

doi: 10.33249/2663-2144-2019-78-5-8-15

УДК 539.4

**ЕКСПРЕС-ОЦІНКА ВІДНОСНОЇ ВАРТОСТІ МЕТАЛІЧНИХ  
КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗАДАНИХ УМОВ  
ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ЗАДАНОГО РЕСУРСУ****І. Г. Грабар, Т. Ю. Дубишевська***e-mail: ivan-grabar@ukr.net*

Житомирський національний агроєкологічний університет

бульвар Старий, 7, м. Житомир, 10008, Україна

*Процес проектування нової машини чи конструкції – це постійна необхідність приймати рішення в умовах невизначеності: від конструкторської ідеї, схеми компоновки – і до вибору матеріалів та комплектації. При цьому, практично залишаються неврахованими показники надійності та вартості, які довго уточнюються на стадії випробувань дослідного зразка та у підконтрольній експлуатації. Це надто дорого і вимагає значного часу. Як можна врахувати дані показники на стадії проектування, скоротивши час і витрати? Крім цього, службово-експлуатаційні характеристики металічного конструкційного матеріалу: хімічний склад, короткочасна, циклічна та тривала міцність, пластичність, тріщиностійкість утворюють багатовимірний вектор, кожна з компонент якого окремо слабо корелює з ринковою ціною сплаву, що напряду не дозволяє оцінити вартість конструкції та не дозволяє априорі ранжувати сплави за комплексною оцінкою вартості в конкретних умовах з заданими параметрами температурно-силового навантаження на заданий ресурс. Вперше така постановка завдання сформована в наших публікаціях, наведених у списку літератури. Дане дослідження є подальшим їх розвитком.*

*Наведена методологія оцінки відносної вартості сучасних металічних конструкційних матеріалів для заданих умов експлуатації (навантаження, температура, ресурс) та властивостей сплаву (наведеного коефіцієнта ціни, температури плавлення, питомої ваги). На основі даних оцінок та запропонованої раніше універсальної узагальненої діаграми професора Грабара вперше вдалося отримати порівняльні оцінки вартості металічних конструкцій для широкого діапазону умов їх експлуатації (напруг, температур та ресурсу), віднесені до одиниці часу експлуатації. Дана методологія дозволяє суттєво зменшення рівня невизначеності, і може бути застосована вже на стадії ескізного проектування машини. Викладений у роботі підхід відкриває гарні перспективи більш глибокого техніко-економічного обґрунтування інженерних рішень ще на стадії ескізного проектування машини. Наведено приклади розрахунку.*

**Ключові слова:** металічні конструкційні матеріали; ресурс конструкцій; універсальна узагальнена діаграма професора Грабара; відносна вартість металів; коефіцієнт ціни; приведений коефіцієнт ціни.

**Постановка проблеми**

Сучасний ринок конструкційних матеріалів – надзвичайно динамічний сегмент взаємодії науки, техніки і бізнесу. Нові композити, ситали, нановолокна, і, звичайно, металічні конструкційні матеріали – в центрі уваги наукових лабораторій та інноваційних підприємств. При цьому, постійно зростають вимоги до умов експлуатації конструкцій: зростають робочі температури, питомі навантаження, зростає продуктивність машин, зростають вимоги до корозійної, радіаційної та зносостійкості. Як правило, виконання цих

вимог задовільняється все складнішими системами легування сплавів. До арсеналу сучасного металознавства залучаються такі легуючі елементи, як хром, кобальт, ванадій, вольфрам, молибден та інші. В деяких випадках для суттєвого підвищення жароміцності, теплостійкості, радіаційної чи корозійної стійкості вміст легуючих елементів досягає 10–20%, а іноді – і більше.

При цьому, взаємодія розробників, виробників та споживачів нових матеріалів відбувається в бізнес-середовищі. У цій складній взаємодії дуже непростим завданням є цінова політика, що

має задовільняти всіх учасників цього процесу. Як формується і від чого залежить ціна на металічні конструкційні матеріали, що мають великий вміст високовартісних легуючих елементів?

Очевидно, на формування цін на метали впливає їх розповсюдження в земній корі (рис.1), енергетичні витрати на видобуток і виплавку, службово-корисні властивості металу, і врешті – попит на ринку.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Службово-експлуатаційні характеристики металічного конструкційного матеріалу, такі як хімічний склад, короткочасна, циклічна та тривала міцність, пластичність, тріщиностійкість [1–3] по-перше, не завжди корелюють з ринковою ціною [4], по-друге, напряду не дозволяють оцінити вартість конструкції, по-третє, не дозволяють апріорі ранжувати сплави за комплексною оцінкою вартості в конкретних умовах з заданими параметрами температурно-силового навантаження на заданий ресурс [8–12]. Вперше така постановка завдання сформована в наших публікаціях [5–7], і дане дослідження є подальшим їх розвитком.

### Мета, завдання та методика досліджень

Розробити методологію та побудувати критерії оцінки відносної вартості металічних конструкційних матеріалів під задані умови температурно-силового навантаження та заданий (проектований) ресурс конструкції, що має врахувати хімічний склад сплаву, його характеристики короткочасної та тривалої міцності, питому вагу, а також приведений коефіцієнт ціни.

На основі розробленої методології та універсальної узагальненої діаграми проф. Грабара запропонувати компактні та зручні для користування інженерні формули для порівняльних техніко-економічних оцінок конкретних конструкційних матеріалів у заданих умовах експлуатації (навантаження, температура, ресурс) на стадії ескізного проектування машини. Розповсюдити отримані результати на інші види завдань, де необхідно виконувати ранжування багатомірних величин.

### Результати досліджень

В табл. 1 наведені коефіцієнти ціни чистих металів, де за одиницю прийнято залізо, вірніше – маловуглецева сталь, оскільки власне чисте залізо має досить складну і вартісну технологію отримання. В таблиці 1 також наведені інші фізичні властивості металів, що впливають на оцінку їх відносної вартості, як буде показано нижче, а також їх позначення в якості легуючих елементів в сталях. Нами запропоновано в якості показника відносної вартості сталей використати приведений коефіцієнт ціни, що визначається за формулою:

$$K_{\Sigma} = (K_{Fe} * C_{Fe} + K_{Mn} * C_{Mn} + K_{Ni} * C_{Ni} + K_{Cr} * C_{Cr} + K_{Co} * C_{Co} + K_{Ti} * C_{Ti} + K_{W} * C_{W} + K_{Mo} * C_{Mo} + K_{V} * C_{V} + K_{Nb} * C_{Nb} + \dots) / 100 = (\sum K_i * C_i) / 100 \quad (1)$$

де  $K_i$  – коефіцієнт ціни чистого металу (таблиця 1),  $C_i$  – вміст у відсотках даного металу в конкретній сталі чи сплаві. В таблиці 2 наведено значення наведеного коефіцієнта ціни 132 сталей різних груп, отриманих нами за даними [1–4].

Таблиця 1. Дані до розрахунку  $K_{ціни}$  прив та Q-критерію

	Метал	Відносна вартість [12]	$T_{пл}, K$	Густина, $Г/см^3$	Вміст у земній корі, % [11]	Позначення в сталях
1	Залізо	1	1808	7,86	4,65	
2	Свинець	2,5	601	11,4		
3	Цинк	3	693	7,14		
4	Алюміній	6	933	2,7	8,8	Ю
5	Сурма	6,5	904	6,62		
6	Мідь	7,5	1356	8,96		Д
7	Магній	8	922	1,74	2,4	
8	Марганець	10	1518	4,43	0,10	Г
9	Нікель	17	1726	8,9		Н

Закінчення таблиці 1

10	Олово	22	505	7,3		
11	Хром	25	2130	7,19		X
12	Кобальт	35	1768	8,9		K
13	Вісмут	50	544	9,8		
14	Ртуть	65	234	13,6		
15	Титан	90	1933	4,51	0,45	T
16	Вольфрам	120	3683	19,3		B
17	Молибден	170	2890	10,2		M
18	Срібло	500	1234	10,5		
19	Ванадій	750	2163	6,1		Φ
20	Ніобій	800	2741	8,4		Б
21	Тантал	1500	2996	16,6		
22	Рубідій	2200	312	1,53		
23	Палладій	5000	1825	12,0		
24	Золото	11000	1337	19,3		
25	Реній	12000	3453	21,0		
26	Іридій	25000	2683	22,5		
27	Осмій	25000	3318	22,6		
28	Платина	27000	2045	21,4		
29	Родій	45000	2239	12,4		

Джерело: власні дослідження.

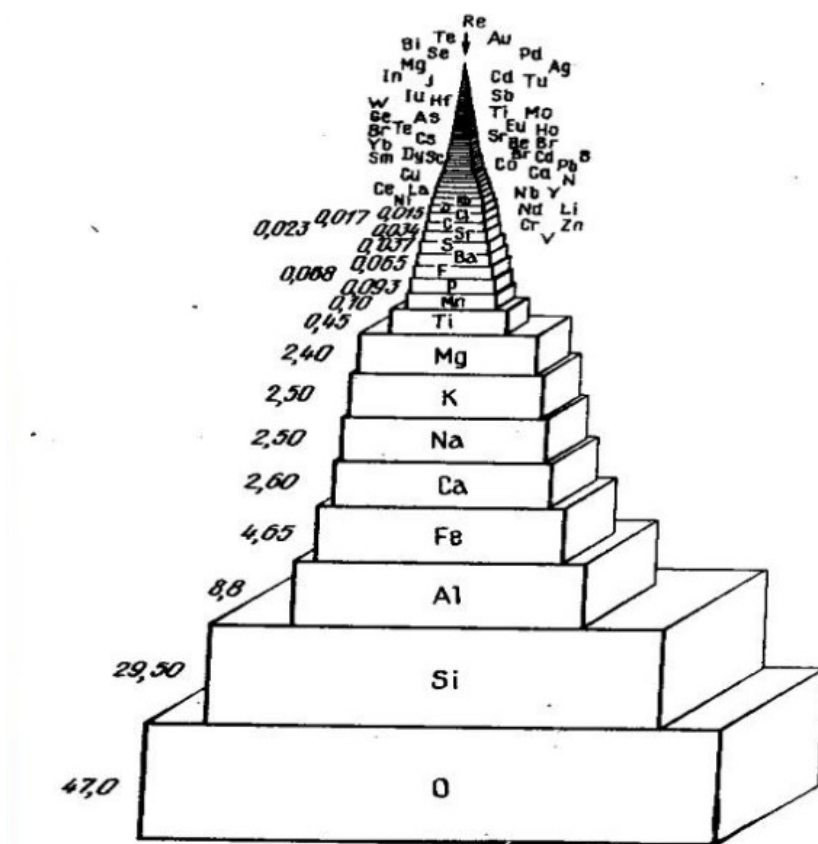


Рис. 1. Розповсюдження елементів у земній корі

Джерело: побудовано на основі <https://studfiles.net/preview/6145540/>.

Варто зазначити, що кілька тисяч років тому залізо цінувалося дорожче золота. А наразі відношення ціни золота до ціни заліза досягло

11000! Так що коефіцієнти ціни металів залежать від часу [11].

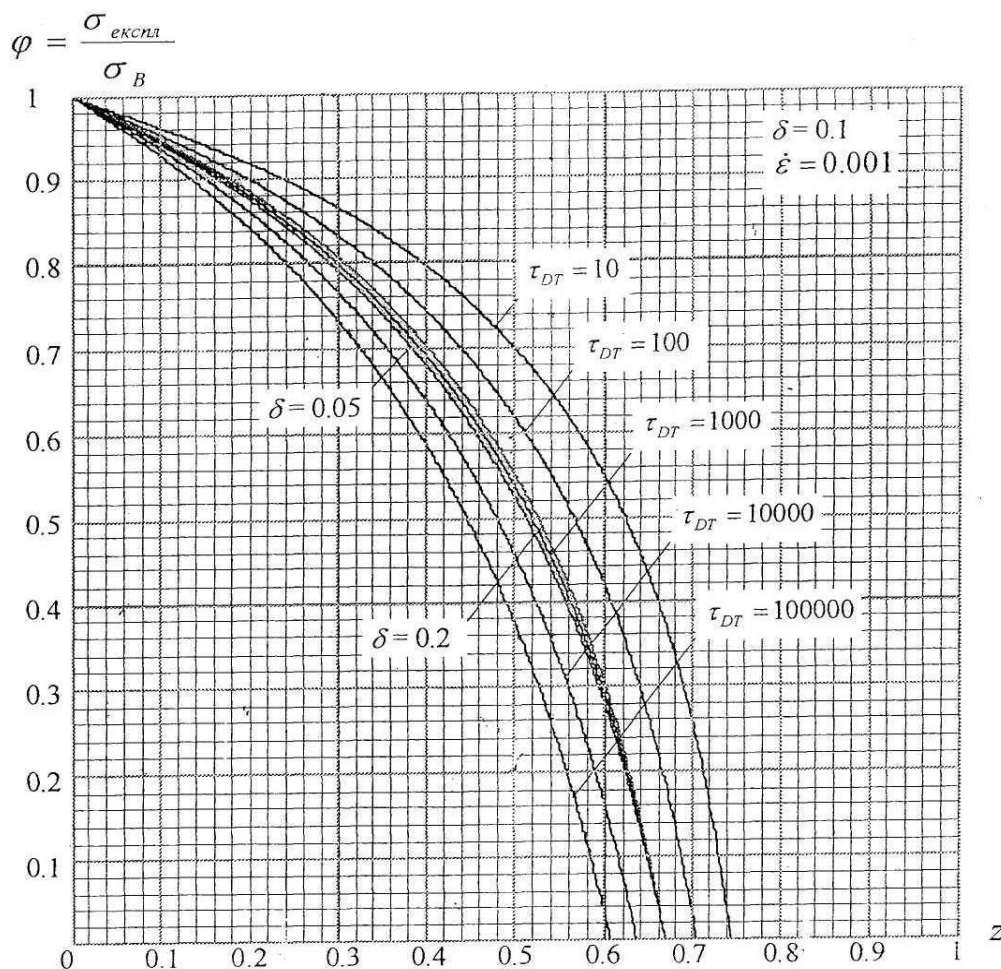


Рис. 2. Універсальна узагальнена діаграма професора Грабара для прискореного призначення ресурсу металічних конструкцій на стадії проектування

Універсальна узагальнена діаграма професора Грабара для прискореного призначення ресурсу металічних конструкцій на стадії проектування, де:  $Z = T_{\text{експл}}/T_s$  – відношення експлуатаційної температури (К) до температури плавлення матеріалу деталі (К);

$\tau_{DT}$  – ресурс (годин);  $\delta$  – пластична деформація зразка при короткочасних випробуваннях матеріалу за температури експлуатації (для всіх діаграм прийнято  $\delta = 0,1$ , лише для  $\tau_{DT}=1000$  годин – діаграма побудована для трьох значень:  $\delta=0,05 ; 0,1 ; 0,2$ )[4-7].

Таблиця 2. Рейтинг значень приведенного коефіцієнта ціни 168 легованих сталей

16Г2	1,13	30Х	1,37	38ХГМ	1,71	10Х2М	2,29
20ЮЧ	1,13	35Х	1,37	30ХН3А	1,72	34ХН3М	2,32
13Н5А	1,14	38ХА	1,37	20ХН3А	1,72	14Х2Н3МА	2,33
30ХРА	1,14	35ХГ2	1,37	09СФА	1,72	30ХГСН2МА	2,33
20ЮЧА	1,18	40Х	1,37	12ХН3А	1,72	34ХН3МА	2,36
15Г	1,22	45Х	1,37	15ХФА	1,73	30Х3МА	2,38
25ХГТ	1,22	50Х	1,37	25Х2ГНТА	1,73	40ХФА	2,42
30ХГТ	1,22	20ХГНТР	1,39	06ХФ	1,73	38Х2Н2ВА	2,44

Закінчення таблиці 2

25Г	1,23	37ХН3А	1,4	13ХФА	1,74	14Х2ГМР	2,46
20Г	1,23	20ХГСА	1,41	40ХГНМ	1,75	10Х2ГНМ	2,5
30Г	1,23	25ХГСА	1,41	20ХФА	1,75	40Х2Н2ВА	2,56
35Г	1,23	27ХГР	1,41	15Х2ГН2ТА	1,78	38ХН3ВА	2,56
40Г	1,23	30ХГС	1,41	22ХНМ	1,79	30ХН2ВА	2,58
45Г	1,23	30ХГСА	1,41	38ХМ	1,81	25Х2Н4ВА	2,62
45ХН	1,23	38ХГН	1,41	09ГСФ	1,81	40ХН2ВА	2,69
50Г	1,23	16ХСН	1,42	38ХМА	1,81	30ХН2МФА	2,72
40ХН	1,24	18ХГ	1,42	40ХН2МА	1,84	40ХМФА	2,83
50ХН	1,24	20ХГР	1,42	15Н2М	1,84	20ХН4ФА	2,96
10Г2А	1,25	40ХГТР	1,44	38ХНМ	1,84	38Х2НМФ	2,97
12Г2	1,25	13Н2ХА	1,45	20Н2М	1,85	20ХН3МФА	2,98
20Г2	1,25	33ХС	1,46	34ХМ	1,85	30Х2НВА	2,99
32Г2	1,26	38ХС	1,46	50ХНМ	1,87	45ХН2МФА	3,04
10Г2	1,27	08ГДНФ	1,47	40ГР	1,88	30Х3ВА	3,06
23Г2Д	1,27	08ХМЧА	1,48	30ХН2МА	1,91	05Г4МНФ	3,3
32Г2С	1,27	14ХГН	1,48	15ХМФА	1,95	36Х2Н2МФА	3,31
37Г2С	1,27	20ФА	1,49	35Г2Ф	1,96	40Х2Г2М	3,45
35ХГН2	1,28	35ХГСА	1,49	20Х2Н4А	1,97	21Х2НВФА	3,47
38ГСТ	1,28	40ХС	1,49	12Х2Н4А	1,97	23Х2НВФА	3,47
12ХН	1,3	12ХН2А	1,5	12ХН2МДФ	1,97	12Х2НВФА	3,47
30Г2	1,3	12ХН2	1,52	25Х2Н4МА	2,02	35ХН1М2ФА	3,66
35Г2	1,3	20ХНР	1,52	35Г2ФА	2,04	40Х3Г2МФ	3,87
36Г2С	1,3	20ХГНР	1,53	18Х2Н4МА	2,07	12Х2НМФА	4,14
36Г2СР	1,3	38Х2Ю	1,53	34ХН1М	2,09	19Х2НМФА	4,15
40Г2	1,3	16ХГТА	1,54	40Х2Н2МА	2,09	21Х2НМФА	4,15
45Г2	1,3	20Ф	1,55	38Х2Н2МА	2,09	23Х2НМФА	4,15
50Г2	1,3	15ХГН2ТА	1,62	38Х2НМ	2,11	20Х14	4,55
06Х1	1,32	38ХГНМ	1,64	38ХВ	2,16	30Х2НВФА	4,71
15Х	1,33	32Г2М	1,65	30ХГСНМА	2,17	12Х2НМ1ФА	4,99
15ХА	1,33	19ХГН	1,65	38ХН3МА	2,21	12Х2НВФМА	5,73
47ГТ	1,33	15ХГНМ	1,67	38Г2МФ	2,23	50Х6ФМС	8,3
20Х	1,34	20ХГНМ	1,67	20ХФ	2,26	08ХМФЧА	8,76
28ХГ2ТР	1,35	20ХМ	1,69	40ХН2СМА	2,28	30Х3МФ	13,49

Джерело: власні дослідження.

Наголошуємо, що отримані коефіцієнти ціни враховують лише хімічний склад сталі чи сплаву і можуть лише сприяти формуванню ринкової ціни на сталь чи сплав, виходячи з відносної вартості її легуючих елементів. На рис. 3

показано динаміку світових цін (\$/тонну) на листовий прокат протягом одного року, звідки видно суттєві зміни – в межах 10–15 %. Але ще більші коливання ціни відбуваються на ринку благородних металів.

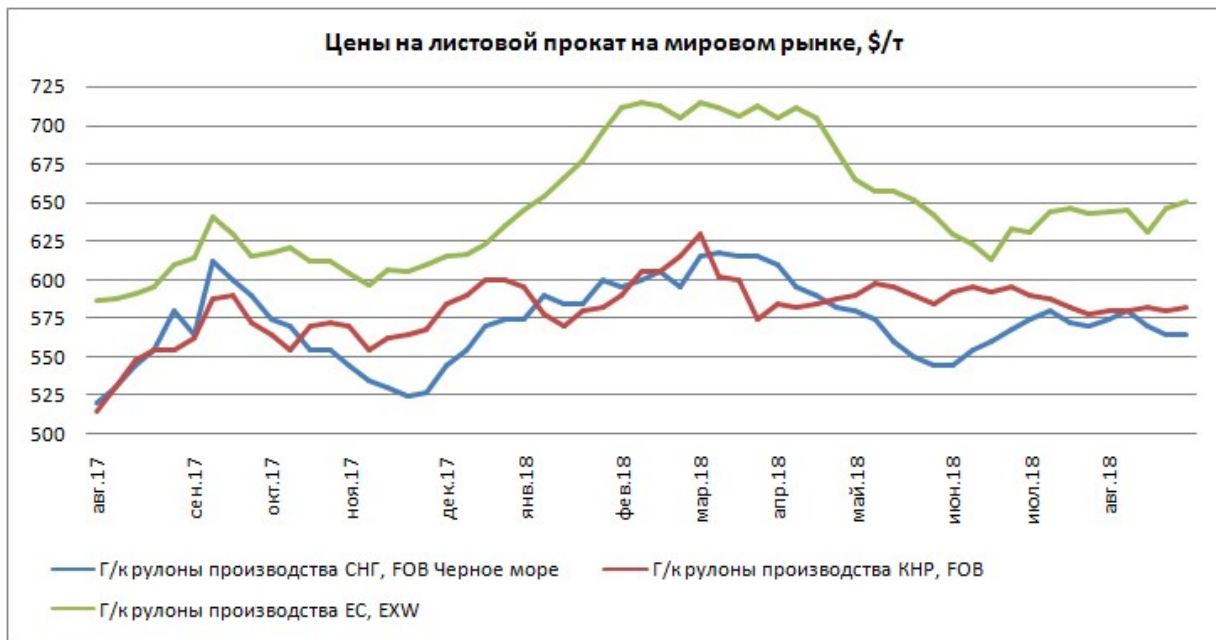


Рис. 3. Світові ціни на листовий прокат за серпень 2017 р. – серпень 2018 р.  
Джерело: [8-12].

Таблиця 3. Приклад розрахунку приведенного коефіцієнта ціни сталей

Сталь	Mn	Ni	Cr	Cu	Fe	$\Sigma K_i * C_i$	Кц
Кці	10	17	25	7,5	1		
10	0,5	0,3	0,15	0,3	98,75	114,85	1,15
20	0,5	0,3	0,25	0,3	98,65	115,25	1,17
45	0,7	0,3	0,26	0,3	98,45	119,05	1,19
40X	0,7	0,3	1	0,3	97,7	137,03	1,37
30XГСН2А	1,2	1,5	1	0,3	96,0	160,75	1,61

Джерело: власні дослідження.

Q-критерій приведених витрат на експлуатацію в заданих умовах (ресурс 100000 годин за заданої температури і навантаженні):

$$\bar{Q} = \frac{K_u * \rho}{\sigma_s * \varphi(Z)}$$

де Кц – наведений коефіцієнт ціни,  $\rho$  – питома вага сплаву,  $\sigma_B$  – границя міцності сплаву за температури експлуатації,  $\varphi(Z)$  відношення експлуатаційних напруг до границі міцності за температури експлуатації

Таблиця 4. Ранжування сталей за Q – критерієм

Сталь	$\sigma_B$ , МПа при температурі С:				Кц	Q-критерій при температурі С:			
	20°	200°	400°	500°		20°	200°	400°	500°
10	430	495	380	260	1,15	24,60	23,67	37,83	72,21
20	480	440	360	220	1,17	22,41	27,10	40,63	86,82
45	640	700	575	385	1,19	17,10	17,32	25,86	50,46
40X	950	900	700	500	1,37	13,26	15,51	24,46	44,73
30XГСН2А	1600	1600	1500	1150	1,61	9,25	10,25	13,41	22,86

Джерело: власні дослідження.

Як слідує з таблиці 4, високолегована сталь 30ХГСН2А в розрахунку на ресурс 100000 годин має (2,6...3,8) – кратну перевагу по приведеному Q-критерію над всіма іншими сталями таблиці 3 у всьому діапазоні температур (20–500 °С), незважаючи на відносно високе значення даної сталі  $K_{ц30ХГСН2А}=1,61$ . До того ж дана сталь має кращу корозійну стійкість. Із таблиці 4 є можливість оцінити вартість експлуатації даних сталей за конкретної температури. Так, за 500°С вартість експлуатації всіх сталей у 2,5...3,9 разів вища, ніж при 20°С. Таку оцінку в загальній постановці вдалося отримати вперше в світі.

На жаль, Q-критерій не враховує ринкові

коливання цін на світовому ринку. Як слідує з 7ало ..5, за 2018–19 рр. світові ціни лише на 7ало вуглецеву сталь були стабільні – 325 \$/т, тоді як ціни на алюміній змінювались від \$2290/т до \$1845/т (в 1,24 рази), на нікель з \$15110 до \$10836/т (в 1,4 рази), кобальт з \$91/кг до \$32,4/кг (в 2,81 рази!). Ціна на срібло змінювалася в 1,16 раза, на золото – в 1,11 раза.

В той же час, Q-критерій дозволяє отримати відносну вартість машини чи споруди та допомогти інженеру обрати конструкційний матеріал для заданого ресурсу та умов експлуатації (за мінімальним значенням Q-критерію).

Таблиця 5. Порівняння світових цін на метали за 2018-19 рр.

	Al	Cu	Ni	Сталь	Co	Ag	Au
	\$/т	\$/т	\$/т	\$/т	\$/кг	\$/унц	\$/унц
квіт.18	2246.40	6838.55	13934.50	325.00	91.00	16.61	1334.74
трав.18	2290.55	6821.76	14356.43	325.00	90.26	16.47	1303.03
черв.18	2240.29	6954.79	15110.95	325.00	81.87	16.52	1281.57
июл.18	2240.29	6954.79	15110.95	325.00	81.36	15.71	1238.53
серп.18	2045.50	6039.75	13432.95	325.00	63.46	15.01	1201.25
верес.18	2023.00	6020.03	12527.25	325.00	62.53	14.26	1198.47
жовт.18	2034.17	6215.89	12327.17	325.00	59.11	14.59	1215.39
лист.18	1937.75	6193.00	11253.41	325.00	53.26	14.37	1220.95
груд.18	1931.45	6094.21	10836.84	325.00	55.29	14.70	1247.92
січ.19	1845.89	5932.02	11454.55	325.00	39.34	15.59	1291.75
лют.19	1859.55	6278.20	12649.75	325.00	32.40	15.81	1320.07

Джерело: побудовано за даними: <http://www.cmmarket.ru/markets/beworld.htm>

### Висновки та перспективи подальших досліджень

Розроблено методологію оцінки відносної вартості металічних конструкційних матеріалів для широкого діапазону експлуатаційних температур та ресурсу на основі узагальненого Q-критерію. Показано, що на значення Q-

критерію впливає приведений коефіцієнт ціни, густина сплаву, границя міцності за температури експлуатації, та параметр  $\varphi(Z)$  – відношення експлуатаційних напруг до границі міцності за температури експлуатації. Запропонована методологія значення  $\varphi(Z)$  з узагальненої діаграми професора Грабара.

У подальших дослідженнях варто зосередити увагу на поширенні отриманих результатів на неметалічні конструкційні матеріали: композити, ситали, нановолоконні матеріали тощо.

### References

1. Zhuravlov, V. N. & Nikolaeva, O. I. (1981). Mashinostroitelnye stali: Spravochnik [Engineering steel.]. Moskva: Mashinostroenie [in Russia].
2. Grigorev, I. G. (Ed.). (1991). Fizicheskie velichiny: Spravochnik [Physical quantities]. Moskva: Energoizdat [in Russia].
3. Arzamasov, B. N. (Ed.). (1990). Konstrukcionnye materialy: Spravochnik [Construction materials]. Moskva: Mashinostroenie [in Russia].
4. Splav-kharkov.com (2019). Marochnyk staly y splavov [Marker steel and alloys]. Retrieved from <http://www.splav-kharkov.com/main.php> [in Russia].
5. Hrabar, I. H. (2002). Termoaktyvatsiyni analiz i synerhetyky ruinuвання [Thermoactive analysis of synergetic and synergy]. Zhytomyr: ZhITI [in Ukrainian].
6. Hrabar, I. H. (1998). Osnovy nadiinosti mashyn [Basics of machine reliability]. Zhytomyr: Zhytomyr Engineering and Technological Institute [in Ukrainian].
7. Grabar, I. G. (2018). NANOCHAOS in raising a machine reliability and the creation of "eternal" STRUCTURES. *Chaotic Modeling and Simulation (CMSIM)*, 3, 327–341.
8. Yaruse.ru (2005). Staly y splavy – ynformatsiya [Steel and alloys - information]. Retrieved from <http://yaruse.ru/posts/filter/5> [in Russia].
9. Studfiles.net (2016). Materyalovedenye [Materials Science]. Retrieved from <https://studfiles.net/preview/6145540/> [in Russia].
10. Bstudy.net (2017). Processy kompleksobrazovaniya prirodnoho proishozhdeniya [Complexation processes of natural origin]. Retrieved from [https://bstudy.net/602474/es/testvoznanie/protsessy\\_kompleksoobrazovaniya\\_prirodnoho\\_proishozhdeniya](https://bstudy.net/602474/es/testvoznanie/protsessy_kompleksoobrazovaniya_prirodnoho_proishozhdeniya) [in Russia].
11. Wikipedia (2019). Zemnaya kora [Earth crust]. Retrieved from [https://ru.wikipedia.org/wiki/Земная\\_кора](https://ru.wikipedia.org/wiki/Земная_кора) [in Russia].
12. Kovka-pro.ru (2011). Stoimost metalla [Metal cost]. Retrieved from <http://www.kovka-pro.ru/stoimost-metalla.html> [in Russia].

### EXPRESS EVALUATION OF THE RELATIVE COST OF METAL STRUCTURAL MATERIALS FOR THE SPECIFIED OPERATING CONDITIONS AND THE SPECIFIED RESOURCE

I. Grabar, T. Dubishevskaya

e-mail: [ivan-grabar@ukr.net](mailto:ivan-grabar@ukr.net)

Zhytomyr National Agroecological University  
7, Stary Blvd, Zhytomyr, 10008, Ukraine

*The process of designing a new machine or design is a constant need to make decisions in the face of uncertainty: from the design idea, layout, and to the choice of materials and equipment. At the same time, the indicators of reliability and cost, which are refined for a long time at the stage of testing a prototype and under controlled operation, remain virtually unrecorded. It is too expensive and requires considerable time. How can these indicators be taken into account at the design stage, reducing time and costs?*

*In addition, the service and operational characteristics of a metal structural material: chemical composition, short-term, cyclic and long-term strength, ductility, crack resistance - form a multidimensional vector, each of which components separately weakly correlates with the market price of the alloy, which does not directly allow us to estimate the cost of the structure and not allows a priori ranking of alloys according to a comprehensive assessment of value under specific conditions with given parameters of temperature-force load on a given resu a. For the first time such a statement of the problem was formed in our publications cited in the list of references. This research is their further development.*

*The methodology for estimating the relative cost of modern metallic structural materials for given operating conditions (load, temperature, resource) and alloy properties (reduced coefficient of quotation, melting point, specific gravity) is given. On the basis of these estimates and the previously proposed universal generalized diagram of a prof. Grabara, for the first time, they managed to obtain comparative estimates of the cost of metal structures for a wide range of their operating conditions (stresses, temperatures and resource), referred to the unit of operation time. This methodology allows a significant reduction in the level of uncertainty, and can be applied already at the stage of preliminary design of the machine. The approach outlined in the paper opens up good prospects for a deeper feasibility study of engineering solutions at the stage of preliminary machine design. Examples of calculation.*

**Keywords:** metallic construction materials; construction resource; universal generalized diagram of prof. Grabar; the relative cost of metals; price ratio; reduced price ratio.