

Ю.О. Харламов, д.т.н., проф.  
М.А. Будаг'янц, д.т.н., проф.  
В.О. Шевченко, асист.

Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля

### МЕХАНІЧНА ОБРОБКА ВІДЦЕНТРОВОЛИТИХ ЧАВУННИХ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ

*Розглянуті особливості структури робочого шару чавунних двошарових прокатних валків, що отримують за технологією відцентрового лиття, та його вплив на оброблюваність валків шліфуванням. Проаналізовано процес стружкоутворення на основі експериментального дослідження морфології часток стружки та її дисперсного складу й структури.*

Відцентроволиті прокатні валки виконують двошаровими, внутрішня частина їхньої бочки виконується із сірого чавуну а робочий зовнішній шар – з вибіленого чавуну. Особливості гетерогенної структури і висока твердість цього шару обумовлюють його знижену оброблюваність різанням. Однак механізм процесів різання валкових чавунів, як і матеріалів з гетерогенною структурою в цілому, у тому числі стружкоутворення при їхньому шліфуванні, залишається маловивченим [1–4]. Це утруднює оптимізацію та підвищення ефективності технологічних процесів виробництва валків. Дана робота присвячена вивченню стружкоутворення при шліфуванні легованих чавунів з вибіленою структурою гетерогенного характеру.

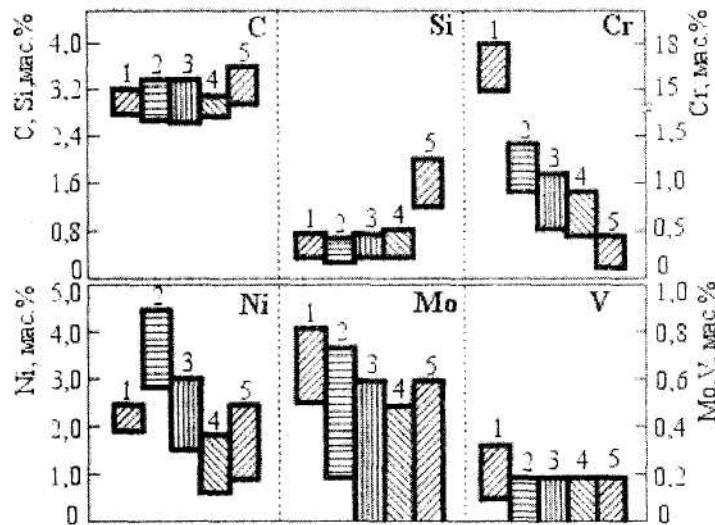


Рис. 1. Склад відбіленого шару прокатних валків:

1 – валки виконань ЛПХ17НМ-71; ЛПХ17НМФ-70; 2 – валки ЛПХН-71; ЛПХНМ-72, 73, 76; ЛПХНМД-71; 3 – валки ЛПХН-63; ЛПХНМ-65; ЛПМ-59; СПХН(Ф)-60, 65; СПХНМ-59, 66; СПХНМД-63, 65; 4 – валки СПХН(Ф)-41, 43, 45, 49; СПХНМ-42, 47; 5 – валки СПХН-41, 45, 47; СШХНФ-47; СШХНМ-42, 46

Валкові чавуни різних виконань відрізняються складом, структурою, фазовим складом, твердістю та іншими властивостями (рис. 1 і 2). Структура чавунів є основним чинником, який визначає їхню оброблюваність. Відбілений шар на боці валка глибиною 25...40 мм формується в умовах прискореної кристалізації доєвтектичного розплаву у металевій частині комбінованої ливарної форми. Робочий шар із чавуну з кулястим графітом (ЧКГ) має типову структуру половинчатих чавунів – металева матриця + цементит + графіт. Виняток складають двошарові валки ЛШ-56, 58 з чистим відбілом і незначною кількістю точкового графіту.

Найважливішою складовою валкових чавунів є карбідна фаза. Типи карбідів, їхня кількість, форми виділення, склад та властивості є визначальними факторами не тільки експлуатаційних властивостей валків, але й їхньої оброблюваності. У чавунах, що містять менше 4 мас. % Cr; 2,8...3,4 мас. % C; 0,8...4,0 мас. % Ni; до 2 мас. % Si, карбідна фаза

утворена евтектичним та вторинним цементитом мікротвердістю 8,4...11 ГПа з узагальненою формулою  $(Fe, Me)_x C_y$ , де Me – елементи, що замінюють залізо в кристалічних ґратках карбиду – Mn, Ni, Cr, Mo, V;  $x \approx 2,8...3$ ;  $y = 1$ . Первинні кристали  $(Fe, Me)_x C_y$  являють собою відособлені великі цементитні пластини зі стовпчиками мартенситу, що містять 60 об. %  $(Fe, Me)_x C_y$  і 40 об. %  $\alpha$ -Fe.

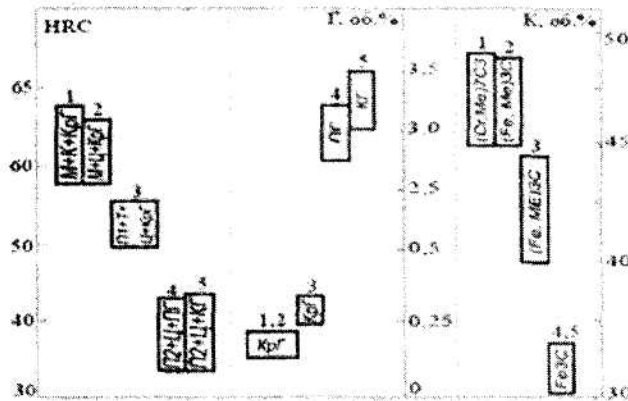


Рис. 2. Параметри структури та твердість валкових чавунів: 1 – високохромисті мартенситні чавуни; 2 – хромонікелеві чавуни мартенситного класу; 3 – чавуни з перлітовою та троосто-перлітовою структурою металової основи і точковим графітом; 4 – чавуни з кулястим графітом; 5 – чавуни з пластинчастим графітом; КрГ – точковий графіт; ПГ – пластинчастий графіт; КГ – кулястий графіт; М – мартенсит; П<sub>1</sub>, П<sub>2</sub> – відповідно зернистий та пластинчастий перліт; Т – троостит; К – карбіди; Ц – легований цементит

Найменша кількість евтектичних та вторинних карбідів  $(Fe, Me)_x C_y$  (~30 об. %) міститься у відбіленому шарі прокатних валків виконань: СПХН-45,49, ЛШН-45,50, ЛШ-48, СПХН-41,45,47,50, СПХНМ-46 (HSh < 48...50, HRC < 33...35). При збільшенні твердості відбіленого шару (валки виконань ЛШ-58, ЛП-58, ЛНМ-59, СХН-60,65, СПХНМ-58, СП-62, СПХНМД-63; HSh  $\approx$  60...70, HSh  $\approx$  60...70, HRC  $\approx$  44...52) кількість карбідів зростає до 35...37 об. %. У найбільш твердих чавунах (відбілений шар валків ЛШН-63,71, ЛПХНМ-73,76; HRC  $\approx$  60...64) із вмістом графіту менше 0,5 % об'ємна частка легованого цементиту складає 45...48 % (рис. 3).

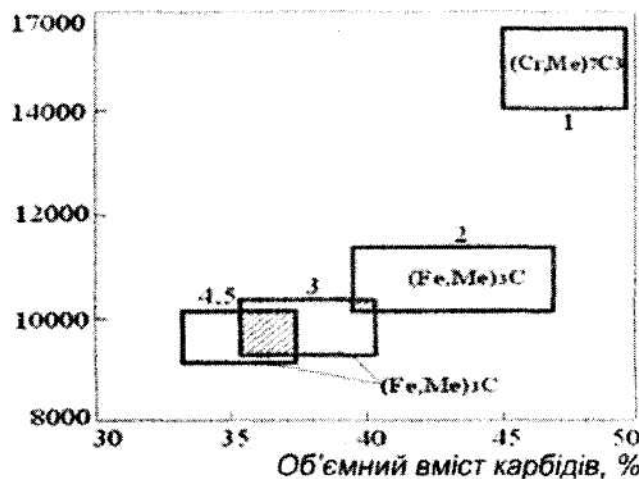


Рис. 3. Мікротвердість, типи та об'ємний вміст карбідів у відбіленому шарі прокатних валків; позначення 1–5 відповідають групам валкових чавунів за твердістю

Найбільша кількість карбідів  $(Fe, Me)_3 C$  (40...45 об. %) утвориться у відбіленому шарі відцентроволитих прокатних валків ЛПХН-63,70,71 і ЛПХНМ-73,76 твердістю 60...64 HRC. Компактні включення вторинного цементиту розміром 4...10 мкм рівномірно розподілені в об'ємі матричного металу (троостит, троосто-мартенсит, голковий мартенсит з ділянками аустеніту, що не розпався).

Твердість низьколегованих білих чавунів у концентраційному інтервалі вуглецю 2,8...3,4 % лінійно зв'язана з його масовою часткою у складі карбідів і збільшується при зменшенні кількості графіту відповідно до емпіричного рівняння:  $HSh = 16,67 (\% C_{CB}) + 13$ .

У високохромистих чавунах, що містять 12...18 мас. % Cr і 2,9...3,2 мас. % C, 1,0...2,5 мас. % Ni; 0,5...0,6 мас. % Si, при швидкості охолодження 2...25 °C/хв формуються наступні карбідні фази:

Тип карбїду	Вміст елементів, мас. %				Мікротвердість карбїдів, МПа	Об'ємний вміст, %
	Cr	Fe	Mn	C		
$(Cr, Me)_7C_3$	~55	~35	1,2...1,4	-	14000...17000	35...40
$(Fe, Me)_x C_y$	~30	~60	-	6,67	9500...11000	5...12

Цементит утворить тонкі пластинки товщиною 10...15 мкм або потовщені компактні включення всередині зерен. Вторинні карбїди хрому мають форму багатогранників та сферичних включень розміром 3...6 мкм. Евтектичні карбїди складаються зі стрижневих кристалів  $(Cr, Me)_7C_3$  товщиною 15...30 мкм, розділених металевими прошарками. Об'ємна частка металевої фази в карбїдній евтектиці складає 38 %, карбїдів – 62 %.

У процесі високотемпературного відпуску при 540...590 °C карбїди цементитного типу переходять у складні леговані карбїди, що розташовуються навколо евтектичних карбїдів. Тому карбїдна фаза високохромистих чавунів (2,5...3,2 % C і 14...19 % Cr), відпущених при температурі більше 550 °C, представлена переважно легованими карбїдами  $M_7C_3$ . Комплексні карбїди  $(Cr, Me)_7C_3$  містять 60...65 % Cr; 34...39 % Fe і 1,24...1,34 % Mn. Їхня мікротвердість складає 14...17 ГПа. Карбїдами зв'язано 12,5...14,0 % хрому при його загальному вмісті у сплаві 17,0...18,8 %. Інші 3,0...6,3% Cr знаходяться у твердому розчині та цементиті.

Аналізу оброблюваності піддані валки двох наступних марок:

Марка валка	Вміст елементів, мас. %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni/Cu		S	P
ЛПХНМ-73	3,2	0,6	0,5	1,2	3,4/-	0,6 Mo	0,1	0,3
ЛПХ17НМ-71	2,9	0,6	1,2	17	2,1/0,6	0,6Mo; 0,17V; 0,05Ti	0,07	0,03

Структура відбіленого шару цих валків характеризується наступними даними:

Виконання валка	Металева основа	Твердість, HRC	Карбїдна фаза		Графіт, об. %
			Склад та кількість	$H_v$ , ГПа	
ЛПХ17НМ-71	мартенсит	61...63	$(Cr, Me)_7C_3$ , $(Fe, Me)_3C$ , 45...48 об. %	14...17	< 0,2 % (глибина 1...5 мкм)
ЛПХНМ-73	мартенсит	60...62	$(Fe, Me)_3C$ , 44...48 об. %	10...11	

Обдирне шліфування валків здійснювалося кругами середньої твердості 25AC2D07 на керамічній зв'язці у присутності ЗОР (1 %-й розчин кальціюваної соди у воді). Шлами, що утворюються, являють собою вологу пастоподібну суміш чавунної мікростружки, абразивних зерен та компонентів зв'язки шліфувальних кругів з розміром часток 0,005...2,500 мм. На тонну металу, що знімається, витрачається в середньому 350...450 кг абразивного матеріалу. Тому шлами, крім чавунної стружки, містять досить багато відходів у вигляді продуктів руйнування шліфувальних кругів. Тому шлами піддавали поділу за спеціальною технологією з виділенням часток стружки.

Для аналізу процесу стружкоутворення вивчена морфологія часток металевої складової шламів. Незважаючи на однакові умови та режим шліфування, металеві частки зі шлами відбіленого шару хромонікелевих (ЛПХНМ-73) і високохромистих (ЛПХ17НМ-71) прокатних валків мають істотні відмінності за дисперсним складом (рис. 4). Частки високохромистого чавуну відрізняються більш вузьким фракційним складом (крива 1) з перевагою часток фракції 50...63 мкм. У металевої складової шламів із хромонікелевого чавуну переважають фракції часток 63...100 і 100...200 мкм.

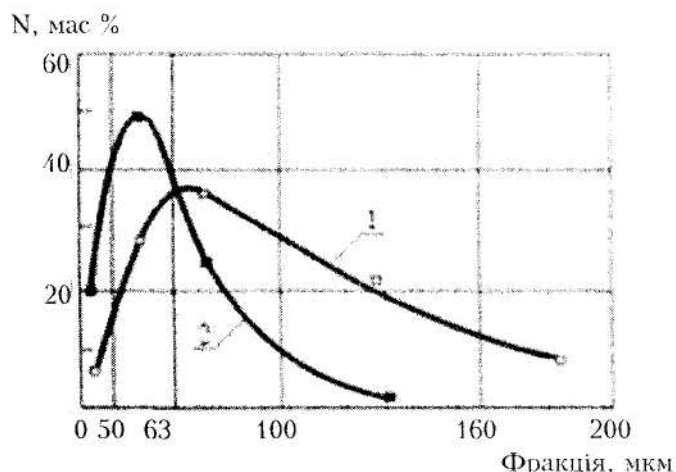


Рис. 4. Гранулометричний склад стружки відбіленого шару прокатних валків:  
1 – ЛПХНМ-73; 2 – ЛПХ17НМ-71

Металеві частки у порошках хромопеленого та високохромистого чавунів фракції 50...63 мкм мають форму пластинок і мікростружок товщиною 10...18 мкм із рваними краями та зазубринами з різним відношенням довжини до ширини. Довжина пластинок складає 50...60 мкм, ширина – 30...55 мкм. Їхній обсяг еквівалентний обсягу сферичних часток діаметром 30...50 мкм, а коефіцієнт несферичності ( $\Phi$ ), визначений як відношення площі поверхні сферичних часток ( $S_{sf}$ ) до площі поверхні несферичних часток ( $S_p$ ) рівних обсягів, складає ~ 0,45...0,55.

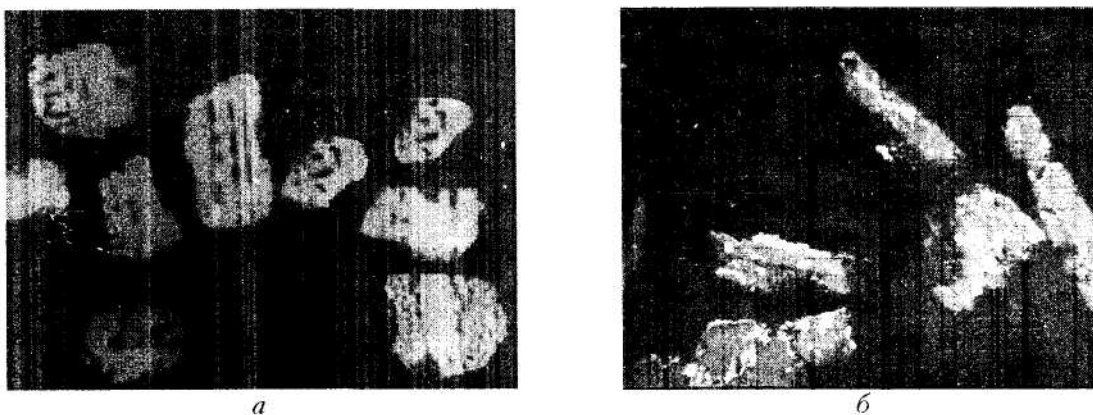


Рис. 5. Мікроструктура часток стружки фракції 63...100 мкм із чавунів  
ЛПХНМ-73 (а) і ЛПХ17НМ-71 (б); збільшення  $\times 250$

Частки фракції 63...100 мкм мають неправильну форму у вигляді осколків (рис. 5) розміром 55 $\times$ 60 $\times$ 50...75 $\times$ 85 $\times$ 70 мкм, обсяг яких еквівалентний обсягу сферичних часток діаметром 70...100 мкм, а коефіцієнт несферичності змінюється у межах 0,8...0,9.

В обох фракціях міститься незначна кількість (3...5 %) часток голчастої морфології товщиною 5...10 мкм та довжиною 40...120 мкм.

У стружці фракції 50...100 мкм із валків ЛПХНМ-73 можна виділити два основних типи, що принципово відрізняються за структурою. Частки першого типу утворені колоніями евтектичного цементиту (ледебуриту), що містить 60 об. %  $(Fe, Me)_3C$  та 40 об. % мартенситу. Їхня структура аналогічна структурі евтектичних залізовуглецевих сплавів, що містять 4,0...4,3 мас. % С.

Частки другого типу, кількість яких у загальному об'ємі стружки складає 45...50 %, містять тільки вторинний цементит. Їхній хімічний склад істотно відрізняється від хімічного складу відбіленого шару прокатних валків. У доевтектичних сплавах із 3,0...3,1 % С



евтектична точка при вмісті хрому 1,1...1,3 мас. % і кремнію 0,5...0,6 мас. % складає 1,85...1,90 мас. % С. Інші 1,2...1,3 мас. % вуглецю знаходяться в складі карбідної евтектики. Отже, концентрація вуглецю в частках зі структурою мартенсит + вторинний цементит не перевищує 1,9 мас. %. Необхідно відзначити, що це значення отримане без прийняття до уваги можливого викришування вторинних карбідів при підфінанні валків.

Стружка фракції 50...63 мкм містить 93...95 % часток зі структурою мартенсит + вторинний цементит, аналогічною структурі високовуглецевих заевтектоїдних сталей. Включення вторинного цементиту мають форму пластин довжиною 4...8 мкм із відношенням довжини до ширини 2:1...4:1. Кількість часток, що містять ледебурит, не перевищує 5...7 % (рис. 6).

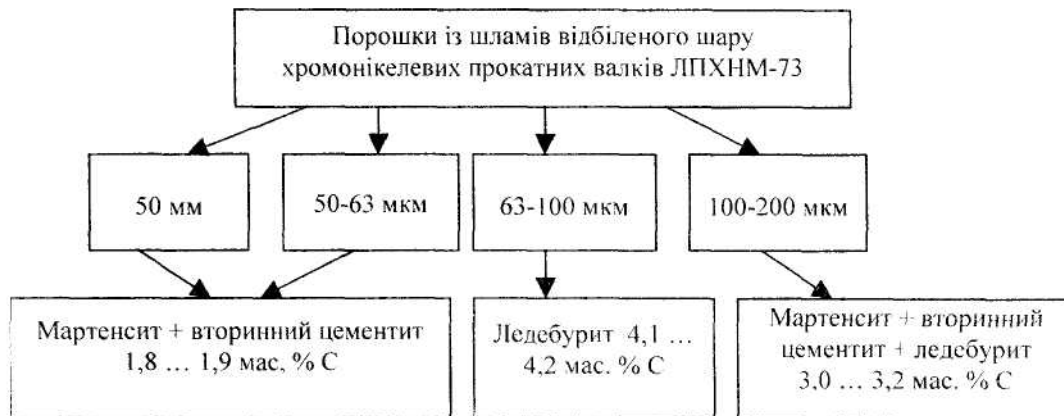


Рис. 6. Класифікація часток стружки чавуну ЛПХНМ-73 за структурою та дисперсним складом

У стружці фракції 63...100 мкм практично всі частки (більше 90 %) мають структуру евтектичного цементиту. Великі цементитні пластинки з тонкими мартенситними прошарками цілком займають об'єм окремих часток. Стружка фракції 100...200 мкм містить частки зі структурою вихідних доевтектичних чавунів – ледебурит + мартенсит + вторинний цементит.

Для стружки зі шламів легованих чавунів поряд зі структурною мікронеоднорідністю характерна структурна макронеоднорідність – різна структура окремих часток. Наявність у стружці хромонікелевого чавуну різномірних за структурою часток та залежність структури часток від дисперсності порошоків обумовлені структурною гетерогенною неоднорідністю вихідних литих чавунів та різним рівнем фізико-механічних властивостей їх окремих структурних складових – мартенситу, вторинних та евтектичних карбідів. Як наслідок, при підфінанні прокатних валків спостерігається вибірковий характер руйнування відбіленого шару та нерівномірний перерозподіл карбідних фаз між окремими частками.

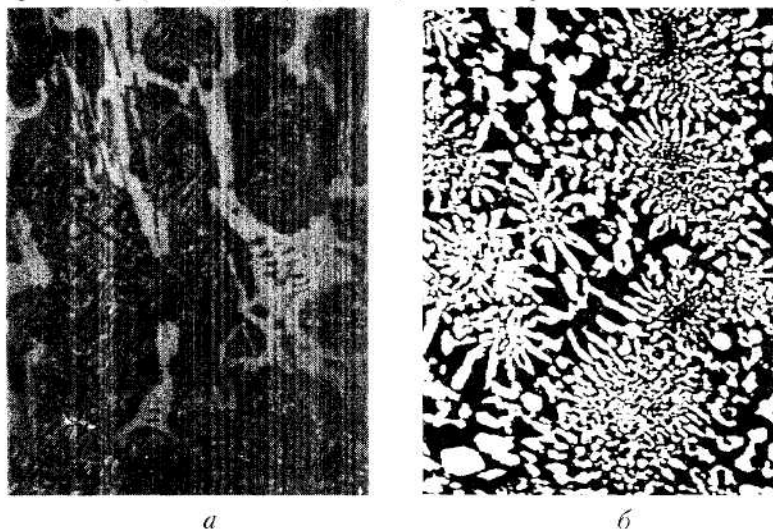


Рис. 7. Мікроструктура відбіленого шару прокатних валків ЛПХНМ-73 (а) та ЛПХ17НМ-71 (б); збільшення  $\times 300$

У відбіленому шарі прокатних валків ЛПХНМ-73 ділянки мартенситу із включеннями вторинного цементиту розділені сіткою евтектичних карбідів. Розміри зон зі структурою ледебуриту та з дисперсною мартенсито-карбідною структурою (мартенсит + вторинний цементит) порівняно з лінійними розмірами часток у порошках фракції 160...200 мкм і перевищують лінійні розміри металевих часток у порошках фракції 50...63 і 63...100 мкм (рис. 7, а).

Морфологія евтектичної складової високохромистих чавунів істотно відрізняється від типової стільникової морфології ледебуриту. Базою ледебуритної колонії в евтектичних і доевтектичних Fe-C-сплавах є цементитна пластинка, що проросла одним або декількома кристалами аустеніту (рис. 7, а). У високохромистому чавуні поперечний переріз ділянок евтектичних колоній має вид розеток або фашин з нез'язаними карбідними кристалами розміром 4...20 мкм (рис. 7, б). Центральну частину колоній утворюють карбіди з гексагональним огранюванням (10...20 мкм) або неправильною формою (4...10 мкм). На початкових етапах евтектичної кристалізації стрижневий кристал карбіду та його відгалуження обростають аустенітом. Аустеніт, що має більшу, ніж кристал евтектичного карбіду, лінійну швидкість росту, утворює кільцеву матричну оболонку навколо карбідної розетки.

Зазначені структурно-морфологічні особливості евтектичних карбідів у високохромистих чавунах забезпечують значне підвищення їхньої міцності, пластичності та зносостійкості у порівнянні з хромонікелевими чавунами. Так, наприклад, опір розриву робочого шару високохромистих прокатних валків при вмісті хрому 16...18 %, вуглецю 3,0...3,1 %, молібдену 0,5...0,7 % і нікелю 1,5...1,9 % складає 700...750 МПа [1]. Ця величина близька до межі міцності термооброблених сталей 55Х, 60ХН і 90ХФ, у яких  $\sigma_y \approx 680...800$  МПа. Межа міцності на розтяг відбіленого шару прокатних валків ЛПХНМ-72,73 (2,8...3,2 % С; 0,8...1,1 % Cr; 0,6...0,8 % Мо) складає 230...250 МПа [1], валків з легованого високоміцного чавуну (3,0...3,4 % С; 0,3...0,6 % Cr; 0,15...0,4 % V; 0,02...0,04 % Nb; 0,2...0,3 % Ti; 1,0...1,2 % Ni; 0,01...0,02 % Mg; 0,01...0,02 % S; 0,15...0,2 % P) – 300...320 МПа [2]. Ударна в'язкість білих чавунів, що містять 3,0...3,3 % С; 0,8...1,2 % Cr; 2,5...4,0 % Ni і 0,6...0,8 % Мо, складає 0,03...0,04 МДж/м<sup>2</sup>, високохромистих чавунів – 0,11...0,12 МДж/м<sup>2</sup>.

Зазначені фактори і є відповідальними за стружкоутворення при взаємодії одиничних абразивних зерен із поверхнею чавунного валка. Як відомо, зняття шару та утворення стружки може відбуватися за допомогою двох типів руйнування: шляхом зрізування, здійснюваного дотичними напруженнями, та шляхом відривання, здійснюваного нормальними напруженнями [4]. Ймовірність виникнення одного з двох видів руйнування обумовлена механічними властивостями оброблюваного матеріалу, які визначають його крихкість та пластичні властивості, і схемою напруженого стану. При більш яскраво вираженій гетерогенній структурі хромонікелевих чавунів більш інтенсивно розвивається викришування, у процесі різання викришуються відносно великі карбідні зерна. Для високохромистих чавунів більш високі твердість та об'ємний зміст карбідної фази є причиною зменшення глибини проникнення абразивних зерен і відповідного зменшення товщини стружки.

#### Висновки:

1. Стружка фракції 50...100 мкм зі шламів хромонікелевих чавунів, що містять 1,1...1,3 мас. % Cr; 3,0...4,5 мас. % Ni; 2,8...3,0 мас. % С, є механічною сумішшю часток різної структури та хімічного складу. У ній містяться частки різних структурних типів: 1) зі структурою евтектичного цементиту, аналогічної структурі литих евтектичних чавунів; 2) зі структурою – мартенсит + вторинний цементит, аналогічною структурі високовуглецевих заевтектоїдних сталей; 3) зі структурою вихідних литих чавунів – мартенсит + вторинний цементит + ледебурит, аналогічною структурі високовуглецевих заевтектоїдних сталей.

2. Структура та хімічний склад стружки шліфування високохромистих чавунів для різних фракцій однакові. Це дозволяє використовувати відходи як порошок для нанесення захисних покриттів.

3. Подальші дослідження обробки чавунних валків варто проводити в напрямку підвищення продуктивності шліфування та оптимізації процесу стружкоутворення з метою одержання відходів, придатних для використання в якості порошоків.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Прокатные валки из высокоуглеродистых сплавов / Т.С. Скобло, Н.М. Воронцов, С.И. Рудюк и др. – М.: Металлургия, 1994. – 336 с.
2. *Будагьянц Н.А., Карский В.Е.* Литые прокатные валки. – М.: Металлургия, 1983. – 175 с.
3. *Якимов А.В.* Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.
4. *Подураев В.Н.* Технология физико-химических методов обработки. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.

ХАРЛАМОВ Юрій Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри зварювання Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля.

Наукові інтереси:

- технологія виробництва литих чавунних валків.

БУДАГ'ЯНЦ Микола Абрамович – доктор технічних наук, професор кафедри зварювання Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля.

Наукові інтереси:

- інженерія поверхні;
- теорія і технологія напилених газотермічних покриттів.

ШЕВЧЕНКО Володимир Олексійович – асистент кафедри зварювання Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля.

Наукові інтереси:

- теорія і технологія напилених газотермічних покриттів.

Подано 01.07.2003