

Оцінка напруженого стану робочого шару валків коерцитиметричним експрес-методом

*Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

При застосуванні двошарових валків широкосмугових станів із робочим шаром із високохромистого чавуну значно збільшується продуктивність і підвищується якість обробки прокату. Використання високохромистих валків замість хромонікельмолібденових забезпечує збільшення випуску прокату у 2 рази. Регулювання та забезпечення необхідних показників якості високохромистих валків потребує використання сучасних методів контролю на основі визначення магнітних властивостей, що сприяє підвищенню їх експлуатаційної стійкості. В роботі розглянуто вплив хімічного складу та структури на показники експлуатаційної стійкості відцентроволитих двошарових прокатних валків з високохромистого чавуну з використанням коерцитиметричного експрес-методу. В процесі досліджень були вирішені такі завдання: проведено аналіз причин руйнування поверхневого шару валків; побудовано математичну модель для вивчення впливу хімічного складу та структури чавуну на рівень твердості і коерцитивної сили; використано коерцитиметричний метод для аналізу якості прокатних валків. За результатами досліджень зроблено ряд висновків: властивості високохромистих чавунів тісно пов'язані з типом фаз, що формуються, та їх співвідношенням; найбільший вплив на властивості сплаву (у досліджуваному інтервалі зміни частки фаз) має кількість залишкового аустеніту і мартенситу в структурі сплаву; за допомогою коерцитиметричного експрес-методу можна вирішити досить широке коло завдань контролю якості валків, пов'язаних з визначенням рівня та розподілу залишкових напружень в робочому шарі валків. Локальне підвищення рівня коерцитивної сили може бути основою прогнозу утворення тріщини, тому вона може використовуватися для оцінки якості високохромистих валків.

Ключові слова: високохромистий чавун, прокатні валки, коерцитивна сила, залишковий аустеніт, мартенсит, карбіди.

Вступ

Збільшення продуктивності прокатних станів та якості прокату потребує більш високого рівня властивостей формуючого інструменту та збільшення терміну його служби [1]. До прогресивних розробок у галузі технології виготовлення прокатних валків відноситься метод відцентрового лиття, який значно розширює можливості використання зносостійких, але нетехнологічних матеріалів, таких як високохромисті чавуни.

При застосуванні двошарових валків широкосмугових станів із робочим шаром із високохромистого чавуну значно збільшується продуктивність і підвищується якість обробки прокату. Використання високохромистих валків замість хромонікельмолібденових забезпечує збільшення випуску прокату у 2 рази. Технологічний процес виготовлення потужних валків (10 – 12 т) методом відцентрового лиття дуже складний. Тому регулювання та забезпечення необхідних показників якості високохромистих валків потребує використання

сучасних методів контролю на основі визначення магнітних властивостей, що сприяє підвищенню їх експлуатаційної стійкості [2].

Мета і постановка завдання

Метою роботи є проблема дослідження впливу хімічного складу та структури на показники експлуатаційної стійкості відцентроволитих двошарових прокатних валків з високохромистого чавуну коерцитиметричним еспрес-методом. Для того, щоб забезпечити досягнення цієї мети, були поставлені та вирішені такі завдання: проведення аналізу причин руйнування поверхневого шару валків; побудова математичної моделі для вивчення впливу хімічного складу та структури чавуну на рівень твердості і коерцитивної сили; використання коерцитиметричного методу для аналізу якості прокатних валків.

Аналіз публікацій

Валки з робочим шаром із високохромистого чавуну характеризуються високою зносостійкістю [3]. Перевага високохромистого сплаву, порівняно з хромонікелевим, полягає в тому, що цей матеріал при певному додатковому легуванні забезпечує підвищену стійкість до викришування. Міцність високохромистого чавуну приблизно в 2 рази вища, ніж хромонікелевого [4]. Високохромистий сплав при відцентровому литті має меншу схильність до локалізації деформацій через формування більш дисперсної структури та спеціальних карбідів [5]. У процесі лиття забезпечується формування робочого шару глибиною до 60 мм.

Викришування робочої поверхні прокатних валків є однією з причин їх передчасного переточування. У процесі експлуатації валки піддаються як термоциклічному навантаженню, так і впливу великих питомих тисків. На ділянках контакту виникають різні за величиною напруження, в деяких точках поверхонь, що контактують, відбувається інтенсивна пластична деформація, що активізує дифузійні процеси і структурні зміни в поверхневих шарах, утворення і руйнування вузлів схоплювання [6].

У зв'язку з цим мають виконуватися такі вимоги до робочого шару: забезпечення необхідної твердості та співвідношення структурних складових, необхідної міцності; мала схильність до викришування і пластичної деформації; здатність утворювати на поверхні тертя вторинні захисні структури; низька схильність до схоплювання та відшаровування. Основними шляхами реалізації цих вимог є: оптимізація хімічного складу, удосконалення технології виготовлення валків та покращення умов їх експлуатації [3].

Інтенсивність процесу утворення термічних тріщин в умовах термоциклічного навантаження значною мірою залежить від рівня залишкових стискаючих напружень. Занадто високий рівень напружень або несприятливий їх розподіл можуть стати причиною передчасного руйнування робочого шару валка. Істотного підвищення стійкості валків можна досягти шляхом оптимізації хімічного складу та структури.

Дослідження складу, структури та властивостей високохромистого чавуну

Дослідження проводили на валках, робочий шар яких мав наступний хімічний склад: 2,58-2,96 % C; 0,74 % Si; 1,10 % Mn; 0,07 % P; 0,04 % S; 1,28 % Ni; 0,98 % Mo; 0,03 % Mg, вміст хрому у різних зразках складав – 12,2 -17,4 % Cr.

Використовували методи кількісної металографії, вимірювання коерцитивної сили, твердості за Шором, рентгеноспектральний мікроаналіз.

Хімічний склад має найбільш істотний вплив на структуру поверхневого шару валків. З одного боку, вміст вуглецю у високохромистому сплаві має бути високим, оскільки його збільшення пов'язано із зростанням частки карбідної фази та інтенсифікацією процесу викришування. Співвідношення кількості карбідоутворюючого елементу хрому і вуглецю визначається коефіцієнтом $K = \text{Cr}/\text{C}$. Збільшення вмісту хрому, а також інших карбідоутворюючих елементів, навпаки, знижує схильність сплаву до викришування. З іншого боку, зі збільшенням коефіцієнта K спостерігається підвищення ступеня дисперсності структури, що є сприятливим фактором з погляду підвищення експлуатаційних властивостей валків, що працюють в умовах високих температур. Крім того, зі збільшенням коефіцієнта K змінюється співвідношення фаз металевої матриці. Також підвищення вмісту хрому в сплаві призводить до збільшення частки спецкарбідів типу $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$, та дрібнодисперсних вторинних карбідів $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$ у структурі, які забезпечують більш високу зносостійкість робочого шару.

Властивості високохромистих сплавів тісно пов'язані з типом фаз, що формуються, та їх співвідношенням. Рівень твердості та міцності високохромистих сплавів, в основному, визначається типом, розміром, розподілом карбідної фази та структурою металевої матриці. Співвідношення фаз матриці можна регулювати відповідним легуванням та подальшою термообробкою. Кількість, форма, розмір та розташування первинних та евтектичних карбідів зумовлені процесом кристалізації.

Для вивчення впливу структурних складових на рівень твердості (HS) та коерцитивної сили (Hc) побудовані математичні моделі у вигляді лінійних рівнянь регресії. У дослідженнях варіювали співвідношення фаз: частку залишкового аустеніту та мартенситу (\tilde{x}_1) та кількість карбідної складової (\tilde{x}_2). Рівні варіювання зазначених факторів наведено у табл. 1, матриця планування – в табл. 2.

Характеристика \tilde{x}_1 враховує частку залишкового аустеніту та мартенситу, оскільки ці фактори взаємопов'язані.

Таблиця 1

План експерименту

Умови планування	\tilde{x}_1		\tilde{x}_2 частка карбідної фази, %
	частка залишкового аустеніту, %	частка мартенситу, %	
Основний рівень	15	20	30,5
Інтервал варіювання	10	20	3,5
Верхній рівень	25	40	34
Нижній рівень	5	0	27

Отримано рівняння регресії для визначення твердості:

$$\text{HS} = 70,5 + 5,0X_1 + 2,5X_2.$$

Дисперсія відтворюваності моделі $S_{\{y\}} = 1,42$. Модель перевірено на адекватність. Довірчий інтервал $\Delta b_j = \pm 1,97$. Усі коефіцієнти регресії значущі.

Таблиця 2

Матриця планування (план експерименту 2²)

X ₁	X ₂	\bar{y} (HS)	\bar{y} (H _c)
+	+	78	52
-	+	68	38
+	-	73	45
-	-	63	33

Рівняння регресії для визначення коерцитивної сили:

$$H_c = 42,0 + 6,5X_1 + 3,0X_2.$$

Дисперсія відтворюваності моделі $S_{\{y\}} = 1,28$. Модель адекватна. Довірчий інтервал $\Delta b_j = \pm 1,58$. Усі коефіцієнти регресії значущі.

Отримані рівняння регресії характеризують вплив частки структурних складових на рівень твердості і коерцитивної сили. За рахунок збільшення частки залишкового аустеніту від 5 до 25 %, а мартенситу до 40 % при постійній кількості карбідної фази можна підвищити твердість на 10 HS, що становить 14,2 % від її середнього значення, при цьому коерцитивна сила збільшується на 30 %. Підвищення рівня коерцитивної сили свідчить про значне зростання фазових напружень, які при експлуатації можуть суттєво збільшитись та сприяти тріщиноутворенню. При зменшенні частки карбідної фази можна досягти зниження коерцитивної сили на 14,3 %, при цьому твердість знизиться на 5 HS.

Виконаний аналіз впливу хімічного складу на властивості високохромистого сплаву показав, що твердість і коерцитивну силу можна регулювати, змінюючи співвідношення структурних складових, при цьому найбільший вплив на властивості сплаву (у досліджуваному інтервалі зміни частки фаз) має кількість залишкового аустеніту і мартенситу в структурі сплаву.

Для робочого шару високохромистих валків характерним є високий рівень напружень. Причиною передчасного руйнування в процесі експлуатації валка може бути перевищення допустимого рівня напружень або їх несприятливий розподіл.

Коерцитивна сила чутлива, з одного боку, до структурних змін у сплаві, а з іншого – до залишкових напружень, що накопичуються. Тому на додаток до оцінки твердості поверхневого шару як експрес-метод для визначення напруженого стану вилівка використовували вимірювання коерцитивної сили за допомогою коерцитиметру KPM-Ц. Проведено вимірювання твердості та коерцитивної сили на поверхні бочок 40 валків з різним хімічним складом.

Як показали дослідження коерцитивна сила для робочого шару валків суттєво залежить від коефіцієнта, який визначає співвідношення вмісту хрому та вуглецю – $K = Cr/C$. З підвищенням K від 4,39 до 6,59 середнє значення H_c зростає в 1,56 разів (табл. 3).

Напруження, що виникають у робочому шарі валка, можуть відрізнятися в поздовжньому та поперечному напрямку. Значна відмінність цих величин несприятливо впливає на експлуатаційну стійкість валка.

Вимірювання коерцитивної сили в поперечному і поздовжньому напрямку показали, що на поверхні бочки валка відношення $H_{\text{Сповз.}}/H_{\text{Споп.}}$ змінювалося в межах 0,95 – 1,05 та анізотропія не перевищувала 5 %.

Типовим видом руйнування внаслідок незбалансованого розподілу напружень є розтріскування. Неоднорідність розподілу напружень по поверхні

бочки також може бути оцінена методом вимірювання коерцитивної сили. Локальне підвищення рівня H_c може бути основою прогнозу утворення тріщини.

Таблиця 3

Зміна значення коерцитивної сили та твердості в залежності від коефіцієнта K валків в литому стані

Вміст компонентів		$K = Cr/C$	Середнє значення H_c	Середнє значення HS
C	Cr			
2,96	13,0	4,39	36,54	62,0
2,76	12,2	4,42	32,76	57,0
2,86	13,9	4,86	33,17	57,5
3,24	16,0	4,94	37,60	62,0
2,94	16,8	5,71	44,36	74,3
2,86	17,4	6,08	45,12	75,5
2,58	17,0	6,59	54,27	77,8

Оптимальне співвідношення фаз та збалансований розподіл залишкових напружень може бути забезпечене правильно підібраним режимом термообробки (табл. 4).

Таблиця 4

Зміна значення коерцитивної сили та твердості в залежності від коефіцієнта K валків після відпалу при 450-500 °C

$K = Cr/C$	Середнє значення H_c	Середнє значення HS
4,39	36,47	58,5
4,42	30,30	53,0
5,71	41,88	69,0
6,08	42,92	71,0
6,59	52,69	73,0

Як показав статистичний аналіз результатів експлуатації, рівень коерцитивної сили має перевищувати 42 одиниці. У цьому випадку забезпечуються оптимальні показники зносостійкості та схильності сплаву до тріщиноутворення (рис. 1, 2).

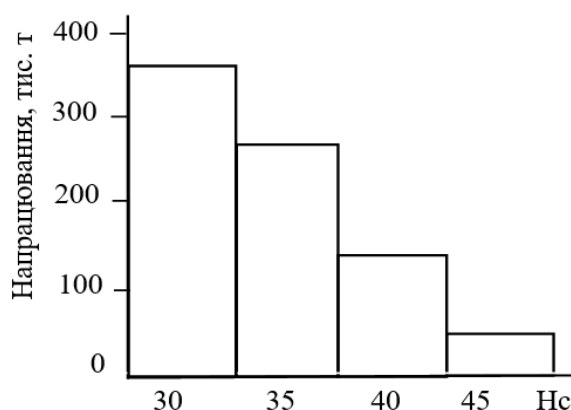


Рис. 1. Стійкість робочого шару валків до тріщиноутворення при різних значеннях коерцитивної сили

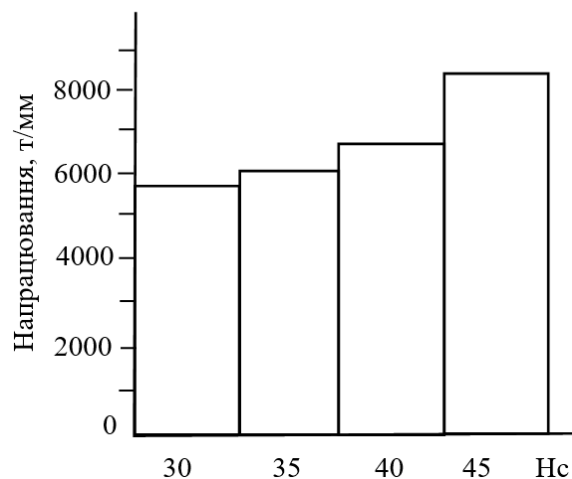


Рис. 2. Зносостійкість робочого шару валків при різному рівні коерцитивної сили

Таким чином коерцитивна сила добре корелює з показником твердості та залежить від рівня залишкових напружень. Тому вона може використовуватися для оцінки якості високохромистих валків.

Висновки

Прогнозування поведінки валків під час експлуатації нерозривно пов'язане з аналізом основних чинників, від яких залежить рівень властивостей та експлуатаційна стійкість робочого шару. Властивості високохромистих сплавів тісно пов'язані з типом фаз, що формуються, та їх співвідношенням. Найбільший вплив на властивості сплаву (у досліджуваному інтервалі зміни частки фаз) має кількість залишкового аустеніту і мартенситу в структурі сплаву.

Робочий шар двошарових високохромистих валків характеризується високим рівнем залишкових напружень. Перевищення допустимого рівня напружень або несприятливий їх розподіл може стати причиною передчасного руйнування в процесі експлуатації валка. За допомогою коерцитиметричного експрес-методу можна вирішити досить широке коло завдань контролю якості валків, пов'язаних з визначенням рівня та розподілу залишкових напружень в робочому шарі валків. Це пов'язано з тим, що інтенсивність процесу утворення термічних тріщин в умовах термоциклічного навантаження значною мірою залежить від рівня залишкових стискаючих напружень. Занадто високий рівень напружень або несприятливий їх розподіл можуть спричинити передчасне руйнування робочого шару валка, тому що типовим видом руйнування внаслідок незбалансованого розподілу напружень є розтріскування. Локальне підвищення рівня коерцитивної сили може бути основою прогнозу утворення тріщини.

Список літератури

1. Резнікова, О. С. Перспективи розвитку металургійних підприємств України в умовах глобальної конкуренції / О. С. Резнікова // Інтелект ХХІ. – 2014. – № 3. – С. 54 – 63.
2. Полякова, Н. В. Контроль експлуатаційної стійкості валків гарячої прокатки з високохромистих чавунів та швидкорізальних сталей / Н. В. Полякова,

М. М. Бойко, С. В. Журавльова // Теорія і практика металургії. – 2021. – № 5(130). – С. 39–44.

3. Нетребко, В. В. Наукові та технологічні основи підвищення механічних і службових властивостей високохромистих чавунів : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01 / Нетребко Валерій Володимирович. – Запоріжжя, 2019. – 36 с.

4. Куцова, В. З. Формування структури та трибологічні властивості високохромистих сплавів / В. З. Куцова, М. А. Ковзель, А. В. Гребенева // Металознавство та обробка металів. – 2017. – №2. – С. 43–48.

5. Ковальчук, О. Г. Особливості виготовлення виливків з диференційними властивостями поверхні : дис. ... канд техн. наук : 05.16.04 / Ковальчук Олександр Григорович. – Київ, 2019. – 140 с.

6. Karantzalis, E. Microstructure and properties of highchromium cast irons: effect of heat treatments and alloying additions / E. Karantzalis, A. Lekatou, H. Mavros // International Journal of Cast Metals Research. – 2009. – VOL 22, № 6. – P. 448–456.

References

1. Reznikova, O. S. Perspektyvy rozvytku metalurhiinykh pidpriemstv Ukrainy v umovakh hlobalnoi konkurentsii / O. S. Reznikova // Intelekt KHKHI. – 2014. – № 3. – S. 54 – 63.

2. Poliakova, N. V. Kontrol ekspluatatsiinoi stiikosti valkiv hariachoi prokatky z vysokokhromystykh chavuniv ta shvydkorizalnykh stalei / N. V. Poliakova, M. M. Boiko, S. V. Zhuravlova // Teoriia i praktyka metalurhii. – 2021. – № 5(130). – С. 39–44.

3. Netrebko, V. B. Naukovi ta tekhnolohichni osnovy pidvyshchennia mekhanichnykh i sluzhbovykh vlastyvostei vysokokhromystykh chavuniv : avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.02.01 / Netrebko Valerii Volodymyrovych. – Zaporizhzhia, 2019. – 3. s.

4. Kutsova, V. Z. Formuvannia struktury ta trybolohichni vlastyvoli vysokokhromystykh splaviv / V. Z. Kutsova, M. A. Kovzel, A. V. Hrebeneva // Metaloznavstvo ta obrobka metaliv. – 2017. – №2. – S. 43–48.

5. Kovalchuk, O. H. Osoblyvosti vyhotovlennia vylivkiv z dyferentsiinymy vlastyvostiamy poverkhni : dys. ... kand tekhn. nauk : 05.16.04 / Kovalchuk Oleksandr Hryhorovych. – Kyiv, 2019. – 140 s.

6. Karantzalis, E. Microstructure and properties of highchromium cast irons: effect of heat treatments and alloying additions / E. Karantzalis, A. Lekatou, H. Mavros // International Journal of Cast Metals Research. – 2009. – VOL 22, № 6. – P. 448- 456.

Надійшла в редакцію 25.12.2023, розглянута на редколегії 25.12.2023

Estimation of the stress state of rolls operational layer by the coercimetric express method

The purpose of the work is the problem of researching the influence of chemical composition and structure on the indicators of operational stability of centrifugal two-layer rolling rolls made of high chromium cast iron by the coercimetric express method. In order to ensure the achievement of this goal, the following tasks were set and solved: conducting an analysis of the causes of the destruction of the surface layer of rolls; building a mathematical model for studying the influence of the chemical composition and structure of cast iron on the level of hardness and coercive force; using the

coercimetric method to analyze the quality of rolled rolls. *Conclusions.* Forecasting the behavior of the rolls during operation is inextricably linked to the analysis of the main factors on which the level of properties and operational stability of the working layer depend. The properties of high-chromium alloys are closely related to the type of phases formed and their ratio. The amount of residual austenite and martensite in the structure of the alloy has the greatest influence on the properties of the alloy (in the studied interval of changes in the proportion of phases). The operational layer of two-layer high-chromium rolls is characterized by a high level of residual stresses. Exceeding the permissible level of stresses or their unfavorable distribution can cause premature destruction during the operation of the roll. With the help of the coercimetric express method, it is possible to solve a fairly wide range of tasks of quality control of rolls, related to the determination of the level and distribution of residual stresses in the working layer of the rolls. This is because the intensity of the process of formation of thermal cracks under conditions of thermo-cyclic loading largely depends on the level of residual compressive stresses. Too high a level of stresses or their unfavorable distribution can cause premature destruction of the working layer of the roll, because the typical type of destruction due to an unbalanced distribution of stresses is cracking. A local increase in the level of coercive force can be the basis of the prediction of crack formation.

Key words: high chromium cast iron, rolling rolls, coercive force, residual austenite, martensite, carbides.

Відомості про авторів:

Попова Олена Георгіївна, к. т. н., доцент кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства (№ 403), тел. (+38) 067-570-12-17, e-mail: o.popova@khai.edu, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна.

Лалазарова Наталія Олексіївна, к.т.н., доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. (+38) 095-390-38-16, e-mail: lalaz1932@gmail.com. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна.

Остапчук Валентина Віталіївна, старший викладач кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства (№ 403), тел. (+38) 093-574-99-67, e-mail: v.ostapchuk@khai.edu, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна.

About the Authors

Popova Olena, PhD, Associate Professor, Department of Composite Structures and Aviation Materials, (+38)067-570-12-17, e-mail: o.popova@khai.edu, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine.

Lalazarova Nataliia, PhD, Associate Professor, Department of Technology of Metals and Materials Science, tel. (+38) 095-390-38-16, e-mail: lalaz1932@gmail.com, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine.

Ostapchuk Valentyna, Senior Lecturer, Department of Composite Structures and Aviation Materials, (+38) 093-574-99-67, e-mail: v.ostapchuk@khai.edu, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine.