

Оцінка механічних властивостей сталей з врахуванням фазно-структурного чинника. Повідомлення 1. Визначення границі втоми на повітрі за статичною міцністю

В. І. Витвицький, М. П. Бережницька, Р. В. Чепіль

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

За єдиним методичним підходом одержано кореляції між границями міцності та втоми при розтязі і згині 48 сталей різних структурних класів та термообробок. Різниця між фактичним і розрахунковим значеннями за найефективнішим відомим і запропонованими рівняннями становить: середня 2 рази, середньоквадратична 2,5.

Ключові слова: коефіцієнт стабільності аустеніту, границя міцності, границя втоми при згині, границя втоми при розтязі.

Аналіз проблеми. На даний час відома значна кількість емпіричних залежностей, що пов'язують границю втоми з статичними механічними характеристиками [1–3]. Але жодну з них не можна вважати універсальною, оскільки кожна є працездатною у вузькому діапазоні зміни структур та властивостей, і тому застосовувати їх необхідно надзвичайно обережно [1, 2]. Це пов'язано з відсутністю у відомих підходах об'єднуючого кількісного показника, який би враховував змінний вплив різних хімічних елементів на фазно-структурний стан матеріалів. Останній є основним чинником, що формує деформаційну поведінку і параметри статичної та втомної міцності.

Метою роботи є одержання узагальнюючих залежностей між границями втоми і міцності широкого класу сталей з врахуванням фазно-структурного чинника.

Методика та результати досліджень. Використовували результати досліджень [1, 2, 4–8] 48 вуглецевих, легованих, чорних, нержавіючих хромованих та хромонікелевих сталей і сплавів різних термообробок у діапазоні границь міцності та втоми: $\sigma_B = 450 \dots 2370$ МПа; $\sigma_{-1} = 157 \dots 710$ МПа (таблиця). Для одержання залежностей використовували експериментально-аналітичний підхід [9, 10], згідно з яким: рівноважний фазний стан сталей різних структурних класів характеризується кількісним показником A_γ (коефіцієнт стабільності аустеніту), який розраховували за хімічним складом із використанням діаграми Шефлера і Fe–Cr–Ni-діаграм, а також відомих хром- та нікель-еквівалентів (CrE, NiE) [11]; у кореляційних рівняннях показник A_γ слугував коефіцієнтом зв'язку між механічними властивостями.

Алгоритм розрахунку A_γ . Вихідні дані наступні: хімічний склад сталі (основні легуючі елементи):

$$1) \text{CrE} = [\text{Cr}] + 2[\text{Si}] + 1,5[\text{Mo}] + 5[\text{V}] + 5,5[\text{Al}] + 1,75[\text{Nb}] + 1,5[\text{Ti}] + 0,75[\text{W}];$$

$$2) \text{NiE} = [\text{Ni}] + [\text{Co}] + 0,5[\text{Mn}] + 0,3[\text{Cu}] + 25[\text{N}] + 30[\text{C}],$$

де $[\cdot]$ – вміст хімічних елементів у сталі, мас.%;

Експериментальні та розрахункові значення механічних властивостей сталей

Матеріал	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{-1зг}$, МПа	$\sigma_{-1р}$, МПа	Літературне джерело	Розрахунок за запропонованим підходом						Розрахунок за формулою [3]	
					A_{γ}	$\sigma_{-1зг}$, МПа	Похибка, %	$\sigma_{-1р}$, МПа	Похибка, %	$\sigma_{-1зг}$, МПа	Похибка, %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
62С2ВА	2370	630	–	[4]	0,89	745	18,3	–	–	1074	70	
45ХН2МФА	2080	670	–	[4]	0,71	709	5,8	–	–	944	41	
4Х5МФС	2010	710	–	[4]	1,00	626	11,8	–	–	912	28	
38ХС	1890	680	–	[4]	0,50	746	9,7	–	–	858	26	
30ХГЧН2А	1830	630	–	[4]	0,55	697	10,7	–	–	831	32	
45ХН2МФА	1530	650	–	[4]	0,71	548	15,6	–	–	696	7	
38ХС	1470	640	–	[4]	0,50	613	4,2	–	–	669	5	
18Х2Н4ВА	1460	560	–	[4]	0,67	539	3,8	–	–	665	19	
1Х12Н2ВМФ	1340	660*	–	[8]	0,63	631	4,5	–	–	611	7	
45ХН2МФА	1340	600	–	[4]	0,71	609	1,5	–	–	611	2	
62С2ВА	1280	520	–	[4]	0,89	538	3,5	–	–	584	12	
1Х12Н2МВФБА	1260	620*	–	[8]	0,71	578	6,7	–	–	575	7	
13Х16К4Н2МВФБА	1250	510	–	[7]	1,02	493	3,3	–	–	570	12	
ЭИ437Б	1240	–	405	[1]	3,78	–	–	357	11,9	–	–	
2Х13	1215	570*	–	[7]	0,55	597	4,8	–	–	554	3	
1Х12Н2МВФБА	1205	580*	–	[8]	0,71	557	4,0	–	–	550	5	
15Х16Н2М	1200	610*	–	[8]	0,57	588	3,6	–	–	548	10	
15Х16Н2М	1200	540*	–	[8]	0,57	588	8,9	–	–	548	1	
18Х2Н4ВА	1200	520	–	[4]	0,67	564	8,5	–	–	548	5	
0Х14АГ12М	1118	–	310	[1]	1,19	–	–	369	19,1	–	–	

Продовження таблиці

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
30ХГСН2А	1110	500	–	[4]	0,55	551	10,1	–	–	507	1
1Х12Н2ВМФ	1105	545*	–	[7]	0,63	533	2,2	–	–	505	7
38ХС	1100	550	–	[4]	0,50	555	0,9	–	–	503	9
1Х12Н2ВМФ	1080	510*	–	[8]	0,63	522	2,4	–	–	494	3
ЭИ617	1078	–	300	[1]	1,99	–	–	336	11,9	–	–
1Х12Н2МВФБА	1060	500*	–	[8]	0,71	499	0,2	–	–	485	3
ЭИ437БВД	1052	–	340	[1]	6,01	–	–	288	15,2	–	–
2Х13	1000	480*	–	[7]	0,55	500	4,2	–	–	458	5
ЭИ612	1000	–	300	[1]	3,26	–	–	295	1,7	–	–
40Х	994	420	360	[1]	0,44	510	21,5	370	2,7	455	8
15Х16Н2М	985	530*	–	[8]	0,57	491	7,3	–	–	451	15
18Х2Н4ВА	985	450	–	[4]	0,67	475	5,6	–	–	451	0
15Х16Н2М	980	500*	–	[8]	0,57	489	2,2	–	–	449	10
1Х12Н2ВМФ	970	515*	–	[8]	0,63	475	7,9	–	–	444	14
07Х16Н4Б (Ø5 мм)	966	510*	–	[7]	0,32	499	2,1	–	–	442	13
ЭИ826	960	–	260	[1]	1,34	–	–	314	20,9	–	–
14Х17Н2	950	490*	–	[7]	0,51	482	1,6	–	–	435	11
60	937	–	330	[1]	0,70	–	–	331	0,3	–	–
08Х17Н5М3	930	500*	–	[7]	0,585	464	7,3	–	–	426	15
ЭИ826	922	–	305	[1]	1,34	–	–	302	0,9	–	–
1Х17Н2Ш	912	–	390	[1]	0,55	–	–	332	14,9	–	–
08Х17Н16Т (Ø5 мм)	890	470*	–	[7]	0,699	430	8,4	–	–	408	13

Продовження таблиці

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
09X17H7Ю (Ø5 мм)	870	460*	-	[7]	0,743	416	9,6	-	-	399	13
30X10Г10	815	-	320	[1]	0,92	-	-	280	12,4	-	-
08X18Г12H5АБ (Ø5 мм)	800	230*	-	[7]	1,922	231	0,4	-	-	368	60
08X21H6M2Г	750	420*	-	[7]	0,57	381	9,3	-	-	345	18
30	726	-	340	[1]	0,37	-	-	278	18,1	-	-
08X22H6Г	720	400*	-	[7]	0,63	362	9,5	-	-	332	17
45	668	310	230	[1]	0,55	343	10,5	245	6,7	308	1
1X18H10Г	650	294	190	[1]	1,05	293	0,5	221	16,5	300	2
12X18H9 (Ø7,5 мм)	645	250*	-	[7]	1,049	291	16,4	-	-	298	19
10X26H5M2 (Ø5 мм)	640	310*	-	[7]	0,439	331	6,9	-	-	296	5
1X13	638	-	283	[1]	0,35	-	-	247	12,6	-	-
12X18H10Г (Ø7,5 мм)	631	265*	-	[7]	1,125	279	5,1	-	-	292	10
12XH3	624	320	270	[1]	0,32	317	1,0	245	9,3	288	10
1X13	620	-	270	[1]	0,35	-	-	241	10,9	-	-
45	618	282	177	[1]	0,55	318	12,7	228	28,6	286	1
12X13	610	310*	-	[7]	0,27	302	2,5	-	-	282	9
45	580	-	210	[1]	0,55	-	-	214	1,9	-	-
15Г2АФДлс	532	-	260	[1]	0,22	-	-	219	15,6	-	-
25	518	255	167	[1]	0,96	248	2,9	179	7,5	241	6
20X	500	245	157	[1]	0,24	236	3,8	204	30,0	233	5
12X17	450	240*	-	[7]	0,30	221	7,9	-	-	210	12

Примітка. Зірочкою позначено дані при обертовому згині; $\sigma_{-1зг}$, $\sigma_{-1р}$ – границя втоми при згині та розтязі відповідно.

$$3) \text{NiE}_{\min} = 0,0512\text{CrE}^2 - 1,843\text{CrE} + 28,6;$$

$$4) A_\gamma = \text{NiE}/\text{NiE}_{\min}.$$

Із вищенаведеного маємо, що розрахункова постійна хімічного складу A_γ є кількісною мірою надлишку або нестачі аустенітно-утворюючих елементів у хімічному складі конкретної сталі, щоб створити в ній повністю аустенітну структуру. За фізичним змістом A_γ – безрозмірна кількісна характеристика рівноважних фазно-структурних станів сталей. За відсутності інформації про вміст хімічних елементів у сталях у роботах [1, 2, 4–8] його визначили усереднено за довідниками марок сталей.

Алгоритм застосування A_γ .

1. Шуканий вираз у загальному має вигляд $A_\gamma^m a^n = f(A_\gamma^k b^l)$, де a і b – визначаються і задана величини.

2. Функція f визначається в координатах $y = A_\gamma^m a^n$, $x = A_\gamma^k b^l$ графічно за експериментальними даними (таблиця).

3. Ітерацією m , n , k , l рівняння апроксимації оптимізується до коефіцієнта кореляції $R > 0,95$.

4. Результат апроксимації прийнятний, якщо розбіжність між фактичними і розрахованими даними не перевищує похибки експерименту. За $R > 0,95$ різниця між розрахованими й експериментальними значеннями – основний показник.

Результати, одержані за допомогою запропонованого підходу, порівнювали з даними за відомими формулами [1–3]. Серед останніх визначили рівняння, що дає найменшу розбіжність між фактичним і розрахунковим значеннями ($\sigma_{-1} = 0,45\sigma_B + 7,5$ [3]). Розраховані за цим рівнянням значення $\sigma_{-13\Gamma}$ зіставляли з результатами, отриманими за запропонованим підходом (таблиця).

Границя втоми при навантаженні згином ($\sigma_{-13\Gamma}$). За вищенаведеним алгоритмом розраховували $\sigma_{-13\Gamma}$. Для цього в координатах $x = A_\gamma \sqrt{\sigma_B}$ та $y = A_\gamma \sqrt{\sigma_{-13\Gamma}}$ будували залежності. Зменшуючи похибку, для матеріалів із $\sigma_B < 1400$ МПа і $\sigma_B > 1400$ МПа одержували окремі графіки (рис. 1,а). У результаті апроксимації отримали:

$$\text{при } \sigma_B > 1400 \text{ МПа} \quad y = -0,0002x^2 + 0,5061x + 2,7334; \quad R = 0,9698;$$

$$\text{при } \sigma_B < 1400 \text{ МПа} \quad y = -0,0053x^2 + 0,8373x - 0,6536; \quad R = 0,9656,$$

звідки

$$\text{при } \sigma_B > 1400 \text{ МПа} \quad \sigma_{-13\Gamma} = [-0,0002A_\gamma \sigma_B + 0,5061\sqrt{\sigma_B} + 2,7334/A_\gamma]^2;$$

$$\text{при } \sigma_B < 1400 \text{ МПа} \quad \sigma_{-13\Gamma} = [-0,0053A_\gamma \sigma_B + 0,8373\sqrt{\sigma_B} - 0,6536/A_\gamma]^2.$$

Характерним для випробувань на повітрі є те, що результати, одержані за навантажень плоским та обертовим згином зразків діаметром 5; 7,5 і 10 мм, апроксимуються однією залежністю.

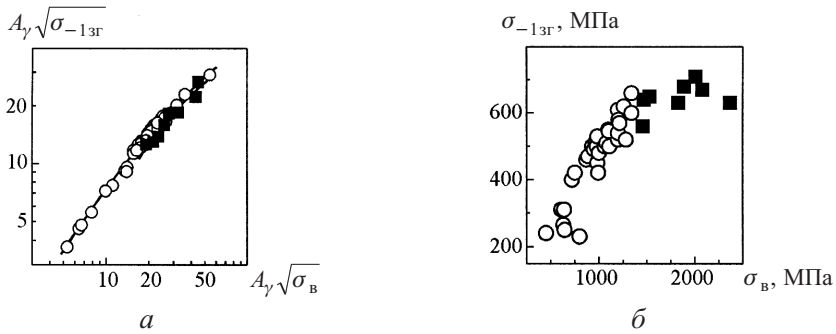


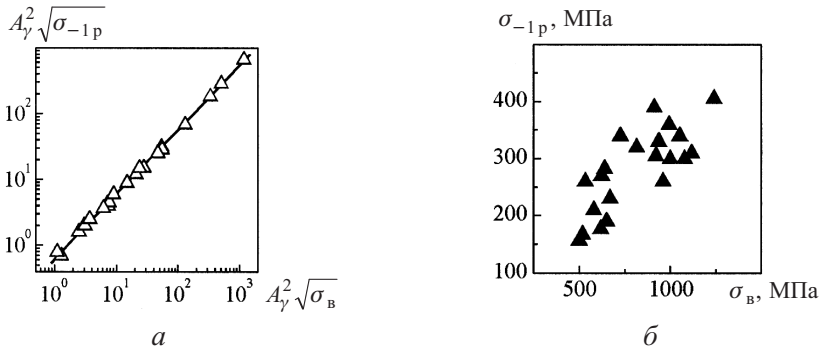
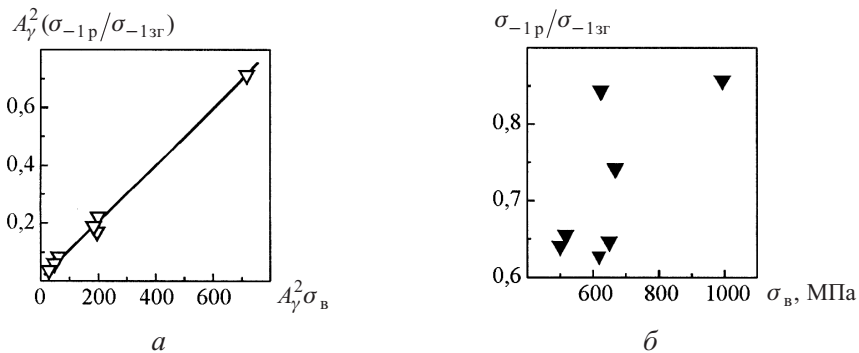
Рис. 1. Залежності між границями міцності σ_B та границями втоми при згині σ_{-13r} . (Тут і на рис. 2, 3: а – з урахуванням A_γ ; б – без урахування A_γ).

Розбіжність між фактичним і розрахованим значенням за відомим і запропонованими рівняннями становить: середня 63,6 і 31,6 МПа; середньоквадратична (чутливіша до грубих викидів) – 101,4 і 40,9 МПа. Таким чином, за допомогою запропонованого підходу можна у 2–2,5 рази підвищити точність розрахунку.

Границя втоми при навантаженні розтягом (σ_{-1p}). Зіставлення втомної поведінки матеріалів за різних навантажень (рис. 1,а і 2,а) показує, що перехід від згину до розтягу призводить до зменшення величини границі втоми та до збільшення розсіювання даних на графіку $\sigma_{-1p} - \sigma_B$ (рис. 2,б). Так, феритно-перлітна сталь 15Г2АФДпс ($A_\gamma = 0,22$) і стабільна високонікелева аустенітна сталь ЭИ826 ($A_\gamma = 1,34$) мають однакову границю втоми $\sigma_{-1p} = 260$ МПа, але для першої $\sigma_B = 532$ МПа, для другої – $\sigma_B = 960$ МПа. Вочевидь, можна говорити про зростання ролі структурного чинника у зміні опірності матеріалів із переходом від неоднорідного до однорідного напруженого стану. При побудові графічної залежності за допомогою запропонованого підходу (рис. 2,б) це проявляється у зміні степеня A_γ у значеннях координат точок на графіку ($x = A_\gamma^2 \sqrt{\sigma_B}$; $y = A_\gamma^2 \sqrt{\sigma_{-1p}}$), що дало змогу чітко впорядкувати експериментальні дані. У результаті апроксимації отримано рівняння $y = 0,6434x^{0,9708}$; $R = 0,9992$, звідки $\sigma_{-1p} = 1,2868A_\gamma^{-0,0034} \sigma_B^{0,2356}$.

Розбіжність між фактичним і розрахунковим значеннями за запропонованим рівнянням становить: середня 32,7 МПа, середньоквадратична 38,3 МПа. Тут немає потреби поділу матеріалів за групами міцності, оскільки всі дані можна достатньо точно описати однією залежністю. В [1] для семи сталей (таблиця) наведено експериментальні значення границь втоми при розтязі і згині. Для них за запропонованим алгоритмом у координатах $A_\gamma^2 \frac{\sigma_{-1p}}{\sigma_{-13r}} - A_\gamma^2 \sigma_B$ побудували окрему кореляційну криву (рис. 3,а). У результаті одержано лінійну залежність $A_\gamma^2 \frac{\sigma_{-1p}}{\sigma_{-13r}} = 0,001A_\gamma^2 \sigma_B + 0,0104$ ($R = 0,9676$), звідки

$$\frac{\sigma_{-1p}}{\sigma_{-13r}} = 0,001\sigma_B + \frac{0,0104}{A_\gamma^2}.$$

Рис. 2. Залежності між границями міцності σ_B та границями втоми при розтязії σ_{-1p} .Рис. 3. Залежності між границями міцності σ_B та співвідношенням $\sigma_{-1p} / \sigma_{-1зг}$.

Розбіжність між фактичним і розрахунковим значенням для $\sigma_{-1зг}$ складає: середня 25,7 МПа, середньоквадратична 38,97 МПа; для σ_{-1p} : середня 27,41 МПа, середньоквадратична 31,49 МПа.

Аналіз результатів досліджень. Виявлено, що одного показника A_γ методично достатньо для одержання кореляцій з $R > 0,96$ між границями міцності і втоми матеріалів за різних видів навантаження в широкому діапазоні змін їх властивостей, хімічних складів та структур. Кількісно установити внесок механічного і фазно-структурного чинників у характер узагальнюючого зв'язку можна за величинами m, n, k, l у рівняннях $A_\gamma^m a^n = f(A_\gamma^k b^l)$. У всіх розглянутих випадках у кореляціях переважаючу роль відіграє фазно-структурний чинник. Із переходом навантаження від обертового чи плоского згину до розтягу його роль зростає. Відомо, що на структуру і механічні властивості матеріалів суттєво впливає термічна обробка. Її вплив проаналізували, використовуючи результати випробувань сталей 18X2H4BA, 1X13, 2X13, 1X12H2BMФ, 1X12H2MBФБА, 15X16H2M, 1X17H2Ш, 1X18H10T, ЭИ826, 30XГСН2А, 38ХС, 45, 45ХН2МФА, 62С2ВА (таблиця). Із даних таблиці та рис. 1–3 видно, що в залежності від термічної обробки матеріали змінюють своє розташування на відповідних кривих, але це не впливає на вигляд і хід залежностей $A_\gamma^m \sigma_{-1}^n - A_\gamma^k \sigma_B^l$ та величину похибки розрахованих значень σ_{-1} . Отже, вплив A_γ на кореляцію не залежить від зміни властивостей матеріалу внаслідок термообробки. Якщо сталі з різним хімічним

складом мають близькі значення A_{γ} , то це свідчить про подібність їх рівноважних фазних станів (кристалічна будова і стабільність відносно перетворень матричної ґратки). Відмінність полягатиме у кількісному і якісному складі легувальних елементів, що по-різному зміцнять тверді розчини з ґратками одного типу. Це призведе до різниці у механічних характеристиках. Однак зв'язок між ними, який контролює A_{γ} , подібний. Схоже відбувається також у випадку зміни властивостей матеріалів після термообробки.

Порівняння графіків на рис. 1–3 наглядно ілюструє ефективність застосування запропонованого підходу до аналітичної оцінки властивостей матеріалів і дозволяє зробити певні висновки у методологічному плані. Хоча хром- і нікельєквіваленти як такі було запроваджено суто для корозійно-стійких хромистих та хромонікелевих сталей [10], але, як свідчить вищеведене, їх залучення доцільне і для опису механічної поведінки вуглецевих, легованих, чорних сталей та хромонікелевих сплавів.

Висновки

1. За одним методичним підходом аналітично узагальнено поведінку 48 матеріалів (вуглецевих, легованих, чорних та корозійно-стійких сталей і сплавів) різної міцності та структури за короткочасного і втомного навантаження в діапазоні $\sigma_{\text{в}} = 450 \dots 2370$ і $\sigma_{-1} = 157 \dots 630$ МПа. За допомогою розрахункової сталі хімічних складів A_{γ} встановлено залежності між границями міцності і втоми при розтязі та згині з коефіцієнтами кореляції $R > 0,96$. Зміна механічних властивостей внаслідок термообробки не впливає на характер залежностей і точність розрахункових значень втомних характеристик. Розбіжність між фактичним і розрахунковим значеннями за найефективнішим відомим і запропонованими рівняннями становить: середня 2 рази, середньоквадратична 2,5 рази.

2. Визначено роль механічного і фазно-структурного чинників у характері узагальнюючого зв'язку між втомними та статичними властивостями сталей. У всіх випадках фазно-структурний чинник відіграє переважаючу роль в кореляції, яка зростає з переходом від обертового чи плоского згину до розтягу. При згині поведінка зразків різних діаметрів апроксимується однією залежністю. Для матеріалів з $\sigma_{\text{в}} < 1400$ МПа і > 1400 МПа отримано окремі графіки.

3. Установлено зв'язок між границями втоми при розтязі і згині в залежності від границі міцності та хімічного складу матеріалів.

Резюме

За єдиним методическим підходом отримані кореляції між границями прочності і усталості при розтяженні і вигині 48 сталей різних структурних класів і термообробок. Різниця між фактичними і розрахованими значеннями по самому ефективному відомому і запропонованому рівнянням становить: середня 2 рази, середньоквадратична 2,5.

1. Трощенко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 344 с.

2. Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. – Киев: Наук. думка, 1987. – 505 с.
3. Тылкин М. А. Справочник термиста ремонтной службы. – М.: Metallurgia, 1981. – 647 с.
4. Балтер М. А. Упрочнение деталей машин. – М., 1968. – 196 с.
5. Похмурский В. И. Коррозионная усталость металлов. – М.: Metallurgia, 1985. – 206 с.
6. Похмурский В. И. Коррозионно-усталостная прочность сталей и методы ее повышения. – Киев: Наук. думка, 1974. – 185 с.
7. Похмурський В., Хома М. Вплив механічних властивостей і структурного стану корозійнотривких сталей на їхню витривалість у повітрі та корозійному середовищі // *Машинознавство*. – 2001. – С. 13 – 16.
8. Каличак Т. Н. Исследование некоторых физико-механических и электрохимических свойств мартенситных нержавеющей сталей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1971. – 21 с.
9. Витвицький В. І. Кореляційні залежності між механічними характеристиками корозійно-стійких сталей // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2007. – **43**, № 1. – С. 54 – 60.
10. Витвицький В. І., Ткачов В. І., Бережницька М. П., Чепіль Р. І. Оцінка механічних властивостей корозійно-стійких сталей за статичного і малоциклового навантаження // *Пробл. прочності*. – 2007. – № 5. – С. 19 – 30.
11. Пикеринг Ф. Б. Физическое металловедение и разработка сталей / Пер. с англ. – М.: Metallurgia, 1982. – 184 с.

Поступила 24. 04. 2008