3. Optical registration scheme: 1—photographic film, 2—mirror, 3 and 6—photolens system, 4—shutter, 5—adjusting slit, 7—sample, 8—moving crack, 9—flash lamp ІФП-120, 10—fiber.

<sup>5</sup> TABLE 2. Desirability coefficients  $q$  and relative dimensionless auxiliary quantities  $y$ .

<sup>6</sup> TABLE 3. Desirability function for primary and intermediate points.

<sup>7</sup> Fig. 4. Algorithm for determination of methods of evaluation of material quality.