

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

Обґрунтування застосування комплексно-кількісних метод зادля оцінювання якостей матеріалів за умов високошвидкісного навантаження

В. В. Куриляк, Г. І. Хімічева

**Київський національний університет технологій та дизайну,
кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій та вимірювальної 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 роботі нами було проведено й представлено аналізу динамічних властивостей металевих матеріалів за умов імпульсних навантажень. Показано, що ударні навантаження характеризують матеріал з точки зору динамічних властивостей (тобто характеристик руйнування), є ключовими та домінуючими в умовах імпульсних навантажень, а отже, найбільшою мірою характеризують якість матеріалів за умов високошвидкісних навантажень. На основі проведеної аналізу метод оцінювання якості матеріалів, а також аналізу їхньої поведінки за умов ударного навантаження зроблено висновок про те, що основними та визначальними характеристиками їхньої якості є динамічні характеристики. На основі цих характеристик побудовано систему показників якості навантажених матеріалів. Аналіза результатів сучасних методик оцінювання якості об'єктів за умов ударних навантажень засвідчила наявність проблем внаслідок неякісного оцінювання матеріалів. Продемонстровано, що результати аналізу експериментальних метод випробування матеріалів ударним способом, основних характеристик і параметрів впливають на кінцеві властивості матеріалів. На основі наведених аргументів ми сформулювали основний принцип підходу, який визначає для навантажених матеріалів основні критерії їхньої якості (динамічні характеристики). Аналізуючи сучасний досвід у застосуванні комплексно-кількісних методик, зробили вибір найбільш прийнятних метод оцінювання матеріалів за умов високошвидкісного навантаження. Представлений перелік матеріалів сприяє вирішенню проблеми створення альтернативного механізму оцінювання якості навантажених матеріалів (поряд з експертним шляхом). Комплексно-кількісні методи найбільшою мірою є придатними для використання їх в експериментальних випробуваннях, є наочними і легко

відтворюваними. За наявності рекомендацій щодо застосування даних метод останні можна легко впровадити у виробництво і навчальний процес.

Due to the fact that, in the modern metrological database, there is no clear methodology for estimating quality of materials under the conditions of shock and high-speed loads, in this work, the analysis of dynamic properties of metallic materials at the impulsive loads is carried out and presented. As shown, the shock loads characterize material on a viewpoint of dynamic properties (*i.e.* fracture characteristics) are key and dominant at the impulsive loads. This means that shock loads characterize the quality of materials under the high-speed loads. Based on the analysis of the methods of assessment of quality of materials as well as the analysis of their behaviour in the conditions of shock load, it concluded that the main and governing characteristics defining their quality are the dynamic characteristics. Based on these characteristics, a system of indicators of quality of the loaded materials is constructed. The analysis of results of the modern methods for assessing quality of objects in conditions of impact loads has shown series of problems due to the low-quality assessment of the materials. It is demonstrated that the results of the analysis of experimental methods for testing of materials via impact way, the basic characteristics and parameters affect the final properties of the materials. Based on the adduced arguments, we formulated the basic approach principle defining the main criteria of the loaded materials' quantity (dynamical characteristics). Analysing contemporary experience in the using of complex-quantitative methods, the most suitable methods for assessment of materials under the conditions of high load are selected. Presented list of materials contributed to the solution of the problem of creating an alternative mechanism for estimating the quality of the loaded materials (along with expert way). Complex-quantitative methods are the best suited for use in experimental tests, and are obvious and easily reproducible. If there are recommendations on application of the methods, the latter can be easily implemented in both the fabrication and educational process.

В связи с тем, что в современной метрологической базе данных отсутствует чёткая методика оценки качества материалов в условиях ударных и высокоскоростных нагрузок, в данной работе нами был проведён и представлен анализ динамических свойств металлических материалов в условиях импульсных нагрузок. Показано, что ударные нагрузки характеризуют материал с точки зрения динамических свойств (то есть характеристик разрушения) являются ключевыми и доминирующими в условиях импульсных нагрузок, а значит, в наибольшей степени характеризуют качество материалов в условиях высокоскоростных нагрузок. На основе проведённого анализа методов оценки качества материалов, а также анализа их поведения в условиях ударной нагрузки сделан вывод о том, что основными и определяющими характеристиками их качества являются динамические характеристики. На основе этих характеристик построена система показателей качества нагруженных материалов. Анализ результатов современных методик оценки качества объектов в условиях ударных нагрузок засвидетельствовал на-

личие ряда проблем вследствие некачественной оценки материалов. Продемонстрировано, что результаты анализа экспериментальных методов испытания материалов ударным способом, основных характеристик и параметров влияют на конечные свойства материалов. На основе приведённых аргументов мы сформулировали основной принцип подхода, который определяет для нагруженных материалов основные критерии их качества (динамические характеристики). Анализируя современный опыт в применении комплексно-количественных методик, сделали выбор наиболее приемлемых методов оценки материалов в условиях высокоскоростного нагружения. Представленный перечень материалов способствует решению проблемы создания альтернативного механизма оценки качества нагружённых материалов (наряду с экспертным путём). Комплексно-количественные методы в наибольшей степени подходят для использования их в экспериментальных испытаниях, являются наглядными и легко воспроизводимыми. При наличии рекомендаций по применению данных методов последние можно легко внедрить в производство и учебный процесс.

Ключові слова: комплексно-кількісні методи, високошвидкісне навантаження, система оцінювання якості матеріалів.

Keywords: complex-quantitative method, high-speed load, system for estimation of quality of materials.

Ключевые слова: комплексно-количественные методы, высокоскоростная нагрузка, система оценки качества материалов.

(Отримано 26 вересня 2016 р.)

1. ВСТУП

Досвід управління якістю продукції показує, що забезпечення стабільної якості будь-яких виробів неможливо, якщо не домогтися стабільно високої якості вихідних матеріалів [1]. Одержання якісних матеріалів, підвищення їх якості, а також управління даним процесом неможливе без оцінювання рівня якості. Але перед оцінюванням рівня якості об'єкта необхідно визначитися що розуміється під якістю. Відповідно до визначення ДСТУ ISO 9000-2001 якістю є ступінь відповідності сукупності властивих характеристик вимогам. Характеристика, в свою чергу, є відмінною властивістю об'єкта [2].

Таким чином, кажучи про якість об'єкта, зокрема матеріалу, ми маємо на увазі певну сукупність його характеристик або відмінних властивостей. Головне, щоб вибірка даних характеристик при оцінці рівня якості об'єкта була репрезентативною і в повній мірі могла говорити про його якість. Як відомо, оцінка якості матеріалів містить вивчення усіх відмінних властивостей, та-

ких як механічні, фізичні, хемічні, експлуатаційні тощо [3–11]. У даній статті проведено вивчення динамічних властивостей різних матеріалів за умов ударних навантажень; тому оцінка теж наводиться, виходячи, в основному, з даних умов.

Ударні навантаження характеризують матеріал більшою мірою з точки зору динамічних властивостей, тобто характеристик руйнування. В даному випадку необхідно зауважити, що динамічні характеристики матеріалів є ключовими і домінуючими, а інші ж властивості матеріалів, такі як хемічний склад, або фізичні властивості впливають на якість різних зразків одного і того ж матеріалу в рівній мірі, тому можна допустити, що даний вплив є незначним. Можна вважати, що в уданих умовах динамічні властивості найбільшою мірою характеризують якість матеріалів. У зв'язку з цим в даній статті здійснено вивчення характеристик матеріалів в умовах ударних навантажень і проведено оцінювання якості матеріалів з точки зору характеристик руйнування. Перш ніж перейти до питань оцінки якості матеріалів, порядку проведення оцінки, вибору критеріїв і показників, необхідно визначитися, що мається на увазі під динамічними характеристиками матеріалів.

2. ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРІАЛІВ

Високошвидкісний удар і вибух впливає на стан матеріалу за дуже короткий проміжок часу. Так в результаті швидкісного деформування та руйнування матеріалів можуть спостерігатися локальне нагрівання матеріалу, протікання різних механізмів деформації, поліморфне перетворення матеріалу, зміцнення, поширення тріщини і поява тильного відколу — відколювальне руйнування [12, 13]. Фізичні умови, що виникають при високошвидкісному зіткненні тіл різноманітні, вони визначаються властивостями і станом ударника, конструкцією і реакцією перепони. Ефекти взаємодії реалізуються в процесі ударного переходу матеріалу перепони від вихідного стану спокою, що характеризується стандартними показниками якості до кінцевого стану спокою.

Одним з основних та ключових критеріїв в даному випадку є відколювальне руйнування. Для вивчення цього явища існує поняття відколювальної міцності (або динамічної міцності), яка досліджується на основі аналізу відколювальних явищ при відображенні імпульсів стиснення від вільної поверхні тіла [14]. Вільна поверхня являє собою протилежну від місця зіткнення сторону тіла. Рух речовини при відображенні ударного імпульсу навантаження визначається інтерференцією падаючих і відбитих хвиль. В результаті після відображення імпульсу стиснення від поверхні всередині тіла генеруються і розтягуються напруження,

які можуть призвести до внутрішнього розриву — відколу [15].

При створенні системи захисту основною технічною вимогою є мінімальна товщина перешкоди. Зменшення обсягу деформованої зони збільшує частку імпульсу енергії, що виходить на вільну поверхню, її швидкість зростає і може досягати подвійної швидкості удару. В результаті обсяг перепони в області тильної поверхні відколюється від основної маси за рахунок накладення на пряму ударну хвилю стиснення відбитої хвилі розтягування. Пробиття мішені є граничним станом матеріалу і залежить від обумовлених і випадкових факторів, таких як умови зіткнення і розподіл дефектів. Як правило, експериментальні дані відносяться до конкретних умов зіткнення зі змінною швидкістю або товщиною перепони. Таким чином, основними динамічними характеристиками якості матеріалів в даному випадку будуть такі:

- складові мікроструктури матеріалу;
- параметри навантаження (швидкість, імпульс);
- параметри ударника (товщина, матеріал);
- параметри перепони (товщина, матеріал);
- параметри руйнування (відколювальна швидкість, відколювальна міцність, швидкість поширення тріщини, енергія руйнування) [16].

Причому, показник відколювальної міцності в даному випадку є визначальним параметром тому, що характеризує ступінь опору матеріалу руйнуванню (несприятливого стану), а, отже, даний показник повинен стояти на чолі питань оцінювання якості матеріалу.

3. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ МАТЕРІАЛІВ ЗА УМОВ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Як вже говорилося вище, для матеріалів в умовах ударного навантаження оцінювання якості і вибір критеріїв необхідно проводити з точки зору динамічних характеристик. Як видно, стандартні підходи в оцінюванні якості в даному випадку малозастосовні, тому в даній статті зроблено спробу узагальнити найбільш підхожі методи оцінювання якості та застосувати ряд з них для матеріалів в умовах ударного навантаження.

В даний час розроблення в галузі оцінки якості та розробки критеріїв, пов'язаних з навантаженням матеріалів, мало представлено в літературі. До основних можливих варіантів оцінювання якості навантажених матеріалів можна віднести побудову функції бажаності (або Харрінгтонів критерій), диференційну методу (побудова циклограми або «павутини» якості), коефіцієнт економічної доцільності, побудову ранжованого ряду. Також в залежності від ситуації можливе застосування статистичних ме-

тод. У роботі [17] пропонується спосіб оцінювання надійності металоконструкції з точки зору тріщиностійкості.

З метою підвищення надійності конструкцій необхідно збільшувати ймовірність виявлення тріщини перш ніж вона досягне критичного розміру. Великі тріщини виявити легше, ніж маленькі. Отже, краще використовувати матеріяли, в яких критичні розміри тріщини великі.

Тріщиностійкість матеріялів слід оцінювати згідно з чинним рівнем напруги. Характеристикою матеріялу, навіть більш важливою, ніж його тріщиностійкість, є час поширення тріщини. Повний час поширення майже не залежить від критичного розміру тріщини, оскільки зростання тріщини на останньому етапі її поширення відбувається надзвичайно швидко. У зв'язку з цим пропонується порівнювати матеріяли з точки зору часу поширення в ньому тріщин від початкового розміру [18]. Результати представляються у вигляді тривимірних координат. Для порівняння матеріялів пропонується відношення напруги до щільності, яка показує, з якого матеріялу можна виготовити найлегші конструкції при даному терміні служби.

Таким чином, на координатах осей для таких матеріялів, як сталь, титан, алюміній, відкладаються значення початкового розміру тріщини, співвідношення напруги до щільності, цикли. Ступінь перекриття (розмір займаного обсягу) в осях координат показує найкращий варіант. Виходячи з цього, високоміцні криці доцільніше використовувати тільки для дуже малих початкових розмірів тріщин, тобто коли можуть бути використані надзвичайно «тонкі» методи перевірки. По суті, дана методика порівняння матеріялів є аналогом «павутини» якості, однак лише в трьох координатах. У чистому вигляді застосування «павутини» якості використовувалося при оцінюванні криць у роботі [19]. В даному випадку метода «павутини» використовувався для оцінки сталей для трубопроводів в умовах виробництва. Підхід полягав у виборі різних варіантів хемічного складу й умов охолодження.

Тому на двох осях відкладалися параметри охолодження, а на інших двох — параметри хемічного складу для різних сортів криці (рис. 1).

Так, варіант А, має високий вміст Карбону і максимальне значення Карбонового коефіцієнта, що в даному випадку є невдалим; тому підвищене значення Карбонового коефіцієнта є неприйнятним. Варіант Б має низький Карбоновий коефіцієнт і високу швидкість охолодження, але при цьому мінімальне значення вмісту Карбону і низьку температуру охолодження, що відповідає швидкому загартуванню з низькою температурою охолодження і сприяє появі шкідливих ефектів для міцності властивостей металу. Даний ефект тягне знеміцнення в зоні схильності

ТАБЛИЦЯ 1. Данні рівня якості умовного виробу.²

Номер п/п	Найменування показника	Відносне значення	Коефіцієнт вагомості	φ, град.
1	Питомий розхід палива	0,8	0,10	36
2	Потужність	1,5	0,15	54
3	Коефіцієнт готовності	0,9	0,20	72
4	Ресурс	0,8	0,25	90
5	Ціна	0,7	0,30	108
Сума		–	1,00	360

внює одиниці. Центральний кут для i -го показника з коефіцієнтом вагомості a_i визначається як $\varphi_i = 2\pi a_i$ ($\varphi_i = 360^\circ \cdot a_i$). Рівень якості продукції 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 можна здійснити за формулою

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

де n — число відносних показників якості; a_i — коефіцієнт вагомості; r_i — значення i -го показника.

Величина Y_k близька до середнього зваженого арифметичного показника: відхилення Y_k від цього показника в широкому діапазоні зміни відносних показників і коефіцієнтів вагомості не перевищують 10%.

За даними рівня якості (табл. 1), індексу якості (табл. 2) та індексу дефектності (табл. 3) умовного виробу, що випускається умовним підприємством, побудовано діаграми рівня якості (рис. 2), індексу якості (рис. 3) та індексу дефектності продукції (див. рис. 4).

Значення середнього зваженого кругового показника графічно

ТАБЛИЦЯ 2. Дані індексу якості продукції умовного виробництва.³

Номер виробу	Середній зважений круговий показник, Y_k	Відносне значення	Коефіцієнт вагомості	φ, град.
1	1,2	5	0,20	36
2	0,9	3	0,12	54
3	0,8	4	0,16	72
4	0,7	6	0,24	90
5	0,6	7	0,28	108
Сума		25	1,00	360

ТАБЛИЦЯ 3. Дані індексу дефектності продукції.⁴

Номер виробу	Коефіцієнт дефектності виробу, K_{qn}	Річний випуск, млн. грн.	Коефіцієнт вагомості	φ , град.
1	0,07	3	0,1	36
2	0,06	7	0,233	84
3	0,05	9	0,3	108
4	0,03	6	0,2	72
5	0,02	5	0,166	60
Сума		30	1	360

відображається колом у вигляді пунктирної лінії і становить

$$Y_k = \sqrt{0,10 \cdot 0,8^2 + 0,15 \cdot 1,5^2 + 0,2 \cdot 0,9^2 + 0,25 \cdot 0,8^2 + 0,3 \cdot 0,7^2} = 0,933. \quad (2)$$

Якщо, $Y_k < 1$, то це означає, що рівень якості умовного виробу є нижчим аналогу.

Індекс якості I_k визначається за формулою

$$I_k = \sqrt{\sum_{j=1}^5 a_j Y_{kj}^2}, \quad (3)$$

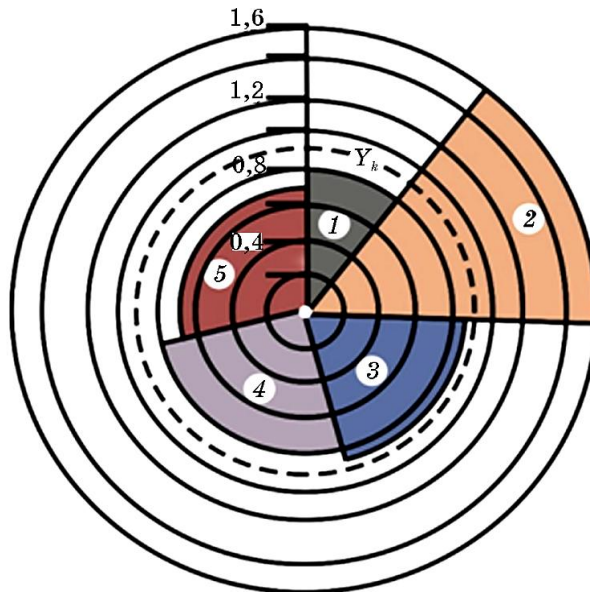
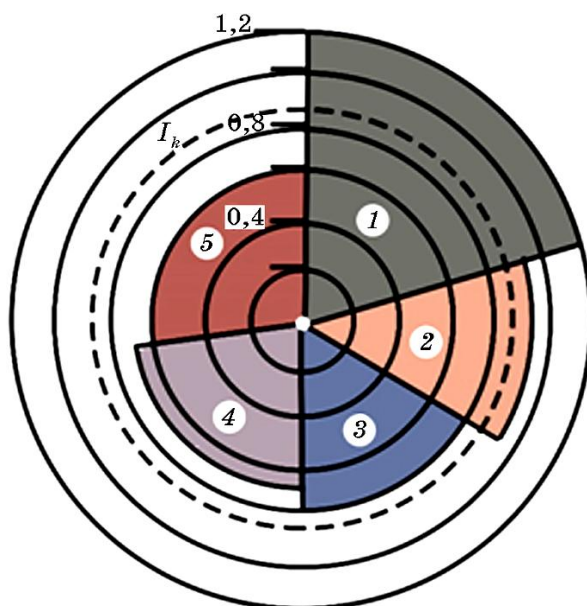
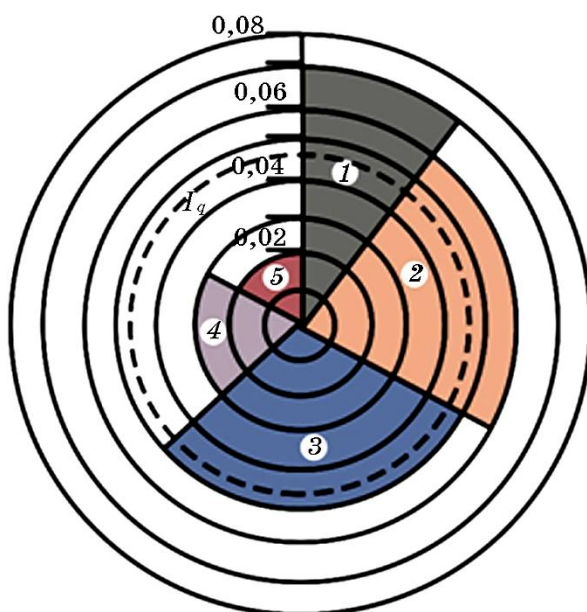


Рис. 2. Діаграма рівня якості.⁵

Рис. 3. Діаграма індексу якості.⁶

де Y_k — середній вагомий круговий показник для j -го виробу.

Рис. 4. Діаграма індексу дефектності.⁷

Значення індексу якості графічно відображається колом у вигляді пунктирної лінії й становить

$$I_k = \sqrt{0,2 \cdot 1,2^2 + 0,12 \cdot 0,9^2 + 0,16 \cdot 0,8^2 + 0,24 \cdot 0,7^2 + 0,28 \cdot 0,6^2} = 0,84. \quad (4)$$

Індекс дефектності визначається за формулою

$$I_q = \sqrt{\sum_{n=1}^5 a_n K_{qn}^2}, \quad (5)$$

де K_{qn} — коефіцієнт дефектності n -го виробу. Значення індексу дефектності графічно відображається колом у вигляді пунктирної лінії (рис. 4) і становить

$$I_q = \sqrt{0,1 \cdot 0,07^2 + 0,233 \cdot 0,06^2 + 0,3 \cdot 0,05^2 + 0,2 \cdot 0,03^2 + 0,166 \cdot 0,02^2} = 0,0482. \quad (6)$$

Пропонований середній зважений круговий показник для широкого діапазону змін відносних показників і коефіцієнтів вагомості має значення, близькі до значень середнього зваженого арифметичного показника. Більш того він має важливу перевагу в порівнянні з арифметичним показником. Воно полягає в тому, що круговий показник має геометричний сенс: він дорівнює радіусу кола, площа якого дорівнює сумі площ секторів діаграми.

Також для оцінювання якості навантажених матеріалів може служити функція бажаності. Приклади використання даної функції є в роботах [22, 23] для оцінювання властивостей криці та у застосуванні до теорії «Шість сигм». У даних роботах говориться, що дану концепція бажаності було запропоновано Харрінгтоном для вирішення проблем оптимізації. Тому функцію бажаності також називають Харрінгтоновим критерієм. Процес побудови відбувається в два етапи. Спочатку кожен відгук Y_i трансформується в такому ж масштабі, використовуючи функцію бажаності, віднесена до d_i . Даний спосіб побудови відгуку також описано в роботі [24]. В основі побудови цієї узагальненої функції лежить ідея перетворення натуральних значень частинних відгуків в безрозмірну шкалу бажаності або перевагу. Шкала бажаності відноситься до психофізичних шкалами. Її призначення — встановлення відповідності між фізичними і психологічними параметрами. Під фізичними параметрами тут розуміються всілякі відгуки, що характеризують функціонування досліджуваного об'єкту. Серед них можуть бути естетичні й навіть статистичні

ТАБЛИЦЯ 4. Стандартні відмітки по шкалі бажаності.⁸

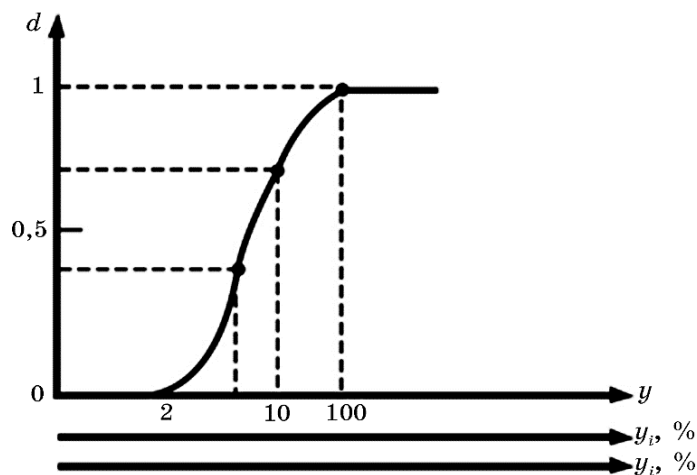
Бажаність	Відмітки по шкалі бажаності
Дуже добре	1,00–0,80
Добре	0,80–0,63
Задовільно	0,63–0,37
Погано	0,37–0,20
Дуже погано	0,20–0,00

параметри, а під психологічними параметрами розуміють чисто суб'єктивні оцінки (експериментатором) щодо бажаності того чи іншого значення відгуку.

Щоб одержати шкалу бажаності, зручно користуватися готовими таблицями відповідно між відносинами переваги в емпіричній і числовій системах (табл. 4). В таблиці 4 представлено числа, які відповідають деяким точкам кривої (рис. 5), котра задається рівнянням $d = e^{-e^{-y}}$.

На осі ординат нанесено значення бажаності, що змінюються від 0 до 1. По осі абсцис вказано значення відгуку, записані в умовному масштабі. За початок відліку 0 по цій осі вибрано значення, відповідне бажаності 0,37. Вибір саме цієї точки пов'язано з тим, що вона є точкою перегину кривої, що в свою чергу створює певні зручності при обчисленнях.

Криву бажаності зазвичай використовують як номограму. Після вибору шкали бажаності та перетворення частинних відгуків у частинні функції бажаності приступають до побудови узагальненої функції бажаності. Узагальнюють за формулою

Рис. 5. Функція бажаності [22].⁹

$$D = \sqrt[n]{\prod_{u=1}^n d_u}, \quad (7)$$

де величина D визначає узагальнену бажаність, а d_u — частинну бажаність.

Спосіб завдання узагальненої функції бажаності такий, що якщо хоча б одна бажаність $d_u = 0$, то узагальнена функція буде дорівнює нулю. З іншого боку $D = 1$ тільки тоді, коли $d_u = 1$. Узагальнена функція дуже чутлива до малих значень частинних бажаностей. При встановленні придатності матеріялу з даними набором властивостей для використання його в заданих умовах якщо хоча б один частинний відгук не задовольняє вимогам, то матеріял вважається непридатним. Наприклад, якщо при певних температурах матеріял стає крихким і руйнується, то, як би не були хороші інші властивості, цей матеріял не може бути застосований за призначенням. Спосіб встановлення основних відміток шкали бажаності (представлений в табл. 4) один і той же для частинних і узагальнених бажаностей.

Узагальнена функція бажаності є деякою абстрактною побудою, вона володіє такими важливими властивостями, як адекватність, статистична чутливість, ефективність, причому ці властивості не нижче, ніж такі для будь-якого технологічного показника, їм відповідного.

Узагальнена функція бажаності є кількісним, однозначним, єдиним і універсальним показником якості досліджуваного об'єкта і завдяки таким властивостям як адекватність, ефективність і статистична чутливість її можна використовувати в якості критерію оптимізації.

У вітчизняній літературі використання функції бажаності як загальної безрозмірної шкали в оцінці якості продукції найбільш повно описано в роботі [23]. Також окремі випадки використання даної теорії є в роботах [24, 25]. У роботі [26] при оцінюванні конкурентоспроможності товарів говориться про необхідність поодиноких показників до зведення їх до однієї загальної безрозмірної шкали, — функції бажаності, — при визначенні комплексних показників, що характеризують декілька властивостей. Це обумовлено тим, що поодинокі абсолютні показники якості характеризують різноманітні прояви властивостей, які вимірюються в різних фізичних одиницях, відсотках, балах, частках одиниць і т.п.

Функція бажаності визначається з формули

$$d_i = e^{-e^{x_i}}; \quad (8)$$

тут d_i — одиничний показник, наведений за безрозмірною шка-

лою функції бажаности (надалі називатиметься одиничним коефіцієнтом якості), x_i — відносний одиничний показник якості, який визначається за формулою

$$x_i = \frac{P_{\phi i} - P_{0,37i}}{P_{0,69i} - P_{0,37i}}, \quad (9)$$

де $P_{\phi i}$ — фактичне значення i -го одиничного показника якості будь-яких одиницях виміру; $P_{0,69i}$ — значення i -го одиничного показника якості, яке відповідне верхній межі «задовільною зоною» шкали рівня якості (табл. 3), в тих же одиницях виміру; $P_{0,37i}$ — значення i -го одиничного показника якості, яке відповідне нижній межі «задовільної зони» шкали рівня якості (табл. 3), в тих же одиницях виміру.

На рисунку 6 зображено графік і значення функції бажаности за різних значеннях x_i . При $x_i = 0$ значення $d_i = 0,37$, а при $x_i = 1,0$ значення $d_i = 0,69$. Як видно з рис. 6, значення $x_i = 0$ і $x_i = 1,0$ обмежують «задовільну зону» функції бажаности.

Після використання формули (9) будь-який показник якості з будь-якими одиницями виміру зводиться до єдиної шкали оцінки, тому з'являється можливість порівняти різні показники і продукцію між собою. Властивості продукції i , отже, одиничні показники якості змінюються від поганих (незадовільних) значень до доброго не стрибкоподібно, а плавно. При цьому кожна з зон універсальної шкали має свої межі (рис. 6). Наприклад, нижньою межею задовільною зоною ($d_i = 0,37$) будуть гранично допустимі значення окремих показників якості: гранично допустимі

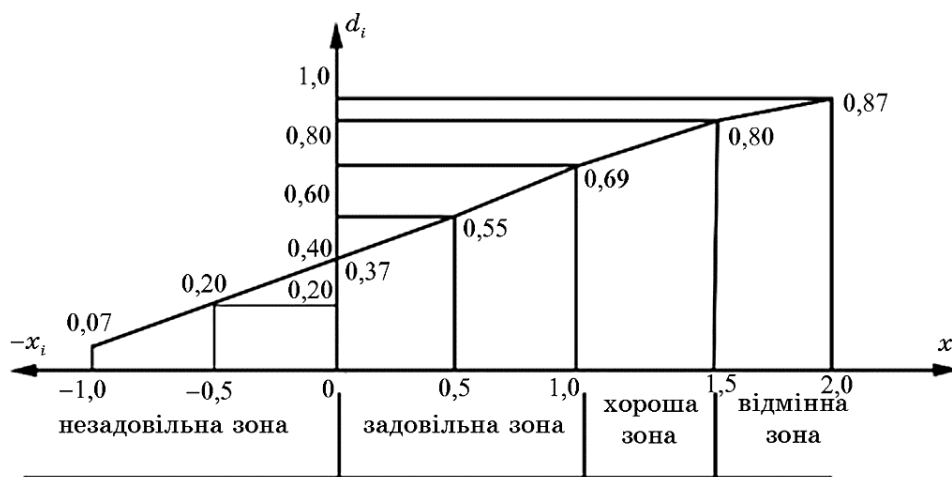


Рис. 6. Графік функції бажаности [26].¹⁰

ТАБЛИЦЯ 5. Універсальна шкала рівня якості.¹¹

Незадовільна зона	Задовільна зона	Хороша зона	Відмінна зона
$0 < d_i < 0,37$	$0,37 \leq d_i \leq 0,69$	$0,69 < d_i \leq 0,80$	$0,80 < d_i < 1$
Невизначений рівень Погана якість Необхідне корінна зміна по покращенню якості	Прийнятний рівень Задовільна якість Необхідне покращення якості до хорошого рівня	Хороший рівень Хороша якість Продукція стає конкурентоспроможною	Відмінний рівень Відмінна якість Продукція є лідером у своїй області

концентрації шкідливих речовин (домішок) або шкідливих випромінювань, рівні шуму і т.п. Для показників, значення яких не нормоване, кордони «задовільною зони» можна знайти шляхом експертних оцінювань. Графік «функції бажаності» можна не будувати, а обмежитися розрахунками коефіцієнта якості. Оцінку рівня якості можна виконувати за допомогою табл. 5. Аналогічну градацію якості наведено в роботі [27].

Показники бажаності — безрозмірні недискретні характеристики якості, що змінюються в межах від нуля до одиниці при будь-якому діпазоні зміни розмірних показників якості x_i . Обчислюють показники бажаності q за допомогою допоміжних показників y за такими формулами:

$$q = \exp[-1/y] = 1/e^{1/y} \text{ для } 0 < y < \infty, \quad (10)$$

$$q = \exp[-(1/\exp(y))] = 1/e^{1/e^y} \text{ для } -\infty < y < \infty. \quad (11)$$

Розмірні значення x_i натуральних показників якості перераховують у безрозмірні допоміжні показники за формулами

$$y = a_0 + a_1 x_i, \quad (12)$$

$$y = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2. \quad (13)$$

Щоб знайти коефіцієнти a_0 , a_1 необхідно мати нормативні значення показників бажаності q , значення безрозмірних показників y , а також значення розмірних показників x_i для двох рівнів градацій якості. Для визначення трьох коефіцієнтів a_0 , a_1 і a_2 слід мати нормативні дані для трьох рівнів градацій якості.

Значення функції y і, отже, коефіцієнтів a_0 , a_1 , a_2 визначаються в залежності від того, які значення q задані для основних рівнів якості (табл. 6).

Наприклад, для продукту першого сорту нормована величина розривного навантаження становить не менше 100 Н, для продукту другого сорту — не менше 60 Н. Прийmemo для обчислення

ТАБЛИЦЯ 6. Значення показників бажаности q і відповідних безрозмірних допоміжних показників y .¹²

Градація якості	Значення показників y за різних значень q					
	1 варіант			2 варіант		
	Для формули (11)			Для формули (12)		
	q	q	q	y	y	y
«Відмінно»	$\geq 0,80$	$\geq 4,50$	$\geq 1,50$	$\geq 0,80$	$\geq 4,50$	$\geq 1,50$
«Добре»	$\geq 0,63$	$\geq 2,18$	$\geq 0,77$	$\geq 0,60$	$\geq 1,96$	$\geq 0,67$
«Задовільно»	$\geq 0,37$	$\geq 1,00$	$\geq 0,00$	$> 0,20$	$> 0,62$	$> -4,50$
«Погано»	$\geq 0,37$	$< 1,00$	$< 1,00$	$0,00$	$0,00$	$\leq -4,50$

коефіцієнтів a_0 , a_1 і a_2 нормативні дані 2-го варіанту (табл. 6). Припустимо, що перший сорт відповідає рівню «відмінно», а другий сорт — рівню «задовільно». Підставляючи наявні дані в рівняння (12), одержуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} 4,50 = a_0 + 100a_1; \\ 0,62 = a_0 + 60a_1. \end{cases} \quad (14)$$

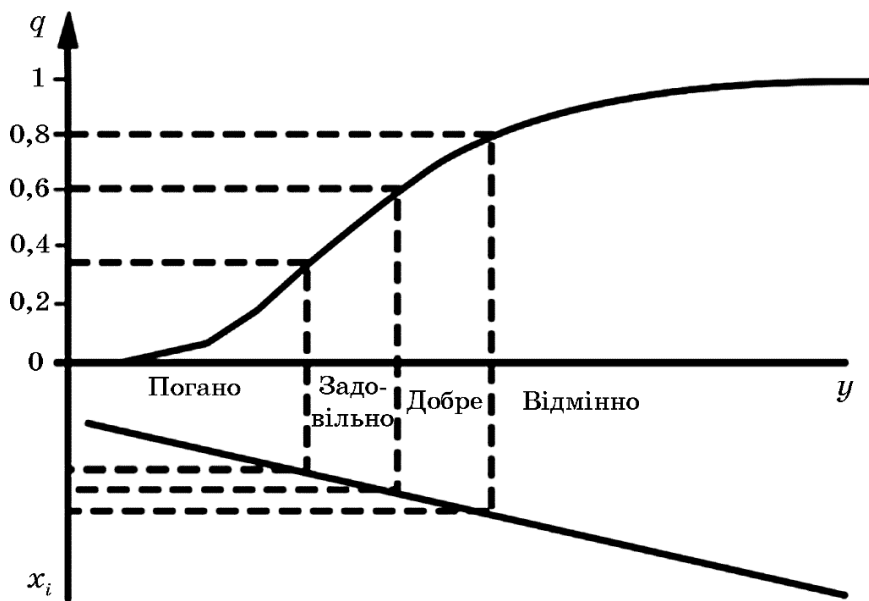
Розв'язуючи систему, одержуємо $a_0 = -5,2$, $a_1 = 0,97$. Таким чином, підставивши фактичні дані (розривна навантаження дорівнює 80 Н) у рівняння (11), (12), одержуємо, що показник бажаности $q = 0,67$, а це відповідає рівню якості «добре». Аналогічно знаходять значення q для інших обраних одиничних показників.

Після перекладу натуральних значень одиничних показників якості в безрозмірні знаходять значення комплексного показника якості у вигляді узагальненої функції бажаности, що розраховується за одним із способів усереднення: арифметичним —

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i a_i \quad (15)$$

ТАБЛИЦЯ 7. Значення функції бажаности в основних і проміжних точках.¹³

Числові значення					
Y	q (згідно)	Q (згідно)	y	q (згідно)	q (згідно)
-2,00	Не визначається	0,00	1,50	0,51	0,80
-1,5	Не визначається	0,01	2,00	0,61	0,87
-1,00	Не визначається	0,07	2,50	0,67	0,92
-0,50	Не визначається	0,19	3,00	0,72	0,95
0,00	0,00	0,37	3,50	0,75	0,97
0,50	0,14	0,54	4,00	0,78	0,98
0,77	0,28	0,63	4,50	0,80	0,99
1,00	0,37	0,69	5,00	0,82	0,99

Рис. 7. Номограма для визначення показників бажаності [28].¹⁴

або геометричним —

$$Q = \prod_{i=1}^n q_i^{a_i}. \quad (16)$$

За даними табл. 7 (1-й варіант) намічають зони встановлених (в даному випадку чотирьох) якісних градацій, а відповідно до даних табл. 7 будують безперервний графік функції бажаності (рис. 7). Для побудови функції у використовуються базові точки функції бажаності (табл. 7) і граничні значення натурального показника, визначаються стандартом або іншим нормативно-технічним документом.

Номограма будується індивідуально для кожного з натуральних одиничних показників якості, що враховуються в комплексній оцінці якості продукції.

Також, як зазначалося вище, одним із способів оцінки якості матеріалів є розрахунок коефіцієнта економічної доцільності. Подібні розрахунки проводилися для криць задля економічного обґрунтування використання тієї чи іншої марки криці, враховуючи не тільки міцність, технічні та експлуатаційні властивості. Аналогічним чином методику даного розрахунку можна використовувати для навантажених криць з метою виявлення економічного ефекту переходу від криці з одними характеристиками міцності до криць з іншими властивостями. У даних розрахун-

ках використовуються дані [29, 30]. Вартість легованої криці залежить від хемічного складу криці, типу напівфабрикату і його розмірів. В першому наближенні порівняльну вартість легованої криці складу (Л1Х1, Л2Х2, ... , Л_nХ_n) можна оцінити, опираючись на ці дані з порівняльної вартости матеріялів. Порівняльну вартість пропонується визначати за формулою

$$C_{\text{криці}} = 0,01 \left[C_{\text{Fe}} (1 - \sum X_i) + \sum C_i X_i \right], \quad (17)$$

де $C_{\text{Fe}} = 0,01$ — вартість заліза, X_i — вміст i -го легувального елемента, C_i — відносна вартість i -го легувального елемента.

Економічну доцільність застосування в конкретному випадку конкретної марки криці Ю. М. Лахтин пропонує оцінювати коефіцієнтом економічної доцільности,

$$K_e = \frac{C_2/C_1}{CB_2/CB_1}, \quad (18)$$

де C_2/C_1 — відносна зміна вартости криць 1 і 2, CB_2/CB_1 — відносна зміна аналізованої властивости криць 1 і 2.

Порівняльна аналіза криць може проводитися за їх властивостями та сукупністю останніх. Вибір аналізованої властивости залежить від конкретної області застосування криці. При $K_e > 1$ в прив'язці до розглянутої властивости криці перехід від криці 1 до криці 2 виправданий з економічних міркувань. Якщо $K_e < 1$, то при розгляді даної властивости перехід від однієї марки криці до іншої економічно не виправданий.

Також при оцінюванні якости криць застосовувалась метода побудови ранжованого ряду. Ранжований ряд може бути побудований за зростанням (спаданням) показника, що характеризує конкурентоспроможність [17, 31, 32].

В якости основних споживчих властивостей, властивих свердлам, наприклад, можуть бути обрані діаметер і глибина свердління, частота обертання, подача, зусилля, стійкість. Властивості свердел B оцінюються за формулою

$$B = \sum_{i=1}^n (A_i/A_1) \cdot 100, \quad (19)$$

де A_i — показник, що характеризує зміст i -ї споживчої властивости аналізованого продукту, а A_1 — показник, що характеризує зміст i -ї споживчої властивости базисного продукту.

Як приклад, наводиться побудова ранжованого ряду свердел компаній Koellner, Allbiz і Lueko. Дані представлено в табл. 8. Ранжований ряд будується по відносному економічному показнику — ціні 100 балів властивостей:

ТАБЛИЦЯ 8. Характеристика свердл.¹⁵

Фірма	Діаметер свердла, мм	Глибина свердління, мм	Частота обертання, об/хв	Подача, мм/мін	Момент (максимальний пропил), мм	Ціна, євро
Koellner	60	60	650	5	14	30,5
Allbiz	60	50	500	10	16	36,22
Lueko	60	40	430	8	12	25

ТАБЛИЦЯ 9. Розрахунок ціни 100 балів свердл.¹⁶

Фірма	Діаметер свердла, мм	Глибина свердління, мм	Частота обертання, об/хв	Подача, Нм	Момент (максимальний пропил), мм	Оцінка, бали	Ціна 100 балів, євро
Koellner	100	100	100	100	100	600	5,1
Allbiz	100	83	77	200	114	689	5,3
Lueko	100	66	66	160	85	573	4,4

$$P' = (P/B) \cdot 100, \quad (20)$$

де P — ціна аналізованого продукту. В таблиці 9 приведено результати ціни 100 балів властивостей свердл.

Таким чином, найсильніші позиції з обраних свердел займає свердло компанії Allbiz, але і ціна 100 балів для неї максимальна. Наступним за пріоритетом є свердло Koellner, ціна 100 балів для нього кілька нижче, а в сукупній оцінці втрачається майже 90 балів, що є суттєвим. Отже, доцільніше вибрати все-таки свердло фірми Allbiz. Як видно, всі перераховані методи теоретично є найбільш придатними і наочними для використання в оцінюванні та управлінні якістю навантажених матеріалів, оскільки знайшли застосування в досить нетривіальних випадках оцінки якості різних об'єктів, зокрема, твердих матеріалів. У зв'язку з цим в подальшому слід розглядати такі методи:

- побудову функції бажаності (або Харрінгтонового критерію);
- диференційну методу (побудову циклограми або «павутини» якості);
- методу побудови секторних діаграм;
- побудову ранжованого ряду.

Як показують дані, комплексно-кількісні методи уможливають врахувати специфіку оцінювання матеріалів за умов високошвидкісного навантаження. Проте, потрібне проведення деякого доопрацювання й адаптації. Процес вибору даних метод на основі аналізу характеристик якості матеріалів, умов їх випробувань і механізмів, що впливають на кінцеві властивості, предста-



Рис. 8. Підхід до вибору комплексно-кількісних метод.¹⁷

влено на рис. 8.

Відповідно до даного підходу, на основі проведеної аналізи питань оцінювання якості матеріалів і різних об'єктів, а також аналізи поведінки матеріалів за умов ударного навантаження зроблено висновок про те, що в подібному випадку основними і визначальними характеристиками якості є динамічні характеристики.

На основі цих характеристик побудовано систему показників якості навантажених матеріалів.

На основі аналізу прикладів практичного застосування різних кількісно-комплексних метод, в тому числі для оцінювання якості матеріалів, визначено перелік використаних в роботі кількісно-комплексних метод.

5. ВИСНОВКИ

Таким чином, сутність представленого підходу складається з трьох головних моментів. Це, по-перше, результати аналізи сучасних проблем оцінювання якості різних об'єктів і, більшою мірою, металевих матеріалів. По друге, результати аналізи екс-

периментальних метод випробування матеріалів ударним способом, основних характеристик і параметрів, які впливають на кінцеві властивості матеріалів. На основі цих двох моментів сформульовано основний принцип підходу, який полягає в тому, що основними критеріями якості для навантажених матеріалів можуть слугувати динамічні характеристики, а решта — характеристики і показники якості (основні і загальноприйняті для інших матеріалів). В даному випадку ними можна знехтувати, прийнявши їх не настільки важливими, а точніше у вигляді якоїсь постійної константи, яка впливає на підсумковий рівень якості подібних матеріалів.

Третій момент підходу є наслідком виконаного припущення, для якого на основі аналізу сучасного досвіду застосування комплексно-кількісних метод зроблено 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 навантажених матеріалів, поряд з експертною методою. Крім того, дані методи найбільшою мірою підходять для використаних способів експериментального випробування, є наочними і легко відтворюваними. При наявності рекомендацій щодо застосування даних метод вони можуть бути легко впроваджені у виробництво або/і у навчальний процес.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. М. А. Кривоглаз, *Металлы, электроны, решётка* (Киев: Наукова думка: 1975), с. 355.
2. М. А. Krivoglaz, *X-Ray and Neutron Diffraction in Nonideal Crystals* (Berlin: Springer: 1996).
3. В. Б. Молодкин, Е. А. Тихонова, *Физика металлов и металловедение*, 24, № 3: 385 (1967).
4. V. A. Tatarenko and T. M. Radchenko, *Intermetallics*, 11, Nos. 11–12: 1319 (2003); [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(03\)00174-2](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(03)00174-2).
5. Т. М. Radchenko, V. A. Tatarenko, and S. M. Bokoch, *Металлофизика и новейшие технологии*, 28, № 12: 1699 (2006); arXiv:1406.0147.
6. В. А. Татаренко, Т. М. Радченко, *Успехи физики металлов*, 3, № 2: 111 (2002); <http://ufm.imp.kiev.ua/en/abstract/v03/i02/111.html>.
7. В. А. Татаренко, Т. М. Радченко, В. М. Надутов, *Металлофизика и новейшие технологии*, 25, № 10: 1303 (2003).
8. І. Ю. Сагалаєв, Ю. І. Прилуцький, Т. М. Радченко, В. А. Татаренко, *Успехи физики металлов*, 11, № 1: 95 (2010); <https://doi.org/10.15407/ufm.11.01.095>.
9. Т. М. Radchenko, V. A. Tatarenko, and H. Zapolsky, *Solid State Phenomena*, 138: 283 (2008); <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.138.283>.

10. Т. М. Радченко, В. А. Татаренко, *Успехи физики металлов*, **9**, № 1: 1 (2008); <https://doi.org/10.15407/ufm.09.01.001>.
11. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, I. Yu. Sagalianov, and Yu. I. Prylutskyu, *Phys. Lett. A*, **378**: 2270 (2014); <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2014.05.022>.
12. В. Б. Молодкин, *Физика металлов и металловедение*, **25**, № 3: 410 (1968).
13. В. Б. Молодкин, *Физика металлов и металловедение*, **27**, № 4: 582 (1969); В. Б. Молодкин, *Металлофизика*, **2**, № 1: 3 (1980).
14. А. И. Химичева, В. В. Курьяляк, *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, **5**, № 1 (77): 70 (2015).
15. В. В. Куриляк, Г. І. Хімічева, *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія «Проблеми механічного приводу»*, № 35 (1144): 80 (2015).
16. Г. І. Хімічева, В. В. Куриляк, *Вісник Київського національного університету технологій і дизайну*, № 6 (92): 67 (2015).
17. Г. І. Хімічева, В. В. Куриляк, *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія «Нові рішення в сучасних технологіях»*, № 62 (1171): 40 (2015).
18. Г. І. Хімічева, В. В. Куриляк, *Вісник Чернігівського державного технічного університету. Серія «Технічні науки»*, № 2 (78): 76 (2015).
19. В. В. Куриляк, *Технологічний аудит та резерви виробництва*, № 4 (3): 53 (2016).
20. Г. І. Хімічева, В. В. Куриляк, *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, № 25 (1197): 125 (2016).
21. В. Б. Молодкин, М. В. Ковальчук, И. М. Карнаухов, В. Ф. Мачулин, В. Е. Сторижко, Э. Х. Мухамеджанов, А. И. Низкова, С. В. Лизунова, Е. Н. Кисловский, С. И. Олиховский, Б. В. Шелудченко, С. В. Дмитриев, Е. С. Скакунова, В. В. Молодкин, В. В. Лизунов, В. А. Бушуев, Р. Н. Кютт, Б. С. Карамурзов, А. А. Дышеков, Т. И. Оранова, Ю. П. Хапачев, *Основы динамической высокоразрешающей дифрактометрии функциональных материалов* (Нальчик: Кабардино-Балкарский Университет: 2013).
22. В. Б. Молодкин, М. В. Ковальчук, И. М. Карнаухов, В. Е. Сторижко, С. В. Лизунова, С. В. Дмитриев, А. И. Низкова, Е. Н. Кисловский, В. В. Молодкин, Е. В. Первак, А. А. Катасонов, В. В. Лизунов, Е. С. Скакунова, Б. С. Карамурзов, А. А. Дышеков, А. Н. Багов, Т. И. Оранова, Ю. П. Хапачев, *Основы интегральной многопараметрической диффузодинамической дифрактометрии* (Нальчик: Кабардино-Балкарский Университет: 2013).
23. 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, *Металлофизика и новейшие технологии*, **36**, № 7: 857 (2014); <https://doi.org/10.15407/mfint.36.07.0857>.
24. 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); <http://dx.doi.org/10.15407/ufm.15.02.055>.
25. S. G. Jabarov, D. P. Kozlenko, S. E. Kichanov, A. V. Belushkin, B. N. Savenko, R. Z. Mextieva, and C. Lathe, *Physics of Solid State*, **53**, No. 11: 2300 (2011).

26. R. Z. Mekhdiya, E. V. Lukin, S. E. Kichanov, D. P. Kozlenko, S. H. Jabarov, T. N. Dang, A. I. Mammadov, and B. N. Savenko, *Physics of Solid State*, **56**, No. 4: 765 (2014).
27. H. S. Potdar, S. B. Deshpande, and S. K. Date, *Mater. Chem. Phys.*, **58**: 121 (1999).
28. H. Xu and L. Gao, *J. Am. Ceram. Soc.*, **86**: 203 (2003).
29. L. Wang, L. Liu, D. Xue, H. Kang, and C. Liu, *J. Alloys & Compounds*, **440**: 78 (2007).
30. M. K. Lee, T. K. Nath, C. B. Eoma, M. C. Smoak, and F. Tsui, *App. Phys. Lett.*, **77**, No. 22: 3547 (2000).
31. Z. Lazerevic, N. Romcevic, M. Vijatovic, N. Paunovic, M. Romcevic, B. Stojanovic, and Z. Dohcevic-Mitrovic, *Acta Phys. Pol. A*, **115**, No. 4: 808 (2009).
32. K. Tkacz-Smiecz, A. Kolezynski, and W. S. Ptak, *Solid State Communications*, **127**: 557 (2003).

REFERENCES

1. M. A. Krivoglaz, *Metally, Ehlektrony, Reshetka* [Metals, Electrons, Lattice] (Kiev: Naukova Dumka: 1975), p. 355 (in Russian).
2. M. A. Krivoglaz, *X-Ray and Neutron Diffraction in Nonideal Crystals* (Berlin: Springer: 1996).
3. V. B. Molodkin and E. A. Tikhonova, *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **24**, No. 3: 385 (1967) (in Russian).
4. V. A. Tatarenko and T. M. Radchenko, *Intermetallics*, **11**, Nos. 11–12: 1319 (2003); [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(03\)00174-2](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(03)00174-2).
5. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, and S. M. Bokoch, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **28**, No. 12: 1699 (2006); arXiv:1406.0147.
6. V. A. Tatarenko and T. M. Radchenko, *Uspehi Fiziki Metallov*, **3**, No. 2: 111 (2002) (in Ukrainian); <http://ufm.imp.kiev.ua/en/abstract/v03/i02/111.html>.
7. V. A. Tatarenko, T. M. Radchenko, and V. M. Nadutov, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **25**, No. 10: 1303 (2003) (in Ukrainian).
8. I. Yu. Sagalyanov, Yu. I. Prylutsky, T. M. Radchenko, and V. A. Tatarenko, *Uspehi Fiziki Metallov*, **11**, No. 1: 95 (2010) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/ufm.11.01.095>.
9. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, and H. Zapolsky, *Solid State Phenomena*, **138**: 283 (2008); <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.138.283>.
10. T. M. Radchenko and V. A. Tatarenko, *Uspehi Fiziki Metallov*, **9**, No. 1: 1 (2008) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/ufm.09.01.001>.
11. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, I. Yu. Sagalyanov, and Yu. I. Prylutsky, *Phys. Lett. A*, **378**: 2270 (2014); <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2014.05.022>.
12. V. B. Molodkin, *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **25**, No. 3: 410 (1968) (in Russian).
13. V. B. Molodkin, *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **27**, No. 4: 582 (1969) (in Russian); V. B. Molodkin, *Metallofizika*, **2**, No. 1: 3 (1980).
14. A. I. Himicheva and V. V. Kurylyak, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **5**, No. 1 (77): 70 (2015) (in Ukrainian).
15. 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).*
16. G. I. Khimicheva and V. V. Kurylyak, *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*, No. 6 (92): 67 (2015) (in Ukrainian).
 17. 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).*
 18. G. I. Khimicheva and V. V. Kurylyak, *Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series 'Technical Sciences', No. 2 (78): 76 (2015) (in Ukrainian).*
 19. V. V. Kurylyak, *Technology Audit and Production Reserves*, No. 4 (3): 53 (2016) (in Ukrainian).
 20. 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).*
 21. V. B. Molodkin, M. V. Koval'chuk, I. M. Karnaukhov, V. F. Machulin, V. E. Storizhko, E. Kh. Mukhamedzhanov, A. I. Nizkova, S. V. Lizunova, E. N. Kislovskii, S. I. Olikhovskii, B. V. Sheludchenko, S. V. Dmitriev, E. S. Skakunova, V. V. Molodkin, V. V. Lizunov, V. A. Bushuev, R. N. Kyutt, B. S. Karamurzov, A. A. Dyshekov, T. I. Oranova, and Yu. P. Khapachev, *Osnovy Dinamicheskoy Vysokorazreshayushchey Difraktometrii Funktsional'nykh Materialov* [Basis of Dynamical High-Resolution Diffraction of Functional Materials] (Nalchik: Kabardino-Balkarsky University: 2013) (in Russian).
 22. V. B. Molodkin, M. V. Koval'chuk, I. M. Karnaukhov, V. E. Storizhko, S. V. Lizunova, S. V. Dmitriev, A. I. Nizkova, E. N. Kislovskii, V. V. Molodkin, E. V. Pervak, A. A. Katasonov, V. V. Lizunov, E. S. Skakunova, B. S. Karamurzov, A. A. Dyshekov, A. N. Bagov, T. I. Oranova, and Yu. P. Khapachev, *Osnovy Integral'noy Mnogoparametricheskoy Diffuznodinamicheskoy Difraktometrii* [Basis of Integral Multiparameter Diffusion-Dynamical Diffractometry] (Nalchik: Kabardino-Balkarsky University: 2013) (in Russian).
 23. V. V. Lizunov, V. B. Molodkin, S. V. Lizunova, M. G. Tolmachev, O. S. Skakunova, S. V. Dmitriev, B. V. Sheludchenko, S. M. Brovchuk, L. M. Skapa, R. V. Lekhnyak, and K. V. Fuzik, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **36**, No. 7: 857 (2014) (in Russian); <https://doi.org/10.15407/mfint.36.07.0857>.
 24. 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, K. V. Fuzik, *Uspehi Fiziki Metallov*, **15**, № 2: 55 (2014) (in Russian); <http://dx.doi.org/10.15407/ufm.15.02.055>.
 25. S. G. Jabarov, D. P. Kozlenko, S. E. Kichanov, A. V. Belushkin, B. N. Savenko, R. Z. Mextieva, and C. Lathe, *Physics of Solid State*, **53**, No. 11: 2300 (2011).
 26. R. Z. Mekhdiyeva, E. V. Lukin, S. E. Kichanov, D. P. Kozlenko, S. H. Jabarov, T. N. Dang, A. I. Mammadov, and B. N. Savenko, *Physics of Solid State*, **56**, No. 4: 765 (2014).
 27. H. S. Potdar, S. B. Deshpande, and S. K. Date, *Mater. Chem. Phys.*, **58**: 121

- (1999).
28. H. Xu and L. Gao, *J. Am. Ceram. Soc.*, **86**: 203 (2003).
 29. L. Wang, L. Liu, D. Xue, H. Kang, and C. Liu, *J. Alloys & Compounds*, **440**: 78 (2007).
 30. M. K. Lee, T. K. Nath, C. B. Eoma, M. C. Smoak, and F. Tsui, *App. Phys. Lett.*, **77**, No. 22: 3547 (2000).
 31. Z. Lazerevic, N. Romcevic, M. Vijatovic, N. Paunovic, M. Romcevic, B. Stojanovic, and Z. Dohcevic-Mitrovic, *Acta Phys. Pol. A*, **115**, No. 4: 808 (2009).
 32. K. Tkacz-Smiecz, A. Kolezynski, and W. S. Ptak, *Solid State Communications*, **127**: 557 (2003).

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

¹ Fig. 1. Changes in chemical composition and cooling parameters for attainment of the strength level as for XI00 steel grade [12].

² TABLE 1. Data of the quality level for arbitrary product.

³ TABLE 2. Data of the quality index for arbitrary production.

⁴ TABLE 3. Data of defectiveness index for the production.

⁵ Fig. 2. Diagram of the quality level.

⁶ Fig. 3. Diagram of the quality index.

⁷ Fig. 4. Diagram of the defectiveness index.

⁸ TABLE 4. Standard marks on the desirability scale.

⁹ Fig. 5. The desirability function.

¹⁰ Fig. 6. Graph of the desirability function.

¹¹ TABLE 5. Universal scale of the quality level.

¹² TABLE 6. Values of desirability index q and relative dimensionless auxiliary indices y .

¹³ TABLE 7. Values of desirability function for the basic and intermediate points.

¹⁴ Fig. 7. Nomogram for determination of the desirability indices [20].

¹⁵ TABLE 8. Characteristic of drills.

¹⁶ TABLE 9. Calculation of the price of 100 points for drills.

¹⁷ Fig. 8. Approach for choice of the complex-quantitative methods.