

## PHYSICAL AND TECHNICAL BASES OF EXPERIMENT AND DIAGNOSTICS

PACS numbers: 06.60.-c, 46.40.Cd, 46.50.+a, 81.05.Zx, 81.40.Np, 81.70.-q, 83.85.Ns

### Експериментальне обґрунтування ефективності використання метод кваліметрії

В. В. Куриляк, Г. І. Хімічева\*, О. М. Хорошилов\*\*

*Український гуманітарний інститут,  
вул. Інститутська, 14,  
08292 Буча, Україна*

*\*Київський національний університет технологій і дизайну,  
вул. Немировича-Данченка, 2,  
01011 Київ, Україна*

*\*\*Українська інженерно-педагогічна академія,  
вул. Університетська, 16,  
61003 Харків, Україна*

В статті представлено результати експериментальних досліджень імпульсно-ударного навантаження на стопи з пам'яттю форми, полімери та метали. В ході експерименту були одержані якісні характеристики матеріалів шляхом застосування метод кваліметрії. Обрано п'ять динамічних характеристик навантажених стопів, полімерів і металів, результати оцінювання яких нанесено на циклограми «павутиння якості». Крім того, для досліджуваних матеріалів були складені таблиці градацій якості на основі застосування функції бажаності. Також практично доведено, що дані номограм з визначення показчика бажаності можна використовувати для оцінювання якості зразків з поліметилметакрилату за імпульсь-

---

Corresponding author: Valentyna Vasylivna Kurylyak  
E-mail: [valentina.kuryliak@gmail.com](mailto:valentina.kuryliak@gmail.com)

*Ukrainian Humanitarian Institute,  
14 Instytutska Str., UA-08292 Bucha, Ukraine*

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

*\*\*Ukrainian Engineering Pedagogics Academy,  
16 Universytetska Str., UA-61003 Kharkiv, Ukraine*

Citation: V. V. Kurylyak, G. I. Khimicheva, and O. M. Khoroshilov, Experimental Justification of Efficiency of Application of Methods of a Qualimetry, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41, No. 1: 71–100 (2019) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.41.01.0071](https://doi.org/10.15407/mfint.41.01.0071).

ного навантаження за такими параметрами, як амплітуда навантаження, довжина поширення тріщини й енергія. В результаті досліджень встановлено, що якість зразка можна визначати двома шляхами: за комплексним показником або за окремими одиничними параметрами. Встановлено залежність довжини пророслої тріщини від середнього розміру наповнювача для різних зразків матеріалів. Доведено, що оптимальні характеристики з точки зору опору ударному навантаженню має сталь 30XH4M.

**Ключові слова:** стопи, полімери, метали, високошвидкісне навантаження, методи кваліметрії.

The paper presents the results of experimental studies of impulse-shock loading on alloys with shape-memory effect, polymers, and metals. During the experiment, qualitative characteristics of materials are obtained due to use of qualimetry methods. Five dynamical characteristics of loaded alloys, polymers, and metals are selected; the results of their estimations are plotted on the 'web of quality' cyclograms. In addition, for the investigated materials, quality-grading tables are composed on basis of the desirability function using. As practically proved, the nomograms' data on definition of the desirability index can be used to evaluate the quality of samples from polymethyl methacrylate at pulsed loading by such parameters as load amplitude, crack propagation length, and energy. As a result of the research, it is found that the quality of the sample can be determined by two ways: by complex index or by individual unit parameters. The dependence of the length of the sprouted crack on the average filler size for different materials of samples is established. As proved, the steel 30XH4M has optimal characteristics in terms of resistance to impact load.

**Key words:** alloys, polymers, metals, high-speed loading, methods of qualimetry.

В статті представлені результати експериментальних досліджень імпульсно-ударної навантаження на сплави з пам'яттю форми, полімери та метали. В ході експеримента були отримані якісні характеристики матеріалів за допомогою застосування методів кваліметрії. Вибрані п'ять динамічних характеристик навантажених сплавів, полімерів та металів, результати оцінки яких нанесені на циклограми «паутини якості». Крім того, для досліджуваних матеріалів складено таблиці градаций якості на основі застосування функції бажаності. Також практично доведено, що дані номограмми для визначення показника бажаності можна використовувати для оцінки якості зразків з поліметилметакрилату при імпульсній навантаженні за такими параметрами, як амплітуда навантаження, довжина поширення тріщини та енергія. В результаті досліджень встановлено, що якість зразка можна визначати двома способами: за комплексним показником або за окремими одиничними параметрами. Встановлено залежність довжини пророслої тріщини від середнього розміру наповнювача для різних зразків матеріалів. Доведено, що оптимальними характеристиками з точки зору опору ударній навантаженню має сталь 30XH4M.

**Ключевые слова:** сплавы, полимеры, металлы, высокоскоростное нагру-

жение, методы квалиметрии.

*(Отримано 25 травня 2017 р.; остаточн. варіант — 12 грудня 2018 р.)*

## 1. ВСТУП

Найпершою із затверджених стратегій України 2020 є «Дерегуляція та розвиток машинобудівного підприємництва України». В контексті неї створення ефективної системи оцінювання якості вихідних матеріалів для об'єктів легкої та важкої промисловостей є актуальним і першочерговим завданням. В розвинутих країнах світу проблема поліпшення якості займає провідне місце у забезпеченні конкурентоспроможності машинобудівної продукції. Наприклад, досвід США, Японії, Німеччини, Південної Кореї та ряду інших країн доводить, що забезпечення прогресу у галузі оцінювання рівня якості машинобудівних матеріалів шляхом застосування ефективних систем управління нею є одним з основних важелів, за допомогою яких їм вдалося вгамувати кризу в економіці та зайняти стійкі позиції на світовому промисловому ринку. Доведено, що працездатність і довговічність більшості елементів складних конструкцій залежить від якості вихідних матеріалів, а одним із основних чинників, які впливають на строк служби космічної, кораблебудівної та машинобудівної техніки в умовах високошвидкісних навантажень є вихідна якість матеріалів, що використовуються в процесі виробництва [1]. При високошвидкісних навантаженнях динамічні характеристики матеріалів є ключовими та домінуючими, оскільки в ударних умовах вони найліпше характеризують якість матеріалів. Вирішальну роль при виборі вихідних матеріалів відповідної якості відіграє процедура проведення оцінювання якості матеріалів.

Підкреслимо, що в області дослідження якості матеріалів використовують різні методи кваліметрії, залежно від самого матеріалу, специфіки його виробництва, застосування та випробування. Наприклад, в таких областях, як металургія, будівництво, використовуються статистичні методи оцінки і контролю якості, але в області високошвидкісного руйнування матеріалів проблема вибору матеріалу, в основному, вирішується методом експертних оцінок. При цьому оцінювання якості матеріалу ґрунтується на знаннях експертів, які мають великий досвід в дослідженні матеріалів в умовах високошвидкісного навантаження [2]. До того ж досвід управління якістю продукції показує, що забезпечення стабільної якості будь-яких виробів досягти неможливо, якщо не домогтися стабільно високої якості вихідних матеріалів.

Відповідно до визначення ДСТУ ISO 9000-2001 якістю є ступінь відповідності сукупності властивих характеристик вимогам.

Характеристика, в свою чергу, є відмітною властивістю об'єкта. Тому, кажучи про якість об'єкта, зокрема матеріялу, 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, таких як механічні, фізичні, хемічні, експлуатаційні тощо [3, 4]. Так, для окремих матеріалів найбільш типова форма визначення якості здійснюється в вигляді таблиць (градацій якості тощо) [5, 6]. Найбільш поширеною у використанні методом щодо визначення якості продукції, яка характеризується декількома параметрами, є метода «павутиння якості» [7].

У зв'язку з тим, що в сучасній метрологічній базі даних відсутня чітка методика оцінювання якості матеріалів за умов ударних і високошвидкісних навантажень [8], мета даної роботи полягає:

– у використанні методи «павутиння якості» та секторної діаграми для визначення якості швидко-навантажених матеріалів;

– у використанні методи «градацій якості» при визначенні якості навантаженого поліметилметакрилатового матеріялу.

У зв'язку із зазначеною метою пропонуємо, поряд з експертною методою, в даній області застосовувати додаткові методи оцінювання якості, оскільки експертна метода вимагає істотних часових і трудових витрат, а також у ряді випадків він може характеризуватися неузгодженістю думок експертів. Тому застосування метод кваліметрії для оцінювання рівня якості високонавантажених матеріалів є актуальним та перспективним науковим напрямом.

## **2. ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІЯЛІВ ТА МЕТОД, ЯКИХ БУЛО ВИКОРИСТАНО В ХОДІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОД КВАЛІМЕТРІЇ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ШВИДКІСНО-НАВАНТАЖЕНИХ МАТЕРІЯЛІВ**

Для експериментального дослідження було обрано три типи матеріалів, а саме сплав нікелід титану, полімери (поліметилметакрилат і сферопластик) та метали з різними кристалічними решітками. Базовими характеристиками матеріалів обраних для дослідження були наступні дані.

1. Нікелід титану: стопи нікелід титану, що містять 44,9% Ti та 55,1% Ni, а також стопи з додаванням 3% Cu (50% Ti, 47% Ni, 3% Cu); мідь в обрані стопи додається для зменшення гісте-

ТАБЛИЦЯ 1. Характеристика накопичувача.

TABLE 1. Characteristics of the drive.

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

рези та контролю міцности.

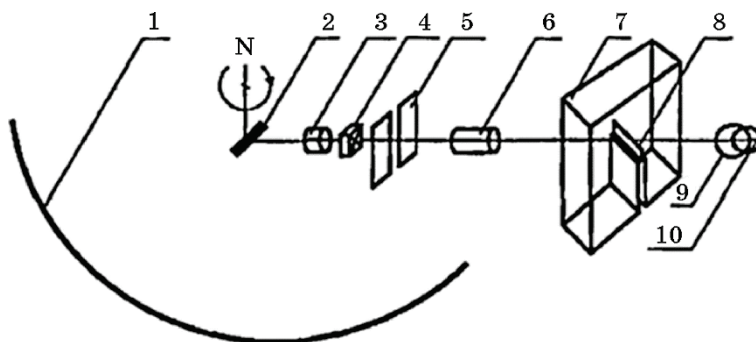
2. Полімерні матеріяли: поліметилметакрилат (ПММК) і сферо-пластик. ПММК використовувалося як оргскло, а також має наступні фізико-механічні характеристики: поздовжня швидкість пружних хвиль  $c_1 = 1970$  м/с; поперечна швидкість пружних хвиль  $c_2 = 1130$  м/с; граничний коефіцієнт інтенсивности при статичному навантаженні  $K_{Ic} = 1,47$  МПа·м<sup>1/2</sup>. Сферо-пластик містить матрицю з поліефірної смоли і наповнювач зі скляних мікросфер, який армував об'єм форми в розмірі 41% від загального обсягу. У різних зразках розмір сфер змінювався в інтервалі від 6–60 до 12–60 мкм із середнім значенням від 21 до 31 мкм. Характеристика наповнювача представлена в табл. 1.

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

Для матеріялу полімер (поліметилметакрилат (ПММК) і сферо-пластик) було використано методу ударного впливу, в якій удар створювався імпульсним магнетним полем. Методика виготовлення зразків з ПММК полягала в наступному. В пласкій заготовці з оргскла товщиною 10 мм вирізали паз шириною 3 мм і довжиною 100 мм. У вершині пазу здійснювався пропи́л глибиною близько 3 мм і шириною 0,3 мм. Досліджувалося поширення тріщини із вершини цього пропи́лу при тиску на зразок імпульсом і рівномірному розподіленні навантаження по довжині пазу (рис. 1). Імпульс тиску формувався пласкою струмопровідною шиною шириною 10 мм з мідної фольги товщиною 250 мкм. Генератор імпульсних струмів розряджався в коливальному режимі з періодом коливань  $T \cong 5,5\text{--}6,0$  мкс і постійною часу згасання близько  $T = 1\text{--}4$  мкс. Амплітуда імпульсу струму варіювалася в діяпазоні 150–300 кА, що відповідає амплітуді напруги в навантаженні від 140 до 320 МПа. Реєстрація струму проводилася поясом Роговського на осцилографі (рис. 2, а).

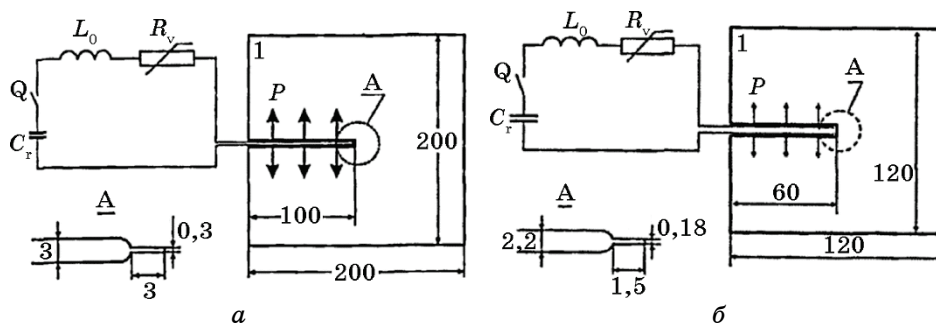
На рисунку 2 всі розміри вказано в мм. Зразки із сферо-пластику досліджувалися на такій самій установці, тільки мали фор-

му пластин розміром  $120 \times 120 \times (9-16)$  мм<sup>3</sup> з серединним крайовим наскрізним пазом шириною 2,2 мм і довжиною 60 мм, а також симетричним по відношенню до його берегів надрізом у вершині пазу глибиною 1,5 мм і шириною 0,18 мм (рис. 2, б).



**Рис. 1.** 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.

**Fig. 1.** Optical registration scheme: 1—photographic film, 2—mirror, 3 and 6—system of photographic lens, 4—shutter, 5—adjustable slot, 7—sample, 8—moving crack, 9—lamp-flash IFP-120, 10—light guide.



**Рис. 2.** Схеми установки та навантаження зразка:  $P$  — навантаження на зразок,  $C_r$  і  $L_0$  — накопичувальна ємність і власна індуктивність генератора імпульсних струмів,  $Q$  — високовольтний комутатор,  $R_v$  — нелінійний опір, 1 — досліджуваний зразок з ПММК (а) та сферопластику (б).

**Fig. 2.** Schemes of installation and sample loading:  $P$ —load on the sample,  $C_r$  and  $L_0$ —accumulation capacity and own inductance of the pulse current generator,  $Q$ —high-voltage switchboard,  $R_v$ —nonlinear resistance, 1—experimental sample from PM MC (a) and spheroplastic (b).

Наступна метода, котру було залучено для експериментального дослідження динамічних властивостей матеріялу, базувалася на використанні легкогазових гармат, котрі являють собою компактні та дешеві вибухові генератори, які забезпечують широкий діапазон амплітуд і тривалостей імпульсів навантаження. Однак руйнівна дія вибуху накладає деякі обмеження: вимоги безпеки, можливість руйнування ударника, практична безконтрольність його руху. Альтернативним рішенням є використання гладкоцільових балістичних установок. Перевагою таких установок є можливість плавного регулювання швидкості зіткнення, забезпечення мінімального перекосу ударника. Для досліджень механічних властивостей матеріялів при ударно-хвильовому навантаженні зазвичай використовують пневматичні гармати з калібром 50–150 мм. При довжині стовбура до 14 мм і початковому тиску стисненого газу (азот або гелій) до 150 атм. на таких установках одержують швидкості метання в діапазоні від 100 до 1500 м/с. Плаский ударник встановлюється на торець порожнистого циліндричного снаряду для досягнення найбільшої паралельності зіткнення площин, а мішень розміщують таким чином, щоб зіткнення відбувалося в момент, коли снаряд ще не повністю вийшов зі стовбура. Метода допускає установку зразка та датчиків як на мішені, так і на самому снаряді.

Для розгону ударників до високих швидкостей найчастіше використовуються двоступеневі легкогазові гармати. Схематичний пристрій такого пришвидшувача показано на рис. 3. Від згоряння пального складу в пороховій камері розривається діафрагма, змушуючи поршень рухатися в нагнітальній трубі та стискати легкий газ (зазвичай водень). При заздалегідь визначеному тиску розривається діафрагма, яка відділяє трубу розгону від нагнітальної труби, завдяки чому стиснутий легкий газ розганяє ударник у трубі розгону. В деяких варіантах спалюється речовина,

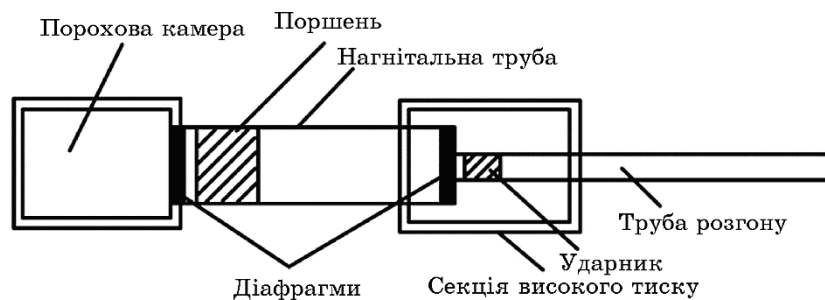


Рис. 3. Схема двоступеневої легкогазової гармати.

Fig. 3. Scheme of two-power easy-gas gun.

яка знаходиться в пороховій камері в середовищі легкого газу (водню або гелію). В одному з варіантів порохова камера являє собою частину нагнітальної труби, що уможлиблює обходитися однією діафрагмою і без легкого газу (рис. 3).

Крім того, гарматні пришвидшувачі розрізняються за профілем переходу від нагнітальної труби до труби розгону. У деяких пришвидшувачах цей перехід роблять різким. В інших випадках використовуються конфузорні переходи з видавлюванням поршня («пришвидшувачі з резервуаром, котрий розганяється»). У зв'язку з тим, що в існуючих легкогазових гарматах калібрів від 12,7 мм (півдюймових) до 5,6 мм досяжні швидкості мають величину порядку  $(10-11) \cdot 10^3$  м/с, робилися спроби підвищити такі швидкості різними способами:

- нагрів за допомогою електричного розряду розганяє газ в нагнітальній трубі (Еккерман і Свіфт);
- те ж саме з трубою розгону (Хауелл);
- інший спосіб полягав у використанні «резервуару, що рухається»: частина поршня захоплювалася власним імпульсом уздовж труби розгону, надаючи ударнику додаткове пришвидшення;
- у методі «дульного струменя» передбачається, що імпульс обойми продавлює її крізь звуження на дуловому зрізі, підвищуючи швидкість ударника.

Всі ці прийоми уможливають підвищувати швидкість на дуловому зрізі в тих випадках, коли початкова швидкість мала, але жоден з них не здатний дати надійного розгону, що забезпечується невідосконаленими двоступінчастими легкогазовими гарматами з найвищими показниками за швидкістю [8].

Отже, в ході експериментального застосування кваліметричного підходу для оцінки якості високонавантажених матеріалів були використані: імпульсна метода навантаження для стопу нікелід титану, для матеріалу полімер (ПММК і сферопластик) було використано методу ударного впливу, а для металів — легкогазові гармати.

### **3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЕЦІАЛЬНИХ МЕТАЛЕВИХ СТОПІВ І ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЗА ДОПОМОГОЮ «ПАВУТИННЯ ЯКОСТІ»**

В даному розділі будуть представлені наступні дослідницькі матеріали:

- результати досліджень якості стопів з пам'яттю форми за допомогою методи «павутиння якості» та секторних діаграм рівня якості;



– результати дослідження якості поліметилметакрилатового матеріялу за допомогою номограм бажаності з показчиками для використання їх у таблицях якості.

### 3.1. Результати досліджень якості стопів з пам'яттю форми за допомогою методи «павутиння якості» та секторних діаграм рівня якості

Для стопів з пам'яттю форми (нікелід титану: 44,9% Ti та 55,1% Ni і стопу Ti–Ni: 50% Ti, 47% Ni з додаванням 3% Cu) і полімерних матеріялів (ПММК і сфероластику) та металів були проведені випробування за допомогою трьох метод навантаження: 1) стопи з пам'яттю форми випробовували на спеціальних вибухових пристроях; 2) полімерні матеріяли навантажували ударним впливом, котрий створювався імпульсним магнетним полем; 3) для металів були застосовані пневматичні гармати калібру 37 мм. В результаті обробки результатів експериментальних випробувань були одержані дані, представлені в табл. 2.

При визначенні відкольної міцності густина матеріялу, — нітінолу, — становила  $\rho = 6,5\text{--}10$  кг/м; швидкість пружної хвилі —  $c = 5200$  м/с. Після проведення аналізу даних було встановлено, що для оцінки якості матеріялів з пам'яттю форми та моніторингу їх стану найприйнятнішими є методи побудови «павутиння якості» та метода секторних діаграм. Для побудови циклограм «павутиння якості», яка будується відповідно до кількості оцінюваних показчиків (характеристик) якості, подібно павутинню, коли відкладаються в різні боки  $n$  кваліметричних шкал у відповідному масштабі. На шкалах відкладається кожне значення показчиків властивостей, після чого точки з'єднують між собою і одержують багатокутники, число котрих відповідає

ТАБЛИЦЯ 2. Вихідні дані по нітінолу.

TABLE 2. Output data for Nitinol.

№	Зразок	Товщина ударника $H$ , мм	Товщина ударника $h$ , мм	Швидкість ударника $V$ , м/с	Відкольна швидкість ударника $W$ , м/с	Відкольна міцність $\sigma$ , ГПа
1	Ti–Ni	1,61	0,2	600	94	3,177
2	Ti–Ni–Cu3	1,6	0,2	600	268	9,058
3	Ti–Ni–Cu3	3,96	0,4	630	230	7,774
4	Ti–Ni–Cu3	4,42	2	700	180	6,084
5	Ti–Ni–Cu3	4,5	2	700	100	3,38

ТАБЛИЦЯ 3. Значення рівня якості.

TABLE 3. Values of quality level.

№	Зразок	$Y(H)$	$Y(h)$	$Y(V)$	$Y(W)$	$Y(\sigma)$	Рівень якості $Y_k$
1	Ti-Ni	0,93	0,1	0,86	0,31	0,32	0,50
2	Ti-Ni-Cu3	0,94	0,1	0,86	0,89	0,91	0,74
3	Ti-Ni-Cu3	0,38	0,2	0,9	0,77	0,78	0,61
4	Ti-Ni-Cu3	0,34	1	1	0,60	0,61	0,71
5	Ti-Ni-Cu3	0,33	1	1	0,33	0,34	0,60

кількості оцінюваних зразків. Площа, яку займає кожний багатокутник відповідає якості конкретного зразка і уможливорює порівняти його з іншими розрахованими значеннями рівня якості зразків за формулами:

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

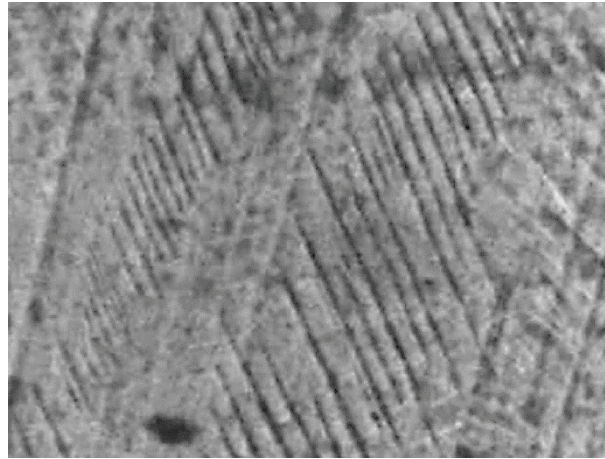
$$Y_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i r_i^2}. \quad (2)$$

Рівні якості та підсумкове значення представлено в табл. 3.

Як видно з таблиці 3 найбільші значення рівня якості мають зразки 2 і 4 з добавками міді. Також очевидно є перевага зразків, збагачених міддю, над звичайним стопом нітінолу; для підтвердження цих даних для стопу з добавками міді була виміряна мікротвердість, яка склала 212HV. Тобто відбулося збільшення мікротвердості в результаті навантаження в порівнянні з вихідним станом (202HV), що відобразилося на підвищеному значенні відкільної міцності для даного виду матеріялу. Крім того, збільшення мікротвердості пов'язано з протіканням мартенситного перетворення в матеріялі, що підтверджують фотографії мікроструктур, де виявлено мартенсит різної орієнтації у стопах нітінолу (рис. 4 і 5).

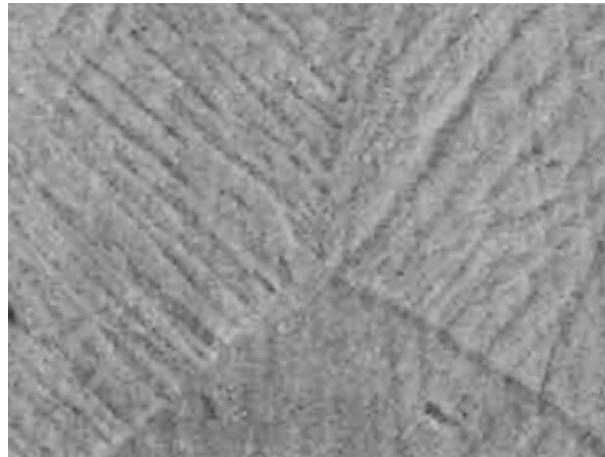
Одержані значення підтверджуються побудованим «павутинням якості» при зіставленні показчиків якості. На циклограмі наочно зображено за яким показчиком один варіант перевершує інший і навпаки (рис. 6).

З циклограми («павутиння якості», рис. 6) випливає, що можливі 5 різних варіантів якості зразків. При цьому площа, яку займають багатокутники № 2 і № 4, є найбільшою, а багатокутник № 1 є найменшим за площею. Це свідчить про те, що рівень якості матеріялу 2 по сукупності властивостей найкращий, незважаючи на те, що значення окремих показчиків виробу (товщина і швидкість ударника) є мінімальними. Крім того, рівень



**Рис. 4.** Мікроструктура яскраво вираженого голчатого мартенситу у стопі Ti-Ni.

**Fig. 4.** Microstructure of pronounced needle martensite in Ti-Ni alloy.



**Рис. 5.** Мікроструктура менш вираженого голчатого мартенситу різної орієнтації у стопі Ti-Ni-Cu3.

**Fig. 5.** Microstructure of less pronounced needle martensite of different orientation in Ti-Ni-Cu3 alloy.

якості зразка № 2 може вважатися найкращим, тому що у даного зразка виявлено максимальну відкольну міцність, а вона, в даному випадку, є визначальним показником.

Високу відкольну міцність у зразка № 2 одержано за високих значень швидкості ударника. З цієї ж причини зразок № 4 пос-

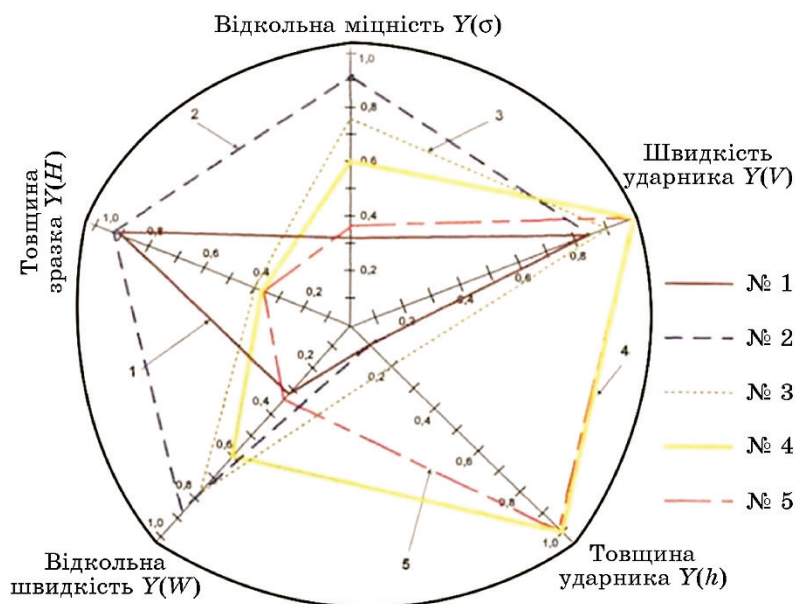


Рис. 6. Циклограма «павутиння якості» нітінолу.

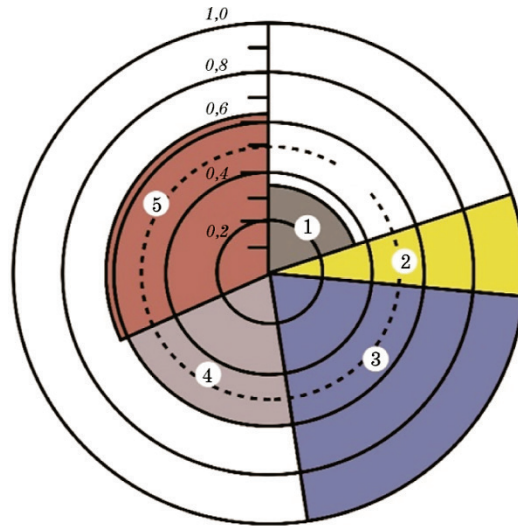
Fig. 6. Nitinol 'web of quality' cyclogram.

тупається зразку № 2, тому що має набагато меншу відкільну міцність. Варіант 2 має найбільшу відкільну міцність.

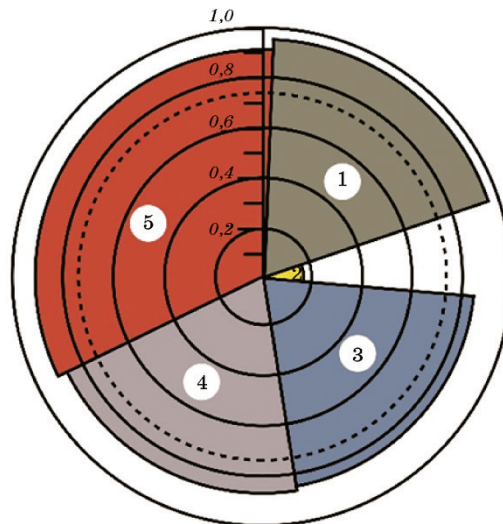
Також очевидним є мінімальне значення рівня якості для зразка № 1 без добавок міді; на циклограмі даний зразок утворює багатокутник з найменшою площею, що зумовлено мінімальними значеннями практично всіх параметрів. Варіант 1, який має низьку відкільну міцність, може в конкретному випадку зруйнуватися. За результатами експерименту можна сказати, що доцільно вибирати набір властивостей, представлених для зразка № 2, тому що в даному випадку досягається бажане поєднання властивостей шляхом оптимізації характеристик відкільної міцності.

Альтернативним способом представлення рівня якості при оцінці якості матеріалів може бути використання секторних діаграм (рис. 7, 8). Секторні діаграми будуються за відносними показниками якості та їх коефіцієнтами вагомості. Кожен показник зображується на діаграмі у вигляді кругового сектора, радіус якого дорівнює значенню показника щодо обраного аналога, а центральний кут — коефіцієнту вагомості, вираженому умовною величиною в градусах або радіанах. Базові значення для всіх показників зображуються колом, що має радіус, який дорівнює одиниці. Центральний кут для  $i$ -го показника з коефіцієнтом вагомості  $\alpha_i$  визначається, як  $\varphi_i = 360^\circ \alpha_i$ .

Рівень якості зразка визначається на основі комплексного середнього зваженого показника  $Y_k$ , іменованого тут середнім зваженим круговим показником. Він дорівнює радіусу кола, площа



**Рис. 7.** Секторна діаграма рівня якості для зразка № 4.  
**Fig. 7.** Sector diagram of the quality level for sample No. 4.



**Рис. 8.** Секторна діаграма рівня якості для зразка № 2.  
**Fig. 8.** Sector diagram of the quality level for sample No. 2.

якого дорівнює сумі площ секторів діаграми. В результаті побудови секторних діаграм можливо порівняти 2 кращих зразка, які визначені диференційною метою. Коефіцієнти вагомості одержано експертним шляхом — метою ранжування. Коефіцієнт узгодженості думок експертів склав 0,8, що говорить про те, що коефіцієнтам вагомості, визначеними за цією метою, можна довіряти. Одержані значення для зразків № 4 і № 2 представлено на рис. 9 і 10 (табл. 4 і 5) відповідно. Показчик  $Y_k$  близький до середнього зваженого арифметичного показника. Значення середнього зваженого кругового показника графічно відображається колом у вигляді пунктирної лінії та становить:

$$Y_{k4} = \sqrt{0,19 \cdot 0,34^2 + 0,07 \cdot 1^2 + 0,21 \cdot 1^2 + \dots} \quad (3)$$

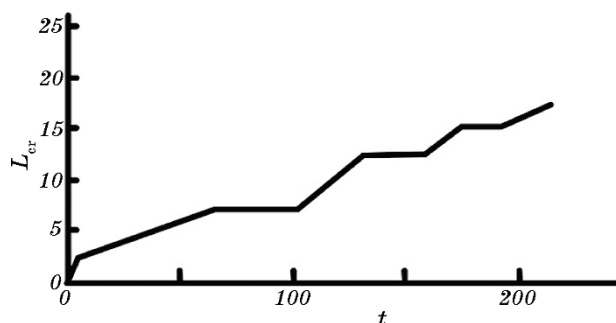


Рис. 9. Графік росту тріщини.

Fig. 9. Crack growth pattern.

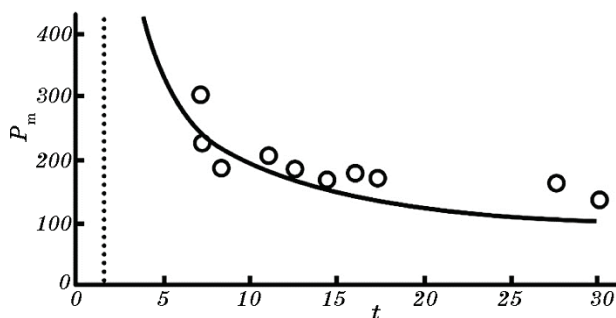


Рис. 10. Залежність амплітуди прикладеного імпульсу від часу до початку руйнування.

Fig. 10. Dependence of the amplitude of applied impulse on time until beginning of destruction.

**ТАБЛИЦЯ 4.** Дані для рівня якості зразка № 4.

**TABLE 4.** Data for the quality level of specimen No. 4.

№	Зразок	Базові значення	№ 4	Відносне значення $r_i$	Коефіцієнт вагомості $\alpha_i$	$\varphi$ , град
1	Товщина зразка $H$ , мм	1,5	4,42	0,34	0,19	68
2	Товщина ударника $h$ , мм	2	2	1,00	0,07	25
3	Швидкість ударника $V$ , м/с	700	700	1,00	0,21	76
4	Відкольна швидкість $W$ , м/с	300	180	0,60	0,2	72
5	Відкольна міцність $\sigma$ , ГПа	10	6,084	0,61	0,33	119
	Сума	–	–	–	1	360

**ТАБЛИЦЯ 5.** Дані для рівня якості зразка № 2.

**TABLE 5.** Data for the quality level of specimen No. 2.

№	Зразок	Базові значення	№ 2	Відносне значення $r_i$	Коефіцієнт вагомості $\alpha_i$	$\varphi$ , град
1	Товщина зразка $H$ , мм	1,5	1,6	0,94	0,19	68
2	Товщина ударника $h$ , мм	2	0,2	0,10	0,07	25
3	Швидкість ударника $V$ , м/с	700	600	0,86	0,21	76
4	Відкольна швидкість $W$ , м/с	300	268	0,89	0,2	72
5	Відкольна міцність $\sigma$ , ГПа	10	9,058	0,91	0,33	119
	Сума	–	–	–	1	360

$$+0,2 \cdot 0,6^2 + 0,33 \cdot 0,61^2 = 0,496,$$

$$Y_{k2} = \sqrt{0,19 \cdot 0,94^2 + 0,07 \cdot 1^2 + 0,21 \cdot 0,86^2 +} \quad (4)$$

$$+0,2 \cdot 0,89^2 + 0,33 \cdot 0,91^2 = 0,752.$$

Показчик  $Y_k < 1$  означає, що рівень якості даного зразка нижче

базового.

Таким чином, оцінка, проведена даними методами, підтверджує раніше зроблені висновки про те, що якість зразка № 2 краща. Розраховані з урахуванням коефіцієнтів вагомості рівні якості для двох зразків показують, що рівень якості зразка № 2 на 65,9% більше рівня якості зразка № 4. За якими показниками один перевершує інший наочно видно на секторних діаграмах (рис. 7, 8). За показниками 1, 4 і 5 зразок 2 набагато більше перевершує зразок 4. При цьому зразок № 4 має найліпші показники (базові) за параметрами 2 і 3 і перевершує зразок № 2 за 5 і 1 пунктами відповідно.

Слід зауважити, що таке мінімальне значення товщини ударника наводить на припущення, що за рахунок нього і відбувається досягнення зразком максимальних значень за іншими параметрами і, по найбільш важливому із них, — відкольній міцності. Щоб виключити дане припущення, було проведено кореляційну аналізу для встановлення ступеня впливу окремо кожного з параметрів на відкольну міцність. В результаті одержали наступні дані: 1) товщина зразка і швидкість ударника окремо практично не впливають на відкольну міцність, тому що мають коефіцієнти кореляції  $-0,08$  і  $-0,02$  відповідно; 2) відкольна швидкість має слабку пряму кореляцію — коефіцієнт  $0,37$ , тобто висока відкольна швидкість збільшує відкольну міцність; 3) товщина ударника також має слабку, але зворотню кореляцію — коефіцієнт  $0,38$ , тобто при зменшенні товщини збільшується міцність. Отже, не можна сказати, що безпосередньо тільки товщина ударника впливає на величину відкольної міцності. Тільки всі параметри в сукупності дають результати, представлені в даній методиці.

Таким чином, обраний найкращий зразок № 2 вагомо поступається тільки за показником 2 (товщина ударника), але в даному випадку можна говорити, що подібний зразок (№ 2) поєднав властивості і умови навантаження та уможливило одержати матеріял з оптимальними найкращими характеристиками.

### **3.2. Дослідження якості поліметилметакрилатового матеріялу за допомогою номограм бажаності з показниками для використання їх в таблицях якості**

Для полімерних матеріялів (поліметилметакрилату (ПММК) і сферопластику) проводилися дослідження за допомогою магнетно-імпульсного навантаження. Випробування проводилося на 10 зразках. При цьому період коливань дорівнював  $T = 5,6 \cdot 10^{-6}$  с, постійна часу загасання —  $T_1 = 4,2 \cdot 10^{-6}$  с, а амплітуда імпульсу тиску  $P_m$  варіювалася від 140 до 320 МПа. В результаті була одержана типова картина просування тріщини, яка відображена на



рис. 9.

Аналіза графіка уможливила виявити експериментальну залежність часу старту тріщини від амплітуди прикладеного навантаження. На рисунку 10 представлено розрахункову криву залежності амплітуди прикладеного імпульсу від часу початку росту тріщини. Групами представлені експериментальні результати. Пунктирна лінія ( $t \approx 1,7$  мкс) відповідає часу досягнення коефіцієнтом інтенсивності напружень максимального значення. Час на графіку відраховується від моменту прикладання навантаження.

Дані, одержані в результаті експерименту, показують, що рух тріщини починається після закінчення деякого часу після того, як локальне силове поле на кінці тріщини, — коефіцієнт інтенсивності, — досягає максимуму. Таке явище називається затримкою руйнування.

Характер руйнування ПММК в результаті динамічного навантаження представлено на діаграмі розподілу виду зламу від довжини пророслої з вершини надрізу тріщини та тривалості імпульсу (рис. 11). По мірі поширення тріщини з вершини надрізу характер руйнування змінюється: спочатку йде дзеркальна об-

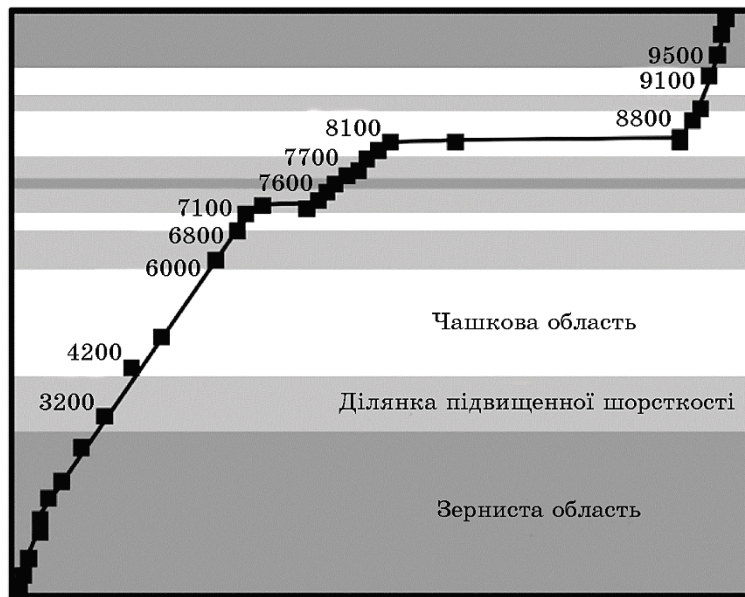
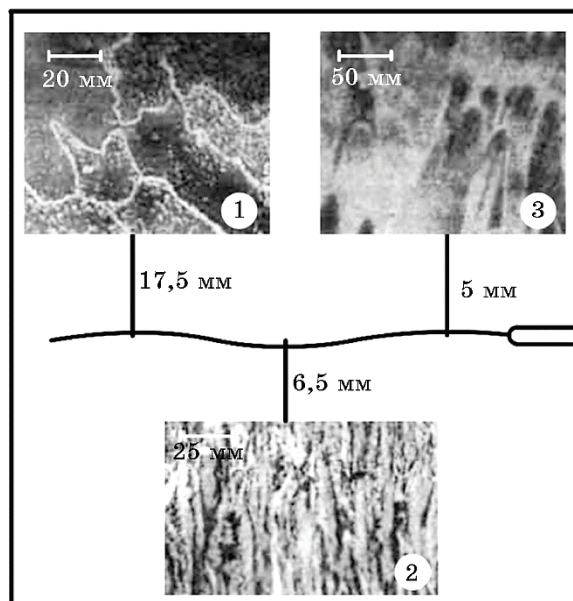


Рис. 11. Діаграма розподілення виду зламу від тривалості навантаження і відстані від надрізу.

Fig. 11. Diagram of distribution of breaking type on both duration of the load and distance from the notch.



**Рис. 12.** Фотографії структури типових зламів та їх розташування уздовж тріщини: 1 — дзеркальна область, 2 — шерсткий злам, 3 — параболічний.

**Fig. 12.** Photographs of structure of typical breakings and their location along the crack: 1—mirror area, 2—rough breaking, 3—parabolic breaking.

ласть, далі ділянка збільшеної шерсткості, й, нарешті, параболічна або чашкова область (рис. 12). При подальшому поширенні тріщини ці основні види зламів періодично чергуються.

Поверхнева енергія є мірою опору матеріалу руйнуванню. Вона є більш загальним показником граничних властивостей матеріалу при руйнуванні, ніж міцність, тому що не залежить від локальних характеристик матеріалу і від характеру механічного впливу (рис. 12).

Зі збільшенням відстані від вершини надрізу розмір чашечок зменшується. Знаючи діаметер чашок і питому поверхневу енергію руйнування ПММК, яка дорівнює  $\gamma = 2,1 \cdot 10^2$  Дж/мм<sup>2</sup>, можна перерахувати енергію руйнування ПММК, що припадає на середню чашку зламу. Результати наведено в табл. 6.

Таким чином, в результаті експериментів зі зразками з оргскла (ПММК) одержано дані по залежності: амплітуди від часу старту тріщини, довжини тріщини від тривалості імпульсу, енергії руйнування чашкового зламу від довжини тріщини.

Експериментальні дані уможливають скласти функцію бажа-

ТАБЛИЦЯ 6. Енергія руйнування чашкового зламу.

TABLE 6. Energy of destruction of a cup fracture.

Довжина тріщини $L_{cr}$ , мм	Розмір чашок $d$ , мм	Швидкість тріщини $V$ , м/с	Енергія руйнування $E$ , Дж/чашку
5,0	$32 \cdot 10^{-6}$	92,4	$17 \cdot 10^{-8}$
17,5	$18 \cdot 10^{-6}$	50,69	$5,3 \cdot 10^{-8}$
25,5	$13 \cdot 10^{-6}$	194,25	$2,8 \cdot 10^{-8}$

ности для матеріалів в заданих умовах. Дані діаграми можна використовувати для оцінки матеріалів в подібних умовах у подальшому при випробуваннях.

Виходячи з експериментальних даних, складено таблиці ґрадації якості (табл. 7). В основному, при застосуванні функції бажаности використовують параметри, нормовані галузевими стандартами. Оскільки для полімерів в умовах динамічного навантаження відсутні подібні норми, тому в даній методиці є необхідність в розробці таблиць ґрадацій, які можна буде використовувати в подальшому (табл. 8). Таблицю 8 складено наступним чином.

Для амплітуди (рис. 10) виявлено розкид параметрів від 150 до 300 МПа, при цьому, чим більше амплітуда, тим швидше відбувається зростання тріщини (приблизно через  $(7-30) \cdot 10^{-6}$  с). Таким чином, для усередненого моменту часу в  $0,15 \cdot 10^{-4}$  с амплітуда в 150 МПа може вважатися «поганою» ґрадацією якості, а в 300 МПа — «відмінною». Для довжини тріщини (рис. 12) розкид параметрів склав від 0 до 8,1 мм при тривалості імпульсу до  $10^{-4}$  с. Відповідно, чим меншу відстань пройде тріщина у зразку до даного моменту часу, тим до більш високого ступеня ґрадації якості він відноситься. Для енергії чашкового зламу (табл. 5.) енергія його руйнування зменшується з  $17 \cdot 10^{-8}$  до  $2,8 \cdot 10^{-8}$  Дж/чашку на всій довжині поширення тріщини до 17,5 мм (далі енергія практично не витрачається, тому що відбувається руйнування зразка, згідно з рис. 11). Отже, для середньої довжини тріщини в 8 мм. енергія руйнування в  $17 \cdot 10^{-8}$  Дж/чашку може відноситися до ґрадації «відмінно».

Таким чином, використання методи полягає в наступному: для випробуваного зразка заміряються параметри (табл. 6) при заданих умовах (часі імпульсу  $(0,15-1) \cdot 10^{-4}$  с та довжині тріщини в 8–10 мм). Далі будується функція бажаности (рис. 13) за допомогою базових точок і граничних значень натурального показника, які визначаються стандартом або нормативно-технічними доку-

**ТАБЛИЦЯ 7.** Значення функції бажаности в основних і проміжних точках.**TABLE 7.** Values of desirability function in the main and intermediate points.

Числові значення			
Y	Q	Y	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

**ТАБЛИЦЯ 8.** Категорії якості ПММК.**TABLE 8.** Quality categories of PMMA.

Градация якості $X_{si}$	Норми		
	Амплітуда $P_m$ , МПа	Довжина $L_{er}$ , мм	Енергія $E$ , Дж/чашку
Погано	< 150	> 8,1	< $5 \cdot 10^{-8}$
Задовільно	150–220	7,5–8,1	$(5–10) \cdot 10^{-8}$
Добре	220–290	7,0–7,5	$(10–17) \cdot 10^{-8}$
Відмінно	> 290	< 7,0	$17 \cdot 10^{-8}$

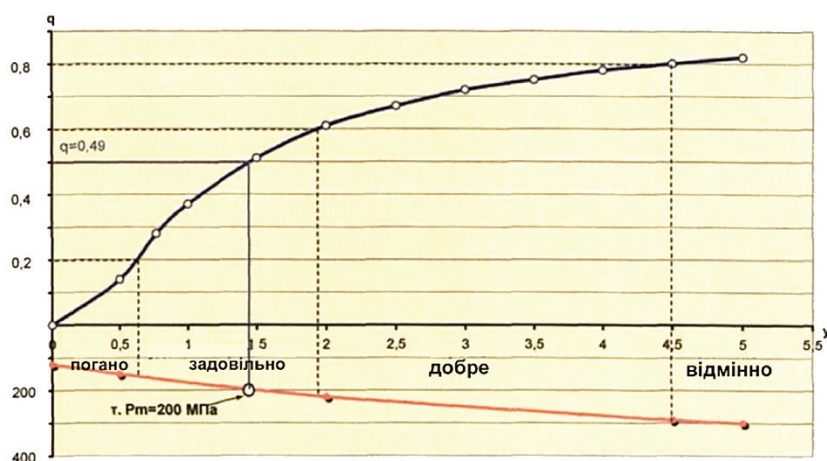
ментами.

Номограма будується індивідуально для кожного із натуральних одиничних показників якості, тобто для різних натуральних значень  $xt$ . Однак наочніше і простіше визначити величини  $y$  і  $q$  по тривісним номограмам  $xuq$ :

$$q = \exp(-1 / y) \quad (5)$$

для  $0 < y < \infty$ .

Дані номограми можна використовувати для оцінки якості зразків з ПММК при імпульсному навантаженні за такими параметрами, як амплітуда навантаження, довжина поширення тріщини й енергія. Позначивши на діаграмах значення експеримен-



**Рис. 13.** Номограма визначення показника бажаності для амплітуди руйнування ПММК.

**Fig. 13.** Nomogram of determination of the index of desirability for the amplitude of destruction of PMMA.

ту, можна визначити коефіцієнт  $q$  і область, куди потрапляють значення, що, в свою чергу, уможливорює судити про матеріал за окремими параметрами і про сам зразок, в середньому, який відноситься до ґрадації «хорошої» якості, тому що по першому параметру якість є задовільною  $q = 0,49$ , по другому — відмінною  $q = 0,81$ , а по третьому — доброю  $q = 0,62$ .

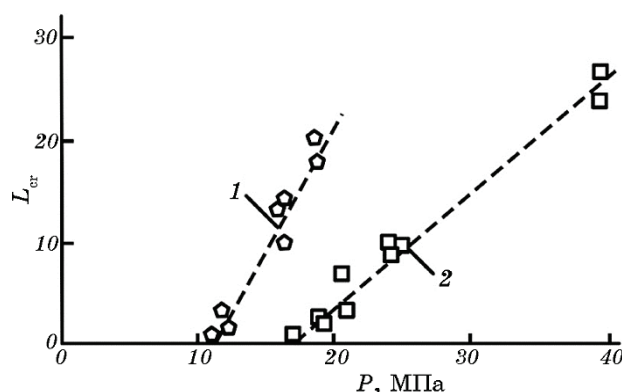
#### 4. ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ СФЕРОПЛАСТИКУ ПММК ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТАБЛИЦІ «ҐРАДАЦІЙ ЯКОСТІ»

Для матеріалу сферопластику проводилися дослідження аналогічні до ПММК і було одержано наступні дані. Експерименти проводилися при двох тривалостях імпульсу навантаження: 2,76 і 4,40 мкс. На рисунку 14 наведено дані по залежності довжини пророслої в зразку тріщини від амплітуди імпульсу, який на неї вплинув.

Крім того, в результаті експерименту встановлено залежність довжини пророслої тріщини від середнього розміру наповнювача для різних зразків (табл. 9).

Щоб встановити ступінь впливу даних параметрів один на одного необхідно побудувати діаграму розкиду. Діаграма розкиду довжини тріщини від розміру наповнювача вказує на пряму залежність параметрів (рис. 15).

Чим більший розмір, тим далі поширюється тріщина, причому



**Рис. 14.** Експериментальні дані по руйнуванню сфероластику одиничними імпульсами тривалістю 4,40 (1) і 2,76 мкс (2).

**Fig. 14.** Experimental data on the destruction of spheroplastics by single pulses with duration of 4.40 (1) and 2.76  $\mu$ s (2).

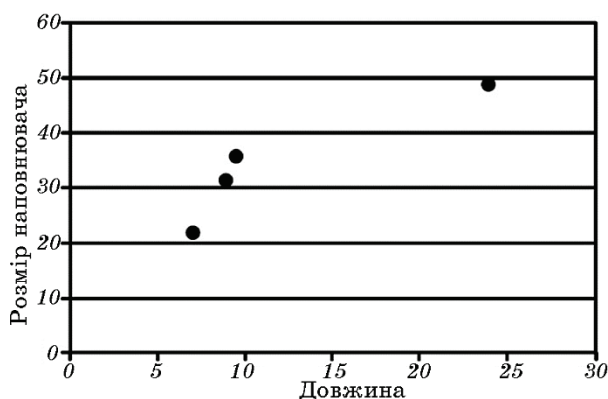
**ТАБЛИЦЯ 9.** Вплив розміру наповнювача на довжину кінцевої тріщини.

**TABLE 9.** Influence of the filler size on the length of final crack.

№ зразка	Довжина тріщини, мм	Розмір наповнювача, $10^{-6}$ м
1	24	48,5
3	9,6	35,1
4	7	21,1
6	9	30,5

після розміру мікросфер в 40 мкм спостерігається різка прогресія збільшення довжини тріщини. Для підтвердження ступеня взаємозв'язку розраховано коефіцієнт кореляції, який підтверджує тісний зв'язок і становить  $r = 0,93$ . Аналогічно — і з матеріалом ПММК. Тобто для сфероластику розроблено градації якості і побудовано функції бажаності для визначення якості зразків в умовах імпульсного навантаження (табл. 10). Таким чином, внаслідок експериментів зі зразками із сфероластику одержано дані по залежності: амплітуди від тривалості навантаження, довжини тріщини від імпульсу навантаження, розміру наповнювача від довжини тріщини.

Виходячи з наведених вище даних, розмір наповнювача має істотний вплив на поширення тріщини в зразку; тому даний параметер при оцінці можна вважати одним з найважливіших і визначальних.



**Рис. 15.** Діаграма розкиду значень довжини тріщини від розміру наповнювача для сфероластику.

**Fig. 15.** Diagram of spread of the crack length values from the size of filler for spheroplastics.

**ТАБЛИЦЯ 10.** Категорії якості для сфероластику.

**TABLE 10.** Quality categories for spheroplastics.

Ґрадація якості $X_{si}$	Норми		
	Амплітуда $P_m$ , МПа	Довжина $L_{er}$ , мм	Розмір діаметра наповнювача $d$ , $10^{-6}$ м
	$\approx 4,40$	$\approx 4,40$	
Погано	< 10	< 10	50
Задовільно	10–12	18–25	35–50
Добре	12–15	25–35	20–35
Відмінно	> 15	> 15	< 20

Дані номограми можна використовувати для оцінки якості зразків із сфероластику при імпульсному навантаженні за такими параметрами, як амплітуда навантаження, довжина поширення тріщини і розмір частинок наповнювача. Позначивши на діаграмах значення експерименту можна визначити коефіцієнт  $q$  і область, куди потрапляють значення, що, в свою чергу, уможлиблює судити про якість матеріалу за окремими параметрами.

В даному випадку зразок, випробуваний при імпульсі навантаження в 2,76 мкс, в середньому, відноситься до ґрадації «доброї» якості. По першому параметру якість хороша —  $q = 0,72$ , по другому — добра із  $q = 0,62$ , а по третьому — відмінна із  $q = 0,75$ .

При комплексному застосуванні функції бажаності (рис. 16,

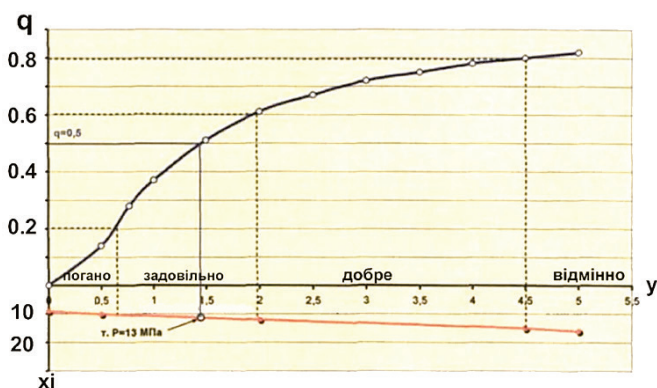


Рис. 16. Номограма визначення показчика бажаности сфероластику для амплітуди при тривалості імпульсу 4,40 мкс.

Fig. 16. Nomogram of determining the desirability index of spheroplastics for amplitude at pulse duration of 4.40  $\mu$ s.

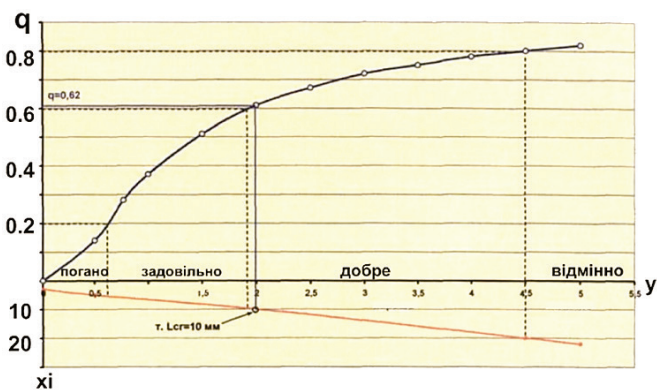


Рис. 17. Номограма визначення показчика бажаности для довжини тріщини у сфероластику.

Fig. 17. Nomogram of determination of the desirable index for the length of crack in spheroplastic.

17) з результатами експериментальних досліджень по визначенню таких показчиків, як амплітуда прикладеного імпульсу  $P$  (МПа), величина діаметра частинок наповнювача  $d$  (мм) та довжина тріщини  $L_{cr}$  (мм), за яких виникає тріщина, ми можемо визначити категорії (градації) якості сфероластику (табл. 10). Було побудовано номограми за залежностями функцій бажаности по показчикам  $q$  та за величиною залежності амплітуди прикладеного імпульсу від часу до початку руйнування.



Таблицю 10 складено наступним чином:

1. Для амплітуди (рис. 13) виявлено розкид параметрів від 10 до 15 МПа при тривалості імпульсу в 4,40 мкс і від 18 до 40 для 2,76 мкс;
2. Для довжини тріщини (рис. 17) розкид параметрів склав від 0 до 20 мм при тривалості імпульсу 4,40 мкс і від 0 до 30 при 2,76 мкс;
3. Для розміру наповнювача (табл. 10) параметер змінюється від 20 до  $48 \cdot 10^{-6}$  мм при поширенні тріщини з 5 до 25 мм.

За даними категоріями якості та методикою застосування функції бажаности побудовано номограми для сфероластику, які допомагають визначати рівень якості матеріялу.

Таким чином, з таблиці 10 випливає, що основний вплив на показчик якості ПММК спричиняє величина діаметра частинок наповнювача  $d = 10^{-6}$  мм. Так, за показчиками на функціях бажаности, при зменшенні діаметра наповнювача від  $d = 50 \cdot 10^{-6}$  мм до  $d = (20-35) \cdot 10^{-6}$  мм, показчик якості знаходився в зоні «добре», а при зменшенні діаметра наповнювача до  $d = 20 \cdot 10^{-6}$  мм показчик якості знаходився в зоні «відмінно».

## **5. ВИЗНАЧЕННЯ КОМПЛЕКСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РІВНЯ ЯКОСТІ ДЛЯ ДЕЯКИХ МЕТАЛІВ ТА СТОПІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ТАБЛИЦЬ ЯКОСТІ ТА «ПАВУТИНИ ЯКОСТІ»**

Згідно з методикою побудови функції бажаности [6], проведено дослідження металів, а експериментальні дані представлено в табл. 11.

Товщина мішені та тривалість імпульсу для всіх металів були однаковими та становили 5 мм і  $0,7 \cdot 10^6$  с відповідно. Для аналізу ступеня відмінности між даними металами можна провести оцінку за методикою побудови «павутиння якості». Для побудови «павутини» якості розраховано значення рівня якості зразків. Рівні якості, а також підсумкове значення, представлені в табл. 12.

Як видно з таблиці 12, рівень якості стали 30ХН4М в два рази більше стали 12Х18Н10Т, також як рівень якості титанового стопу ВТ-5 титану ВТ1-00. Мідь різної чистоти практично не відрізняється за рівнем якості. Підвищене значення відкільної міцности для сталі 30ХН4М може проходити через перебіг процесу двійникування під час удару. Розраховані значення рівнів якості підтверджує діаграма (рис. 15).

Для побудови діаграми необхідно оцінити ступінь впливу (коєфіцієнт кореляції) для параметрів швидкості зсувної деформації та відкільної міцности. Проведений розрахунок показав, що коєфіцієнт кореляції становить  $r = -0,25$ . Це говорить про невели-

ТАБЛИЦЯ 11. Вихідні дані по металах.

TABLE 11. Initial data for metals.

Метал	Гратниця навантаження	Швидкість $V$ , м/с	Поперечна швидкість зсуву $V_T$ , м/с	Повздовжня швидкість зсуву $V_L$ , м/с	Швидкість зсувної деформації $\gamma \cdot 10^{-6}$ , с <sup>-1</sup>	Відкольна міцність $\sigma$ , МПа
30ХН4М	ОЦК	351	64	36	2,6	9,12
12Х18Н10Т	ГЦК	368	21	7	4,3	5,02
Мідь М2	ГЦК	153	14	14	1,4	2,6
Мідь М3	ГЦК	205	26	14	2,6	2,52
Титан ВТ1-00	ГЦП	522	11	14	1,1	7,2
Титан ВТ-5	ГЦП	663	32	50	0,9	9,13

ТАБЛИЦЯ 12. Розрахунок рівня якості для металів.

TABLE 12. Calculation of the quality level for metals.

Метал	$Y(V)$	$Y(V_T)$	$Y(V_L)$	$Y(\gamma)$	$Y(\sigma)$	Рівень якості $Y_k$
30ХН4М	ОЦК	351	64	36	2,6	9,12
12Х18Н10Т	ГЦК	368	21	7	4,3	5,02
Мідь М2	ГЦК	153	14	14	1,4	2,6
Мідь М3	ГЦК	205	26	14	2,6	2,52
Титан ВТ1-00	ГЦП	522	11	14	1,1	7,2
Титан ВТ-5	ГЦП	663	32	50	0,9	9,13

ку, але зворотню кореляцію цих двох параметрів.

Оскільки найважливішим параметром для нас є відкольна міцність, а підвищення зсувної деформації негативно впливає на цей параметер, то на діаграмі швидкість зсувної деформації має зворотній порядок, тобто чим менше ця швидкість, тим краще для кінцевої якості матеріялу. Як видно з діаграми, ОЦК-сталь 30ХН4М набагато перевершує за сукупними характеристиками ГЦК-сталь 12Х18Н10Т. У ГЦК-сталі швидкість зсувної деформації більше, ніж в ОЦК, хоча швидкість зсуву в поздовжньому і поперечному перерізі менша. В обох сталях були виявлені двійники, які підвищують відкольну міцність. Але при цьому відкольна міцність у сталі 30ХН4М більше практично в 2 рази. Цілком можливо, що це зумовлено підвищеною зсувною деформаці-

єю в сталі 12Х18Н10Т, яка, крім двійників, зумовлює появу в сталі смуг ковзання та скидання.

Площі, утворені параметрами для металу, — міді, — є схожими, практично ідентичними. Тільки в міді МО більше швидкість зсувної деформації (а отже менше покажчик) і трохи менше відкольна міцність, хоча швидкість навантаження для даної міді дещо більша. Крім того, в міді МО спостерігається поява двійників, яких немає в міді з меншою кількістю домішок М2. Для титану також вельми значною є відмінність параметрів. Титановий стоп ВТ5 в сукупності набагато перевершує технічно чистий титан і є порівнюваним зі сталлю 30ХН4М. Крім того, для титану спостерігаються максимальні значення відкольної міцності та мінімальні значення швидкості зсуву. Підвищена відкольна міцність титану підтверджується наявністю великої кількості двійників в структурі металу. Для раціонального вибору матеріалу з кращими якостями доцільно проводити аналіз з точки зору цінового аспекту. Для цього можна побудувати ранжувальний ряд для даних металів. Розрахунки представлено в табл. 13 і 14.

Виходячи з проведеного розрахунку, за принципом «найбільша сума балів і найменша ціна 100 балів» можна скласти наступний ранжувальний ряд для металів: 30ХН4М, титан ВТ-5, сталь 12Х18Н10Т, мідь МО, титан ВТ1-00, мідь М2.

За сумою балів очевидна перевага сталі 30ХН4М і титану ВТ-5, що підтверджується побудованим «павутинням якості» для металів (рис. 18). Сума балів для титану трохи вища, ніж у сталі, а ціна для нього в 2,7 рази більша. При цьому у сталі 30ХН4М ціна взагалі мінімальна з усіх запропонованих варіантів. Отже, оптимальними даними з точки зору опору ударному навантаженню володіє сталь 30ХН4М.

## 6. ВИСНОВКИ

В ході експериментального дослідження було доведено, що ударні навантаження характеризують матеріал з точки зору динамічних властивостей (тобто характеристик руйнування), які є ключовими та домінуючими в умовах високошвидкісних навантажень. В результаті дослідження категорій якості поліметилметакрилату (ПММК) розроблено таблицю ґрадацій якості, яка свідчить про те, що на показники якості ПММК впливає розмір діаметра наповнювача, так як при зменшенні діаметра наповнювача від 50 до 20–35 мкм показник якості перейшов із зони «погано» в зону «добре», а при подальшому зменшенні діаметра частинок наповнювача до значень, менших 20 мкм, показник якості перейшов із зони «добре» в зону «відмінно».

Метода оцінювання показників якості матеріалів, що дослі-

**ТАБЛИЦЯ 13.** Перелік показчиків, за якими випробовувалися метали та стопи.**TABLE 13.** List of indicators, on which metals and alloys were tested.

Метал	Швидкість навантаження $V$ , м/с	Поперечна швидкість зсуву $V_T$ , м/с	Повздовжня швидкість зсуву $V_L$ , м/с	Швидкість зсувної деформації $\dot{\gamma} \cdot 10^{-6}$ , с <sup>-1</sup>	Відкільна міцність $\sigma$ , МПа	Ціна, тис. грн.
30ХН4М	351	64	36	2,6	9,12	150
12Х18Н10Т	368	21	7	4,3	5,02	174
Мідь М2	153	14	14	1,4	2,6	253
Мідь М3	205	26	14	2,6	2,52	280
Титан ВТ1-00	522	11	14	1,1	7,2	1800
Титан ВТ-5	663	32	50	0,9	9,13	1350

**ТАБЛИЦЯ 14.** Ранжувальний ряд металів і стопів за результатами випробувань.**TABLE 14.** Ranked series of metals and alloys according to test results.

Метал	$V$ , м/с	$V_T$ , м/с	$V_L$ , м/с	$\dot{\gamma} \cdot 10^{-6}$ , с <sup>-1</sup>	$\sigma$ , МПа	Сума балів	Ціна 100 балів
30ХН4М	100	100	100	100	100	500	30
12Х18Н10Т	105	33	19	165	55	377	46
Мідь М2	44	33	39	54	29	188	135
Мідь М3	58	56	39	100	28	281	100
Титан ВТ1-00	149	17	39	42	79	326	552
Титан ВТ-5	189	50	139	35	100	513	263

джуються, шляхом побудови «павутиння якості» показує, що ця метода комплексного оцінювання є більш точною в порівнянні з методою оцінювання якості тільки по окремих показниках. Так, при оцінюванні металів з пам'яттю форми було визначено, що за його допомогою можна виявити додаткову інформацію щодо підвищення механічних властивостей матеріалу, який випробується. Наприклад, при випробуванні нітінолу виявлено, що зразок № 2, маючи середні значення за площею п'ятикутника є найкращим за якістю, тому що матеріал зразка № 2 має найбільшу відкільну міцність.

Позитивні риси методики «павутиння якості» полягають у тому, що вона уможлиблює при дослідженнях змінювати в

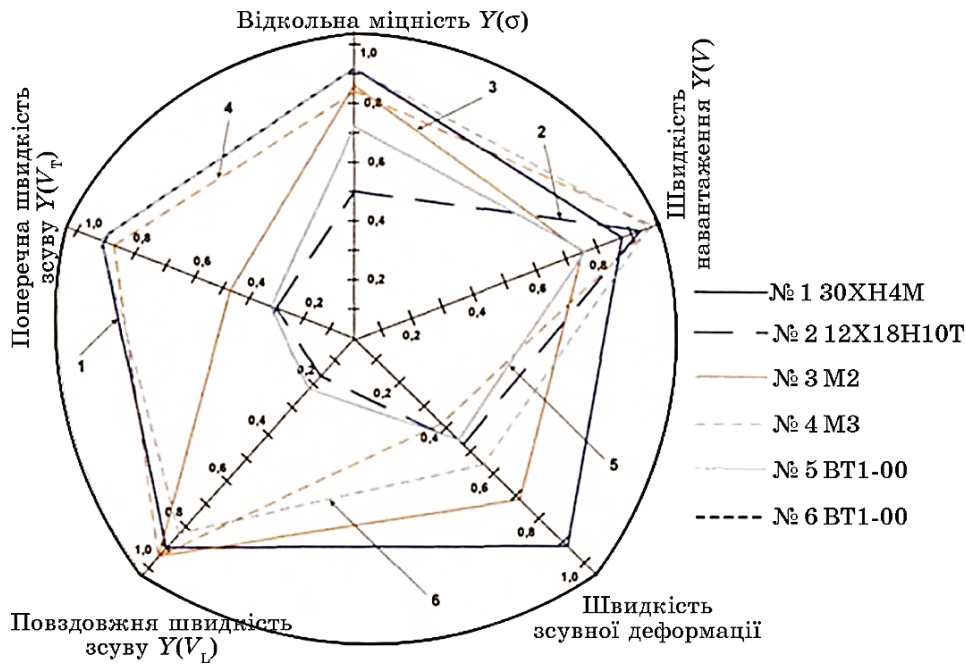


Рис. 18. «Павутиння якості» для металів.

Fig. 18. 'Quality web' for metals.

п'ятикутнику, одні показники на інші, для того щоб виявити дійсну причину підвищення якісних показників того ж зразка № 2 (рис. 8). Наприклад, щоб визначити причину підвищення позитивної якості зразка № 2 нітінолу, що випробовується, необхідно додатково залучити до складу п'ятьох показників «павутиння якості» (або додати до них) деякі технологічні параметри виготовлення зразка № 2, наприклад, співвідношення хемічних елементів у складі стопу, або процес з певної технології термооброблення (загартування, зміцнення тощо).

Перспективи подальшого застосування метод кваліметрії в процесі оцінювання рівня якості високонавантажених матеріалів вбачаємо в розробці автоматизованого програмного забезпечення, яке здатне буде розраховувати рівень якості зразків із стопів і металів на основі порівняння й обрахування базових та експериментальних динамічних параметрів матеріалів, котрі використовуються в умовах високошвидкісних впливів. Такий програмний продукт буде корисним для підприємств і виробничих об'єднань, які займаються розробкою та виготовленням засобів бронезахисту, індивідуального захисту, елементів космічної техніки та медичної техніки.

**ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА**

1. В. В. Куриляк, Г. І. Хімічева, *Успехи физ. мет.*, **17**, № 4: 375 (2016).
2. А. И. Химичева, В. В. Курьяляк, *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, **5**, № 1(77): 70 (2015).
3. В. В. Куриляк, *Технологический аудит и резервы производства*, № 4(3): 53 (2016).
4. В. В. Куриляк, Г. І. Хімічева, *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми механічного приводу*, № 35: 80 (2015).
5. Н. О. Машта, *Вісник Львівської комерційної академії*, № 12: 44 (2011).
6. Т. З. Бубела, Т. Г. Бойко, Є. В. Походько, П. Г. Столярчук, *Методи та прилади контролю якості*, **1**, № 18: 79 (2007).
7. Е. А. Горбашко, *Управление качеством* (Санкт-Петербург: Издательство Юрайт: 2017).
8. В. В. Куриляк, Г. І. Хімічева, *Успехи физ. мет.*, **18**, № 2: 155 (2017).

**REFERENCES**

1. V. V. Kurylyak and G. I. Khimicheva, *Usp. Fiz. Met.*, **17**, No. 4: 375 (2016) (in Ukrainian).
2. A. I. Himicheva and V. V. Kuryliak, *Vostochno-Evropeyskiy Zhurnal Peredovoykh Tekhnologiy*, **5**, No. 1(77): 70 (2015) (in Ukrainian).
3. V. V. Kuryliak, *Tekhnologicheskyy Audit i Rezervy Proizvodstva*, No. 4(3): 53 (2016) (in Ukrainian).
4. V. V. Kuryliak and A. I. Himicheva, *Visnyk Natsional'noho Tekhnichnoho Universytetu 'KhPI'. Seriya: Problemy Mekhanichnoho Pryvodu*, No. 35: 80 (2015) (in Ukrainian).
5. N. O. Mashta, *Visnyk L'vivs'koyi Komertsynoyi Akademiyi*, No. 12: 44 (2011) (in Ukrainian).
6. T. Z. Bubela, T. H. Boyko, Ye. V. Pokhod'ko, and P. H. Stolyarchuk, *Metody ta Prylady Kontrolyu Yakosti*, **1**, No. 18: 79 (2007) (in Ukrainian).
7. E. A. Gorbashko, *Upravlenie Kachestvom* [Quality Control] (Sankt-Petersburg: Izdatel'stvo Yurayt: 2017) (in Russian).
8. V. V. Kurylyak and G. I. Khimicheva, *Usp. Fiz. Met.*, **18**, No. 2: 155 (2017) (in Ukrainian).