

**STATISTICAL REASONING FOR THE APPLICATION
OF QUALIMETRY METHODS TO SPEED-LOAD MATERIALS**

**СТАТИСТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ КВАЛІМЕТРІЇ
ДО ШВИДКІСНО-НАВАНТАЖЕНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Kurilyak Valentina¹

Himicheva Anna²

DOI: http://dx.doi.org/10.30525/978-9934-571-26-8_11

Abstract. The work is statistically substantiated by the use of methods of qualimetry for assessing the quality of materials in conditions of high-speed loads. The results of theoretical and statistical researches concerning estimation of quality level of speed-loaded metal materials with the help of methods of qualimetry are given. It is established that in order to increase the reliability of their evaluation, it is necessary to propose acceptable qualitative characteristics of metal materials, which, in the case of quality evaluation in conditions of high-speed loads, are represented by dynamic parameters. The following material parameters are defined such as: loading speed, longitudinal and transverse shear rates, along with the deformation rate and the strength of the slit, are critical in assessing the quality level of loaded materials, since they are least varied in the area of loading of metal materials. The mathematical calculation of statistical data presented in the form of dynamic characteristics of loaded materials is proposed. It is established that the mean square deviation of statistical data is within the limits of the permissible variation coefficient. It is shown that increasing the reliability of the assessment of the quality of materials is permissible due to some adaptation of the methods of qualimetry due to the specific conditions in which the studied list of metal materials works.

¹ Postgraduate Student of the Department of Computer-Integrated Technologies and Measuring Instruments,
Kyiv National University of Technology and Design, Ukraine

² Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies and Measuring Instruments,
Kyiv National University of Technology and Design, Ukraine

1. Вступ

В області дослідження якості матеріалів використовуються різні методи кваліметрії в залежності 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 оцінка якості матеріалу ґрунтується на знаннях експертів, які мають великий досвід в дослідженні матеріалів в умовах високошвидкісного навантаження. Тому поряд з експертним методом, в області навантажених матеріалів необхідно впровадження додаткових автоматизованих методів кваліметрії за допомогою яких стане можливим підвищення оцінювання рівня якості металевих матеріалів, оскільки експертний метод вимагає істотних ресурсних витрат, і в ряді випадків характеризується неузгодженістю думок експертів, саме це обумовлює **актуальність** даного дослідження. Також в дослідженні **вперше** статистично обґрунтовано кваліметричний інструмент по оцінюванню рівня якості металевих матеріалів, який на відміну від експертного, підвищує достовірність оцінювання за рахунок зменшення впливу суб'єктивного фактору на процес оцінювання. Виходячи із наукової новизни, **метою** роботи є статистична перевірка експериментальних значень, які є базовою основою для застосування методів кваліметрії для оцінювання рівня якості швидкісно-навантажених матеріалів. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні **завдання**: 1. Проаналізувати процеси, які відбуваються в металах при динамічних навантаженнях; 2. Запропонувати алгоритм застосування методів кваліметрії до швидкісно-навантажених матеріалів; 3. Статично обґрунтувати можливість застосування методів кваліметрії та виконати перевірку закону розподілу експериментальних величин за допомогою критерія Пірсона. В даній роботі використовувались теорія та методи кваліметрії на базі яких було обґрунтовано можливість їх застосування до оцінювання рівня якості навантажених матеріалів. Методи експертного оцінювання, які наряду із статистичними дозволили підвищити достовірність оцінювання якості металевих матеріалів. Методи математичної теорії та статистики, методи планування експерименту в процесі експериментального визначення динамічних характеристик матеріалів.

2. Аналіз процесів, які відбуваються в швидко-навантажених металах

Ударні навантаження матеріалів в першу чергу характеризуються процесом двійникування, яке в свою чергу є важливою характеристикою деформації металів з об'ємно-центрованою кубічною (ОЦК) та гексагональною щільно упакованою решітками (ГЦУ). В той час, як при деформації металів з гранецентрованою кубічною (ГЦК) решіткою цей процес не має великого значення, оскільки механізм двійникування діє тоді, коли його критична напруга є меншою ніж критична напруга ковзання. Прогресивна тенденція до двійникування зростає зі зменшенням енергії дефектів упаковок решітки.

Механізм двійникування по своїй природі споріднений із ковзанням, але має деякі обмеженнями. На рис. 1. представлений процес двійникування. У вихідній решітці, що має характерну відстань між сусідніми атомами d , по площині ковзання aa (площина двійникування) здійснюється зрушення вправо на вектор s в кожному шарі кристалу, так що в n -му шарі зрушення дорівнює ns . Це призводить до дзеркального відображення верхньої частини кристалу щодо нижньої, а в макроскопічному відношенні до зміни форми кристалу (Хімічева і Куриляк, 2015).

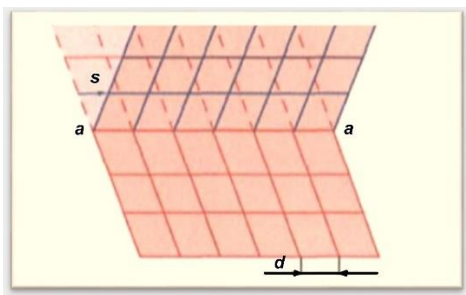


Рис. 1. Схема реалізації двійникування

Будь-який метод високошвидкісної деформації створює рівень напружень у зразку вищий, ніж в умовах квазістатичного деформування. Це дає можливість досягнути стартової напруги двійникування і збільшує роль механізму двійникування при ударному навантаженні. Метали, що не двійникуються при кімнатній температурі, здатні до

двійникування при ударному навантаженні. Двійникування підвищує міцність матеріалів, оскільки двійники утворюються в хвилях стиснення, а не розтягування. Легкість двійникування визначається декількома факторами (Куриляк, 2016):

1) Тиском (так в нікелі двійникування виникає при тисках вище 35 ГПа) (Хімічева і Куриляк, 2016);

2) Кристалографічною орієнтацією. Двійникування здійснюється при досягненні результуючими зсувними напруженнями порогового значення в площині двійникування і вздовж напрямку двійникування (мідь, нікель);

3) Енергією дефектів упаковки (зменшення енергій призводить до збільшення кількості двійників);

4) Тривалістю імпульсу (кількість двійників збільшується при збільшенні тривалості імпульсу до 2 мкс);

5) Субструктура (зсувні напруження можуть релаксувати в вигляді двійникуванням, якщо дислокації відсутні, або ковзанням вже наявних в матеріалі дислокацій, якщо матеріал попередньо деформований);

6) Розміром зерна (в крупнозернистих зразках молібденова деформація двійникуванням здійснюється легше, ніж в зразках з дрібним зерном) (Куриляк і Хімічева, 2016).

Зниження температури або збільшення швидкості деформації сприяє розвитку двійникування і придушення ковзання. В ОЦК металах (перлитної сталі, наприклад) (Куриляк і Хімічева, 2017) двійники утворюються при низькому тиску, і їх щільність збільшується зі зростанням тиску, при цьому підвищуються міцність металу.

З ГЦУ металів двійники можна спостерігати у титані та титанових сплавах. Кількість площин двійникування у титані більше, ніж в інших ГЦУ металах. Мартенситні перетворення відносяться до фазових перетворень з спотворенням кристалічної решітки. Термін «мартенситне» перетворення зберігається для перетворень, що відбуваються з такими спотвореннями кристалічної решітки, при яких домінують девіаторні компоненти напруг. Таким чином, лише перетворення ГЦК в ОЦК і ГЦК в ГЦУ в сплавах на основі заліза і перетворення ОЦК решітки в щільно упаковані в благородних металах (сплавах з пам'яттю форми) можуть бути строго названі мартенситними (Куриляк, 2017).

На термодинаміку фазових перетворень здійснюють різний вплив тиск ударної хвилі, зсувні напруження і температура. Так фазові пере-

творення, що відбувається зі зменшенням обсягу (щільність нової фази більше, ніж вихідної), тому термодинамічно віддається перевага високому тиску, так як цей аспект призводить до зменшення тиску в тій області, де він відбувається. Разом з тим, фазовому перетворенню, що відбувається зі зменшенням щільності та підвищенням тиску не сприяє мартенситне перетворення, котре можна розглядати як механізм деформації, конкуруючий з ковзанням і двійникуванням, а зовні прикладена напруга має збільшувати температуру початку мартенситного перетворення. Зсувні напруги в ударній хвилі повинні полегшити утворення мартенситу (Куриляк, 2016).

Смуги адіабатичного зсуву є типовим механізмом, крім ковзання і двійникування, для високошвидкісного деформування. Зростання температури, що супроводжує пластичну деформацію, в умовах обмеженого відведення тепла може вносити вклад в загальний пластичний перебіг, а саме в ідеї дестабілізуючого деформаційного розміщення. Супутнє зазначеним процесам явище локалізації деформації, відоме під назвою «адіабатичне зрушення» рис. 2., котре грає важливу роль при динамічній пластичній деформації (Куриляк, 2016). Під час поширення пластична деформація сильно локалізується в області смуги зсуву, приводячи до істотного підвищення температури. Вона може досягати і навіть перевищувати температуру плавлення.

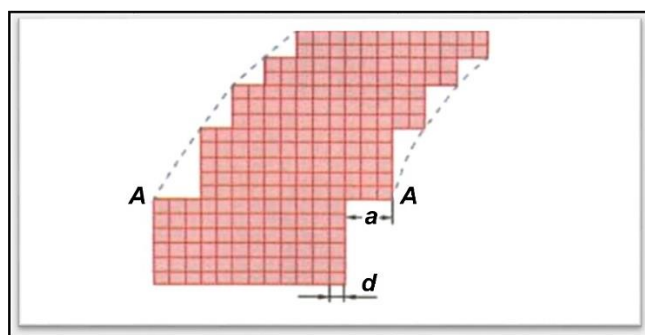


Рис. 2. Схема реалізації пластичного зсуву

При пластичному зсуві елементарний осередок не спотворюється, зміщуючись як ціле, а значить і симетрія кристала не змінюється. Схематично процес пластичного зсуву представлений на рисунку 2, де за

однією з площин ковзання AA стався зсув на величину a . Він дорівнює міжatomній відстані d , і може бути більшим (Куриляк, 2017).

Отже, ударні навантаження в першу чергу характеризуються динамічними характеристиками матеріалів, котрі виникають у випадку взаємодії конструкції з тілами (елементами конструкцій) та в момент контакту мають ненульову швидкість (зокрема, при падінні тіл на конструкцію). Це призводить до того, що швидкість елементів конструкцій на протязі малого проміжку часу змінюється від максимальної до нульової. Високошвидкісна взаємодія співударних елементів призводить до виникнення значних сил інерції, котрі спричинені великими прискореннями та сповільненнями в моменти співударяння.

3. Оцінювання рівня якості металевих матеріалів за допомогою методів кваліметрії

Для обґрунтування вибору методів кваліметрії, які можливо застосувати в області високошвидкісних впливів був складений спеціальний алгоритм, який зображає покрокове виконання того як вірно визначитися до якого саме матеріалу необхідно застосовувати апробовані (в рамках швидкісних навантажень) методи кваліметрії. Підбір методів кваліметрії для оцінювання рівня якості високонавантажених матеріалів зображено за допомогою алгоритму на рис. 3.

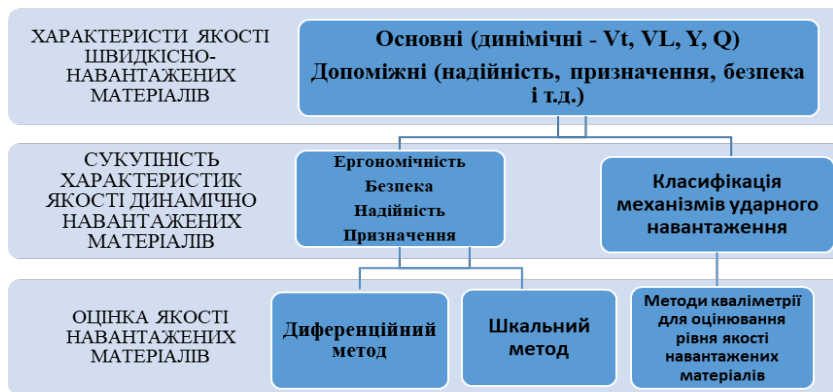


Рис. 3. Алгоритм вибору методів кваліметрії для оцінювання рівня якості навантажених матеріалів

Statistical reasoning for the application of qualimetry methods to...

Відповідно до даного алгоритму, і на основі проведеного аналізу питань оцінювання рівня якості металевих матеріалів і різних об'єктів, а також аналізу поведінки матеріалів в умовах ударного навантаження зроблено висновок про те, що в подібному випадку основними і визначальними характеристиками якості є динамічні характеристики. На основі цих характеристик необхідно побудувати систему показників якості навантажених матеріалів. На основі аналізу прикладів практичного застосування різних методів кваліметрії, в тому числі для оцінювання рівня якості металів, визначено перелік використовуваних в роботі кількісно-комплексних методів.

До обраних методів належить: «павутиння якості», метод секторних діаграм, функція бажаності та кореляційний аналіз. Застосування «павутиння якості» для оцінювання рівня якості зразків матеріалів здійснюється шляхом зіставлення характеристик окремих властивостей оцінюваного зразку з відповідними базовими показниками. При цьому визначають, чи досягнуто відповідність якості оцінюваного зразку, і які показники властивостей оцінюваного зразку перевершують або не відповідають показникам базового зразку, а також, наскільки відрізняються один від одного аналогічні показники властивостей.

Для визначення рівня якості динамічно-навантажених матеріалів необхідно визначити, за допомогою довідкової літератури, базові характеристики металевих матеріалів. Використані в роботі еталонні показники досліджуваних металів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Базові характеристики металевих матеріалів

№	Назва металевого зразку	Швидкість навантаження	Поперечна швидкість зсуву	Поздовжня швидкість зсуву	Швидкість зсувної деформації	Відкольна міцність
1	Сталь	400 м/с	70 м/с	40 м/с	$2,0 * 10^6 \text{ c}^{-1}$	10 МПа
2	Мідь	210 м/с	30 м/с	15 м/с	$1,0 * 10^6 \text{ c}^{-1}$	3 МПа
3	Титан	700 м/с	35 м/с	60 м/с	$1,0 * 10^6 \text{ c}^{-1}$	10 МПа
4	Алюміній	300 м/с	30 м/с	20 м/с	$1,0 * 10^6 \text{ c}^{-1}$	5 МПа

Для нікелід титану базовими характеристиками стали товщина зразку – 1,5 мм. (Значення мінімальне, тому що товщина мішені-зразку повинна прагнути до мінімуму); товщина ударника – 2 мм; швидкість

ударника – 700 м/с; відкольна швидкість – 300 м/с; відкольна міцність – 10 ГПа.

Розробка кваліметричних принципів при оцінці рівня якості високонавантажених матеріалів включала в себе їх адаптацію для обраних зразків матеріалів, а саме пристосування кваліметричних методів до оцінювання рівня якості динамічно-навантажених матеріалів. Тому визначення рівня якості зразків за допомогою «павутиння якості» відбувається наступним чином: відповідно до кількості оцінюваних показників (характеристик) якості в різні боки, подібно павутині, відкладається n-на кількість кваліметричних шкал у відповідному масштабі рис. 4.

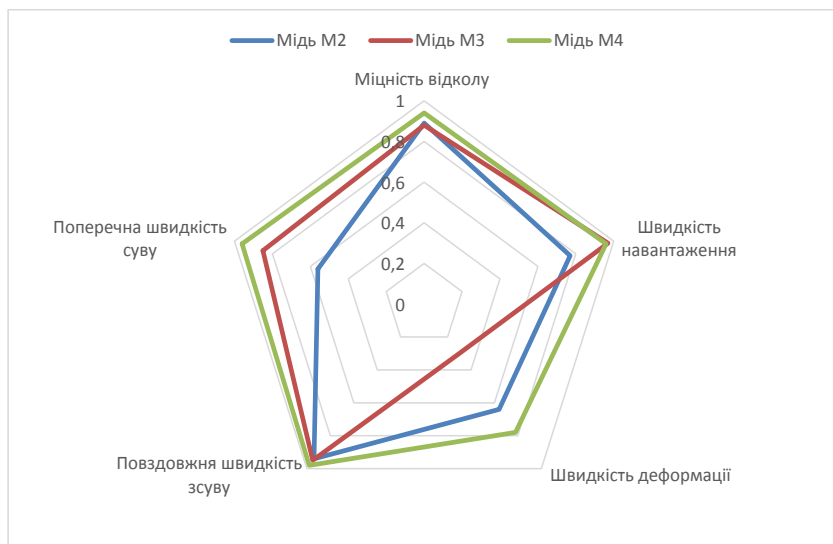


Рис. 4. Приклад застосування павутиння якості до навантажених матеріалів

На шкалах, відкладається кожне значення показників властивостей, після чого точки з'єднуються між собою і отримують число багатокутників, згідно кількості оцінюваних зразків. Площа, яку займає кожним многокутником, відповідає якості конкретного зразку і дозволяє порівняти його із іншими.

4. Статистичне обґрунтування застосування методів кваліметрії до оцінювання рівня якості навантажених матеріалів

Розмір вибірки становить 200 вимірювань для кожного виду зразку при однаковій швидкості навантаження. Тобто в результаті одного випробування ми отримуємо по одному значенню кожної із динамічних характеристик. Випробування відбувалися з приблизно однаковою частотою, а значення динамічних характеристик металевих матеріалів варіювалися в певному діапазоні, а саме в тому якому відповідала швидкість навантаження та реакція кожного виду металу на ударник.

Для статистичного обрахування було обрано металевий зразок із сталі 30ХН4М та обраховані його експериментальні значення по чотирьом критеріям, таким як: поздовжня швидкість зсуву V_L ; поперечна швидкість зсуву V_t ; швидкість зсувної деформації γ ; відкольна міцність σ .

В нижче приведеній таблиці відображені значення вимірювань та кількість вимірювань в яких зафіксовано певне значення. X_i – випадкова величина, розмірність м/с; n_i – кількість вимірювань в яких зафіксовано значення X .

Таблиця 2

Значення експериментальних вимірювань

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X_i	60	61	62	63	64	65	66	67	68
n_i	15	28	20	28	17	19	26	26	21

Гіпотетично на основі значень експериментальних вимірювань зроблено висновок про те, що вибірка підпорядковується рівномірному закону розподілу, який представлений на рис. 5.

Під час експерименту були виміряні чотири динамічні характеристики матеріалів. В табл. 3. представлений перелік випадкових величин для динамічного параметру сталі 30ХН4М по характеристикам V_t , V_L , γ , σ .

В таблиці № 4 обраховані значення вимірювань та їх імовірності, де X_i – випадкова величина, а P – ймовірність випадання випадкової величини, яка визначається за формулою:

$$P = n/N \quad (1)$$

В нашому випадку генеральна сукупність величин дорівнює $N = 200$.

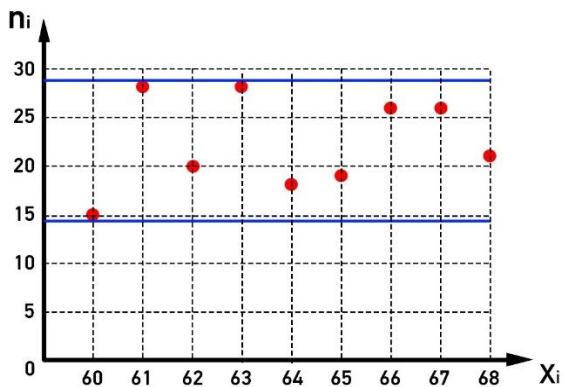


Рис. 5. Рівномірна щільність розподілу вибірки

Таблиця 3

Значення експериментальних вимірювань

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$X_i (V_t)$ м/с	60	61	62	63	64	65	66	67	68
n_i	15	28	20	28	17	19	26	26	21
$X_i (V_L)$ м/с	32	33	34	35	36	37	38	39	40
n_i	25	29	24	16	17	26	18	25	20
$X_i (\gamma) \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$	2,4	2,45	2,5	2,55	2,6	2,65	2,7	2,75	2,77
n_i	22	24	21	22	29	24	28	26	30
σ , МПА	8,9	8,95	9,0	9,05	9,1	9,15	9,2	9,3	9,25
n_i	20	21	30	24	31	22	25	27	19

Таблиця 4

Значення вимірювань та їх ймовірності для V_t, V_L, γ, σ

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$X_i (V_t)$	60	61	62	63	64	65	66	67	68
P_i	0,075	0,14	0,1	0,14	0,085	0,095	0,13	0,13	0,105
$X_i (V_L)$	32	33	34	35	36	37	38	39	40
P_i	0,125	0,145	0,12	0,08	0,085	0,13	0,09	0,125	0,1
$X_i (\gamma)$	2,4	2,45	2,5	2,55	2,6	2,65	2,7	2,75	2,8
P_i	0,11	0,12	0,105	0,11	0,145	0,12	0,14	0,15	0,16
$X_i (\sigma)$	8,9	8,95	9,0	9,05	9,1	9,15	9,2	9,25	9,30
P_i	0,1	0,105	0,15	0,12	0,155	0,11	0,125	0,135	0,140

Statistical reasoning for the application of qualimetry methods to...

На основі розрахованих даних зроблено пропущення, що отримані значення розподілені згідно з законом рівномірної щільності. Для перевірки гіпотези про рівномірну щільність розподілу виконаємо наступні розрахунки (табл. 5-8).

Таблиця 5

Рахунок показників V_t

x_i	Частота, f_i	$x_i * f_i$	Накопичена частота, S	$ x - x_{cp} * f_i$	$(x - x_{cp})^2 * f_i$
60	0.075	4.5	0.075	0.308	1.264
61	0.14	8.54	0.215	0.435	1.35
62	0.1	6.2	0.315	0.211	0.443
63	0.14	8.82	0.455	0.155	0.171
64	0.085	5.44	0.54	0.00893	0.000937
65	0.095	6.175	0.635	0.085	0.0761
66	0.13	8.58	0.765	0.246	0.467
67	0.13	8.71	0.895	0.376	1.09
68	0.105	7.14	1	0.409	1.593
Всього	1	64.105		2.233	6.454

Таблиця 6

Розрахунок показників V_L

x_i	Частота, f_i	$x_i * f_i$	Накопичена частота, S	$ x - x_{cp} * f_i$	$(x - x_{cp})^2 * f_i$
32	0.125	4	0.125	0.479	1.834
33	0.145	4.785	0.27	0.41	1.161
34	0.12	4.08	0.39	0.22	0.402
35	0.08	2.8	0.47	0.0664	0.0551
36	0.085	3.06	0.555	0.0145	0.00246
37	0.13	4.81	0.685	0.152	0.178
38	0.09	3.42	0.775	0.195	0.424
39	0.125	4.875	0.9	0.396	1.256
40	0.1	4	1	0.417	1.739
Всього	1	35.83		2.35	7.051

Для оцінювання ряду розподілу знайдемо наступні показники: показник центру розподілу. Середньо-зважена (вибіркова середня величина).

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i * f_i}{\sum f_i} \quad (2)$$

Таблиця 7

Розрахунок показників γ

x_i	Частота, f_i	$x_i * f_i$	Накопичена частота, S	$ x - x_{cp} * f_i$	$(x - x_{cp})^2 * f_i$
2.4	0.11	0.264	0.11	0.0205	0.00383
2.45	0.12	0.294	0.23	0.0164	0.00224
2.5	0.105	0.263	0.335	0.00908	0.000786
2.55	0.11	0.281	0.445	0.00402	0.000147
2.6	0.145	0.377	0.59	0.00196	2.60E-05
2.65	0.12	0.318	0.71	0.00762	0.000484
2.7	0.14	0.378	0.85	0.0159	0.0018
2.75	0.15	0.413	1	0.0245	0.00401
Всього	1	2.587		0.1	0.0133

Таблиця 8

Розрахунок показників σ

x_i	Частота, f_i	$x_i * f_i$	Накопичена частота, S	$ x - x_{cp} * f_i$	$(x - x_{cp})^2 * f_i$
8.9	0.1	0.89	0.1	0.0182	0.00329
8.95	0.105	0.94	0.205	0.0138	0.00182
9	0.15	1.35	0.355	0.0122	0.000996
9.05	0.12	1.086	0.475	0.00378	0.000119
9.1	0.155	1.411	0.63	0.00287	5.30E-05
9.15	0.11	1.007	0.74	0.00754	0.000516
9.2	0.125	1.15	0.865	0.0148	0.00176
9.25	0.135	1.249	1	0.0227	0.00383
Всього	1	9.082		0.0959	0.0124

Показники варіації. Розмах варіації – різниця між максимальним і мінімальним значеннями ознаки первинного ряду.

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (3)$$

Середнє лінійне відхилення – обчислюють для того, щоб врахувати відмінності всіх одиниць досліджуваної сукупності.

$$d = \frac{\sum |x_i - \bar{x}| * f_i}{\sum f_i} \quad (4)$$

Дисперсія – характеризує міру розкиду близько її середнього значення (міра розсіювання, тобто відхилення від середнього).

$$D = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 * f_i}{\sum f_i} \quad (5)$$

Середнє квадратичне відхилення.

$$\sigma = \sqrt{D} \quad (6)$$

Таблиця 9

Розрахунок показника центру розподілу та показників варіації

№	V _t	V _L	γ	Σ
\bar{x}	64.11	35.83	2.59	9.08
R	8	8	0.35	0.35
d	2.23	2.35	0.1	0.0959
D	6.454	7.051	0.0133	0.0124
σ	2.54	2.655	0.115	0.111

Показники форми розподілу, а саме ступінь асиметрії, оскільки симетричним є розподіл, в якому частоти будь-яких двох варіантів, рівнорозподілених в обидві сторони від центру розподілу, рівні між собою. Найбільш точним і поширеним показником асиметрії є моментний коефіцієнт асиметрії.

$$A_s = \frac{M_3}{\sigma^3} \quad (7)$$

Де, M_3 – центральний момент третього порядку. Σ – Середньоквадратичне відхилення. Оцінка показника асиметрії дається за допомогою середньоквадратичної помилки коефіцієнта асиметрії:

$$S_{A_s} = \sqrt{\frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}} \quad (8)$$

Якщо виконується співвідношення $|A_s|/s_{A_s} < 3$, то асиметрія незначна, її наявність пояснюється впливом різних випадкових обставин. Якщо має місце співвідношення $|A_s|/s_{A_s} > 3$, то асиметрія значна і розподіл ознаки в генеральній сукупності не є симетричним.

Застосовуються також структурні показники (коефіцієнти) асиметрії, що характеризують асиметрію тільки в центральній частині розподілу, тобто основної маси одиниць, і не залежать від крайніх значень ознаки. Розрахуємо структурний коефіцієнт асиметрії Пірсона:

$$A_{sp} = \frac{\bar{x} - M_o}{\sigma} \quad (9)$$

Для симетричних розподілів розраховується показник ексцесу (гостровершинності). Найчастіше ексцес оцінюється за допомогою показника:

$$E_x = \frac{M_4}{s^4} - 3 \quad (10)$$

Для розподілів гостро вершинності (втягнутих), показник ексцесу – позитивний ($E_x > 0$), для більш плосковершинних (сплюснених) – негативний ($E_x < 0$).

Таблиця 10

Розрахунок центральних моментів M_3 та M_4 для V_t

X_i	$(x - \text{хср})^3 \cdot f_i$	$(x - \text{хср})^4 \cdot f_i$
60	-5.19	21.3
61	-4.19	13.01
62	-0.93	1.96
63	-0.19	0.21
64	-9.80E-05	1.00E-05
65	0.068	0.061
66	0.88	1.68
67	3.15	9.13
68	6.2	24.17
Всього	-0.19	71.52

Таблиця 11

Розрахунок центральних моментів M_3 та M_4 для V_L

X_i	$(x - \text{хср})^3 \cdot f_i$	$(x - \text{хср})^4 \cdot f_i$
32	-7.02	26.9
33	-3.29	9.3
34	-0.74	1.35
35	-0.046	0.038
36	0.000418	7.10E-05
37	0.21	0.24
38	0.92	2
39	3.98	12.62
40	7.25	30.24
Всього	1.27	82.68

Таблиця 12

Розрахунок центральних моментів M_3 та M_4 для γ

X_i	$(x - \text{хср})^3 \cdot f_i$	$(x - \text{хср})^4 \cdot f_i$
2.4	-0.000714	0.000133
2.45	-0.000305	4.20E-05
2.5	-6.80E-05	6.00E-06
2.55	-5.00E-06	0
2.6	0	0
2.65	3.10E-05	2.00E-06
2.7	0.000205	2.30E-05
2.75	0.000656	0.000107
Всього	-0.000201	0.000313

Таблиця 13

Розрахунок центральних моментів M_3 та M_4 для σ

X_i	$(x - \text{хср})^3 \cdot f_i$	$(x - \text{хср})^4 \cdot f_i$
8.9	-0.000598	0.000109
8.95	-0.000239	3.10E-05
9	-8.10E-05	7.00E-06
9.05	-4.00E-06	0
9.1	1.00E-06	0
9.15	3.50E-05	2.00E-06
9.2	0.000208	2.50E-05
9.25	0.000646	0.000109
Всього	-3.10E-05	0.000283

Таблиця 14

Розрахунок показників форми розподілу

X_i	Vt	VL	γ	σ
AS	0.0115	0.0679	-0.13	0
S_{A_s}	0.592	0.592	0.603	0.603
Asp	25.23	1.07	-1.42	-0.17
Ex	-1.28	-1.34	-1.23	-1.16

Для того щоб перевірити гіпотезу про рівномірний розподіл X , тобто. за законом: $f(x) = 1 / (b-a)$ в інтервалі (a, b) , треба:

1. Оцінити параметри a і b – кінці інтервалу, в якому спостерігалися можливі значення X , за формулами (через знак * позначені оцінки параметрів):

$$a^* = \bar{x} - \sqrt{3}\sigma \quad (11)$$

$$b^* = \bar{x} + \sqrt{3}\sigma \quad (12)$$

2. Знайти щільність ймовірності передбачуваного розподілу

$$f_{(x)} = 1 / (b^* - a^*) \quad (13)$$

3. Знайти теоретичні частоти:

$$n_1 = n^* \frac{1}{((b^* - a^*) * (x_1 - a^*))} \quad (14)$$

$$n_2 = n_3 = n_{s-1} = n^* \frac{1}{((b^* - a^*) * (x_i - x_{i-1}))} \quad (15)$$

$$n_i = n^* \frac{1}{((b^* - a^*) * (b^* - x_{s-1}))} \quad (16)$$

4. Порівняти емпіричні і теоретичні частоти за допомогою критерію Пірсона, прийнявши число ступенів свободи $k = s-3$, де s – число первинних інтервалів вибірки; якщо ж було вироблено об'єднання малочисельних частот, отже, і самих інтервалів, то s – число інтервалів, що залишилися після об'єднання.

Таблиця 15

Значення щодо: a^* , b^* , $f(x)$

X_i	V_i	V_L	γ	σ
a^*	59.7	31.23	2.39	8.89
b^*	68.51	40.43	2.79	9.27
$f(x)$	0.114	0.109	2.501	2.594

Визначимо границю критичної області, оскільки статистика Пірсона вимірює різницю між емпіричним і теоретичним розподілами, то чим більше її значення Кнабл, тим сильніше аргумент проти основної гіпотези. Тому критична область для цієї статистики завжди правобічна: $[K_{кр}; +\infty)$. Її границя $K_{кр} = \chi^2(k-r-1; \alpha)$ знаходимо за таблицями розподілу χ^2 і заданим значенням s , k (число інтервалів), $r = 2$ (параметри a і b).

Для всіх розрахунків вимірювань динамічних характеристик спостережувані значення статистики Пірсона не потрапляють в критичну область: $K_{набл} < K_{кр}$, тому немає підстав відкидати основну гіпотезу.

Таблиця 16

Розрахунок теоретичних частот для V_t

№	n_i	n_{*i}	$n_i - n_{*i}$	$(n_i - n_{*i})^2$	$(n_i - n_{*i})^2/n_{*i}$
1	0.075	0.03355	0.04145	0.00172	0.05123
2	0.14	0.1136	0.02637	0.000695	0.00612
3	0.1	0.1136	-0.01363	0.000186	0.00164
4	0.14	0.1136	0.02637	0.000695	0.00612
5	0.085	0.1136	-0.02863	0.00082	0.00721
6	0.095	0.1136	-0.01863	0.000347	0.00305
7	0.13	0.1136	0.01637	0.000268	0.00236
8	0.13	0.1136	0.01637	0.000268	0.00236
9	0.105	0.05741	0.04759	0.00226	0.03945
Всього	1				0.1195

Таблиця 17

Розрахунок теоретичних частот для V_L

№	n_i	n_{*i}	$n_i - n_{*i}$	$(n_i - n_{*i})^2$	$(n_i - n_{*i})^2/n_{*i}$
1	0.125	0.08363	0.04137	0.00171	0.02047
2	0.145	0.1087	0.03629	0.00132	0.01211
3	0.12	0.1087	0.01129	0.000127	0.00117
4	0.08	0.1087	-0.02871	0.000824	0.00758
5	0.085	0.1087	-0.02371	0.000562	0.00517
6	0.13	0.1087	0.02129	0.000453	0.00417
7	0.09	0.1087	-0.01871	0.00035	0.00322
8	0.125	0.1087	0.01629	0.000265	0.00244
9	0.1	0.04667	0.05333	0.00284	0.06095
Всього	1				0.1173

Отже, справедливе припущення про те, що дані вибірки мають рівномірний закон розподілу.

На графіку (рис. 6) показана залежність значень випадкових величин від їхніх ймовірностей (частот).

Полігон емпіричних частот і ймовірність для рівномірного закону розподілу для V_t . На графіку показано порівняння графіків емпіричних частот з теоретичними частотами згідно з законом рівномірного розподілу для V_t згідно з таблицями n – графік експериментальних частот. n^* – графік теоретичних частот. Значення вимірювань та їх ймовірності для V_t представлені на рис. 7.

Таблиця 18

Розрахунок теоретичних частот для γ

№	n_i	n_{*i}	$n_i - n_{*i}$	$(n_i - n_{*i})^2$	$(n_i - n_{*i})^2/n_{*i}$
1	0.11	0.03348	0.07652	0.00586	0.1749
2	0.12	0.1251	-0.00507	2.60E-05	0.000206
3	0.105	0.1251	-0.02007	0.000403	0.00322
4	0.11	0.1251	-0.01507	0.000227	0.00182
5	0.145	0.1251	0.01993	0.000397	0.00317
6	0.12	0.1251	-0.00507	2.60E-05	0.000206
7	0.14	0.1251	0.01493	0.000223	0.00178
8	0.15	0.09101	0.05899	0.00348	0.03824
Всього	1				0.2236

Таблиця 19

Розрахунок теоретичних частот для σ

№	n_i	n_{*i}	$n_i - n_{*i}$	$(n_i - n_{*i})^2$	$(n_i - n_{*i})^2/n_{*i}$
1	0.1	0.02915	0.07085	0.00502	0.1722
2	0.105	0.1297	-0.02471	0.000611	0.00471
3	0.15	0.1297	0.02029	0.000412	0.00317
4	0.12	0.1297	-0.00971	9.40E-05	0.000727
5	0.155	0.1297	0.02529	0.00064	0.00493
6	0.11	0.1297	-0.01971	0.000388	0.00299
7	0.125	0.1297	-0.00471	2.20E-05	0.000171
8	0.135	0.06288	0.07212	0.0052	0.08272
Всього	1				0.2716

Таблиця 20

Границі критичних областей
для емпіричного і теоретичного розподілу

X_i	V_t	V_L	γ	σ
$K_{кр}$	12.59159	12.59159	11.07050	11.07050
$K_{спост}$	0.1195	0.1173	0.22	0.27

Полігон емпіричних частот для V_L . На цьому графіку показана залежність значень випадкових величин від їхніх імовірностей (частот).

Полігон емпіричних частот і ймовірність для рівномірного закону розподілу для V_L . На цьому графіку показано порівняння графіків

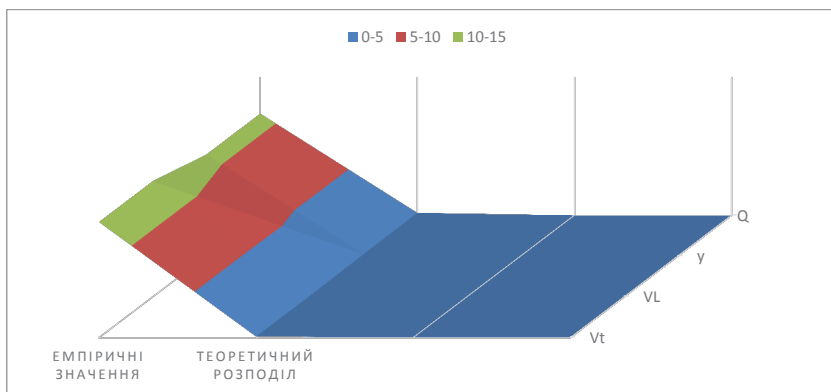


Рис. 6. Границі критичних областей для емпіричного і теоретичного розподілу

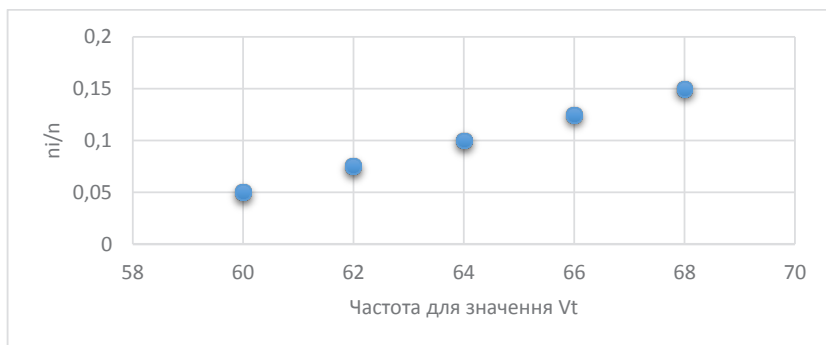
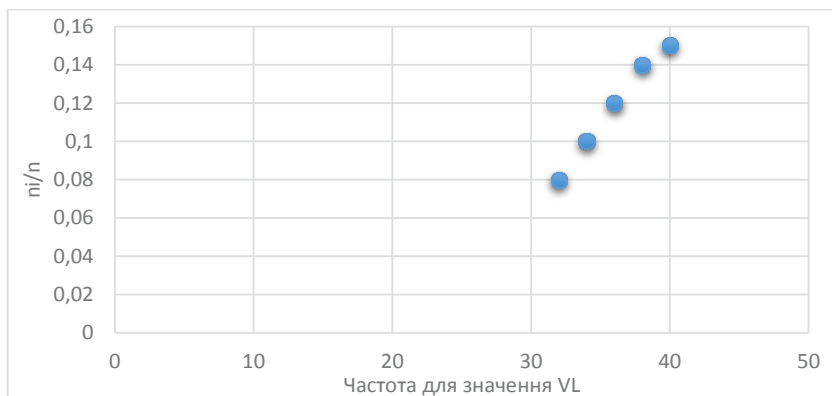
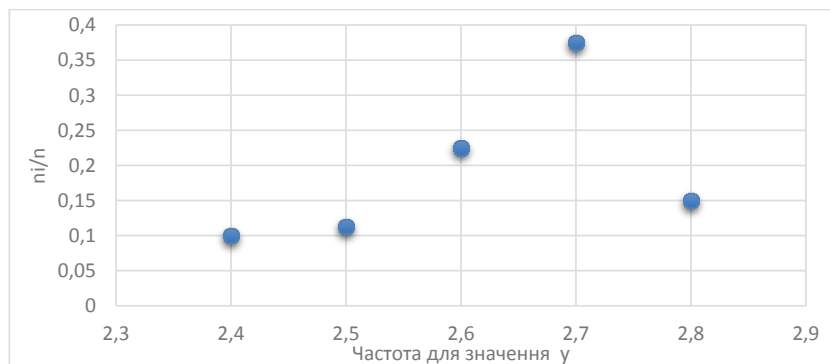


Рис. 7.1. Полігон емпіричних частот для V_t

емпіричних частот з теоретичними частотами згідно з законом рівномірного розподілу для V_L .

Полігон емпіричних частот для γ . Значення вимірювань та їх ймовірності для γ . На цьому графіку показана залежність значень випадкових величин від їхніх імовірностей (частот).

Полігон емпіричних частот і ймовірність для рівномірного закону розподілу для γ . На цьому графіку показано порівняння графіків емпіричних частот з теоретичними частотами згідно з законом рів-

Рисунок 7.2. Полігон емпіричних частот для V_L Рис. 8. Полігон емпіричних частот для γ

номірного розподілу для γ . Значення вимірювань та їх ймовірності для γ , n – графік експериментальних частот, n^* – графік теоретичних частот.

Полігон емпіричних частот і ймовірність для рівномірного закону розподілу для σ . На цьому графіку показано порівняння графіків емпіричних частот з теоретичними частотами згідно з законом рівномірного розподілу для σ згідно з таблицями. Таблиця розрахунку теоретичних частот для σ , n – графік експериментальних частот, n^* – графік теоретичних частот (рис. 10).

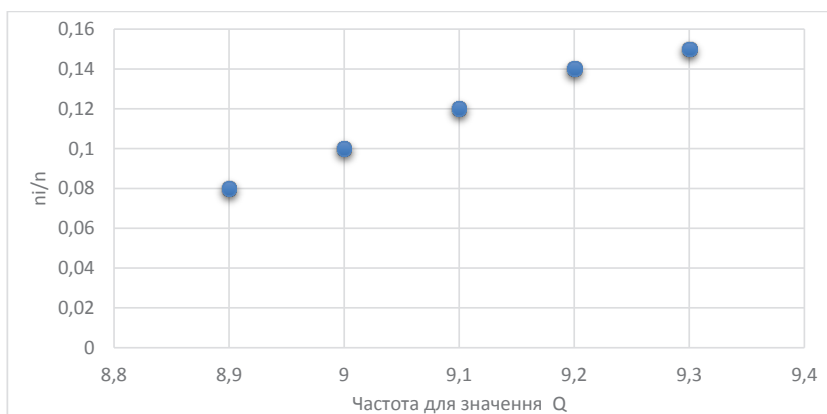


Рис. 9. Полігон емпіричних частот для σ

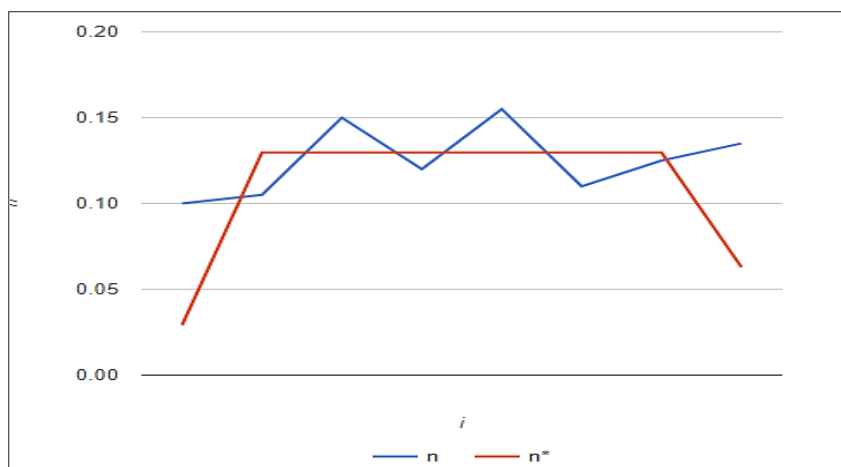


Рис. 10. Порівняння теоретичних і експериментальних частот

Отже, згідно із рисунком 10 гіпотетичний закон щодо рівномірно розподілення експериментальних величин відповідає теоретичній перевірці, котра була виконана за допомогою критерію Пірсона. Тому можна зробити висновок про те, що застосування методів кваліметрії для оцінювання рівня якості динамічно-навантажених матеріалів допустиме в якості допоміжного інструменту до існуючого експертного підходу.

5. Висновки

В ході проведення оцінювання рівня якості металевих матеріалів в умовах високошвидкісного навантаження було враховано специфічність досліджень, оскільки характеристиками якості в даному випадку будуть параметри, котрі пов'язані з ударним навантаженням. При цьому визначальною характеристикою якості для ударно-навантажених матеріалів була встановлена відкольна міцність матеріалу.

На основі виконаного аналізу сучасного досвіду застосування комплексно-кількісних методів зроблений вибір найбільш прийнятних методів оцінювання рівня якості матеріалів в умовах високошвидкісного навантаження. Як показує представлений аналіз матеріалів – це вирішує проблему оцінки якості імпульсно навантажених матеріалів і створює альтернативний механізм оцінки якості навантажених матеріалів, поряд з експертним методом.

Крім того обрані методи кваліметрії найбільшою мірою підходять для використання в умовах експериментального випробування, є наочними і легко відтворюваними. При наявності рекомендацій щодо застосування обраних методів, які можуть бути легко впроваджені на виробництві або в навчальному процесі.

Список літератури:

1. Хімичева Г.І. Обґрунтування можливості застосування кваліметричного підходу, щодо оцінки якості матеріалів, що знаходяться в умовах високошвидкісного навантаження / Г.І. Хімичева, В.В. Куриляк // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – 2015. – № 62. – С. 40-45.
2. Куриляк В.В. Оцінка якості металів та сплавів в умовах високошвидкісного навантаження / В.В. Куриляк // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2016. – № 30. – С. 53-56.
3. Хімичева Г.І. Аналіз поведінки параметрів інтелектуальних матеріалів та полімерів в умовах високошвидкісного навантаження / Г.І. Хімичева, В. В. Куриляк // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – 2016. – № 25. – С. 125-131.
4. Куриляк В.В. Обґрунтування застосування комплексно-кількісних методів для оцінки якості матеріалів в умовах високошвидкісного навантаження / В.В. Куриляк, Г.І. Хімичева // Успехи фізики металлов. – 2016. – № 17. – С. 343-367.
5. Куриляк В.В. Застосування кваліметричних методів для оцінки якості ударно-навантажених матеріалів / В.В. Куриляк, Г.І. Хімичева. // Успехи фізики металлов. – 2017. – № 2. – С. 155-175.

6. Куриляк В.В. Програма «AQM» для оцінки рівня якості високонавантажених матеріалів / В.В. Куриляк. // Технічне регулювання, метрологія та інформаційні технології. – 2017. – № 7. – С. 136-140.

7. Куриляк В.В. Оцінка якості матеріалів в умовах високошвидкісного навантаження / В.В. Куриляк // Мехатроніка, комп'ютерні системи, метрологія та інноваційні технології в машинобудуванні. Ресурсозбереження та охорона навколишнього середовища: Тези доповідей. – Київ, 2016. – С. 137.

8. Куриляк В.В. Динамические характеристики и критерии качества нагруженных материалов / В.В. Куриляк // Экономика, технологии и право в современном мире: Материалы Международной научно-практической конференции факультета экономики и права инженерного факультета. – Барановичи, 2016. – С. 100-102.

9. Куриляк В.В. Експериментальне дослідження якісних характеристик поліметилметакрилатового матеріалу / В.В. Куриляк // Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. – Київ, 2017. – 228-229.

References:

1. Himicheva G.I., Kuryliak V.V. (2015) Obruntuvannya mozhlivosti zastosuvannya kvalimetricnogo pidhodu, shchodo ocinki yakosti materialiv, shcho znahodyat'sya v umovah visokoshvidkisnogo navantazhennya. *Visnik nacional'nogo tekhnichnogo universitetu*, no. 62, pp. 40–45.

2. Kurilyak V.V. (2016) Ocinka yakosti metaliv ta splaviv v umovah visokoshvidkisnogo navantazhennya. *Tekhnologichnij audit ta rezervi virobnictva*, no. 30, pp. 53–56.

3. Himicheva G.I., Kuryliak V.V. Analiz povedinki parametriv intelektual'nih materialiv ta polimeriv v umovah visokoshvidkisnogo navantazhennya. *Visnik nacional'nogo tekhnichnogo universitetu "HPI"*, no. 25, pp. 125–131.

4. Kurilyak V.V., Himicheva G.I. Obruntuvannya zastosuvannya kompleksno-kil'kisnih metodiv dlya ocinki yakosti materialiv v umovah visokoshvidkisnogo navantazhennya. *Uspekhi fiziki metallov*, no. 17, pp. 343–367.

5. Kurilyak V. V., Himicheva G.I. Zastosuvannya kvalimetricnih metodiv dlya ocinki yakosti udarno-navantazhenih materialiv. *Uspekhi fiziki metallov*, no. 2, pp. 155-175.

6. Kurilyak V. V. (2017) Programma "AQM" dlya ocinki rivnya yakosti visokonavantazhenih materialiv ["AQM" to assess the quality level of high-load materials]. *Tekhnichne reguluvannya, metrologiya ta informacijni tekhnologii*. (Ukraina, Odesa, 22 kvitnya 2017 r.), Odesa, pp. S. 136-140.

7. Kurilyak V.V. (2016) Ocinka yakosti materialiv v umovah visokoshvidkisnogo navantazhennya [Assessment of materials quality in conditions of high-speed loading]. *Mekhatronika, kom'yuterni sistemi, metrologiya ta innovacijni tekhnologii v mashinobuduvanni*. *Resursozberezhennya ta ohorona navkolishn'ogo seredovishcha: Tezi dopovidej* (Ukrayna, Kiyv, 20 travnya 2016 r.), Kiyv, p. 137.

8. Kurilyak V.V. (2016) Dinamicheskie harakteristiki i kriterii kachestva nagruzhenykh materialov [Dynamic characteristics and quality criteria of loaded materials]. *Ekonomika, tekhnologii i pravo v sovremennom mire: Materialy*

Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii fakul'teta ehkonomiki i prava inzhenernogo fakul'teta (Bilorusiya, Baranovichi, 22 lyutogo 2016 r.), Baranovichi, pp. 100-102.

9. Kurilyak V.V. (2017) Eksperimental'ne doslidzhennya yakisnih karakteristik polimetilmetakrilatovogo materialu [Experimental study of qualitative characteristics of polymethyl methacrylate material]. Mekhatronni sistemi: innovacii ta inzhiniring: Tezi dopovidej Mizhnarodnoy nauvovo-praktichnoy konferenciy (Ukrayna, Kiyv, 20 travnya 2016 r.), Kiyv, pp. 228-229.