

## ПЛАЗМОВО-ДУГОВИЙ ПЕРЕПЛАВ ПІДШИПНИКОВОЇ СТАЛІ ШХ15

**В.О. Шаповалов, В.Р. Бурнашев, Т.І. Грищенко, Ю.О. Никитенко, В.В. Якуша**

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Показано, що плазмово-дуговий переплав сталі ШХ15 завдяки інертній атмосфері (аргону) в камері печі сприяє значному очищенню від неметалевих включень та газових домішок, що вказує на високу рафінуючу здатність плазмово-дугової обробки металу. Бібліогр.8, табл. 3, рис. 5.

*Ключові слова:* підшипникова сталь ШХ15; плазмово-дуговий переплав; режими переплаву; неметалеві включення; аргон; кристалізатор; зливоч

Несприятливий вплив неметалевих включень (НВ) на фізико-механічні властивості підшипникової сталі ШХ15 в першу чергу залежить від їх природи, розмірів і розподілення в металі. Збільшення вмісту в сталі твердих гострокутних включень, які не деформуються, типу корунду, шпінелей, алюмосилікатів призводить до зниження всього комплексу фізико-механічних властивостей підшипникової сталі і зменшення довговічності підшипників. Характерною особливістю умов роботи підшипників є наявність досить значних циклічних навантажень, що супроводжуються великими контактними напруженнями (600 кг/мм<sup>2</sup>) [1]. З огляду на те, що швидкості обертання в деяких виробках досягають десятки і сотні тисяч обертів на хвилину, то на перше місце виходить якість підшипникових сталей. Чим вище забрудненість заготовок, тим більша ймовірність попадання включень в зону підвищених контактних напружень в деталях підшипника і тим нижча його довговічність. Одним із шляхів підвищення експлуатаційної стійкості підшипників є виготовлення їх зі сталей підвищеної чистоти, які виробляються способами спеціальної електromеталургії, такими як ЕШП, ВДП, ЕПП та іншими рафінуючими переплавами. Цей шлях успішно реалізується і довговічність підшипників з сталей спеціальних способів переплавки значно вища, ніж зі сталей звичайної виплавки [2, 3]. Одним з рафінуючих переплавів спеціальної електromеталургії є плазмово-дуговий переплав (ПДП) в інертній атмосфері. Рафінування металу при ПДП полягає у видаленні неметалевих включень, газів, розчинених в металі, та інших шкідливих домішок.

Здійснюються ці процеси за допомогою різних металургійних реакцій, а саме шляхами виносу включень на поверхню метал-газ при плавці в інерт-

ній атмосфері, розкислення воднем при плавці в атмосфері аргон+водень [4] та хімічної взаємодії зі шлаком при плазмово-шлаковому процесі [5].

До процесу вибіркового випаровування металевих домішок близький процес десорбції газів з поверхні рідкого металу. Десорбція термодинамічно можлива, якщо концентрація газу, розчиненого в металі, більше концентрації металу, що відповідає рівновазі з газовою фазою.

Експериментальні дані по плазмово-дуговому переплаву сталей і сплавів показали помітне зниження вмісту водню після переплаву [4–8]. Видалення з ме-

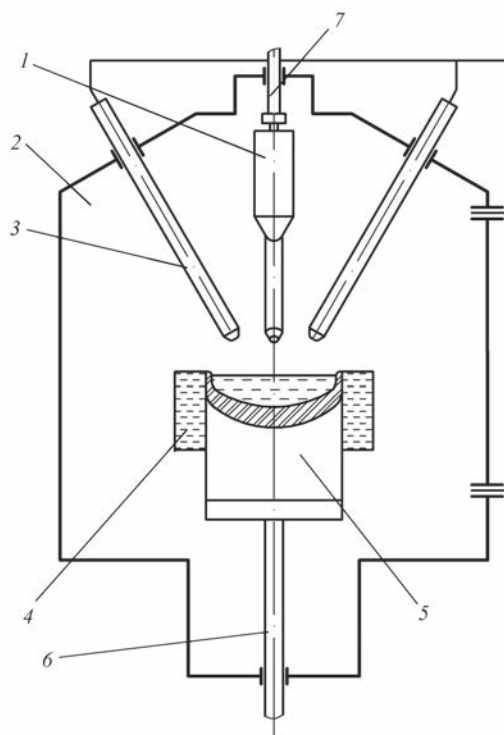


Рис. 1. Схема плазмово-дугової печі УПП-3 (1–7 див. в тексті)

В.О. Шаповалов — <http://orcid.org/0000-0003-1339-3088>, В.Р. Бурнашев — <http://orcid.org/0000-0001-6807-3810>,  
Т.І. Грищенко — <http://orcid.org/0000-0001-7840-9832>, Ю.О. Никитенко — <http://orcid.org/0000-0002-3603-2333>,  
В.В. Якуша — <http://orcid.org/0000-0001-5962-9194>



Рис. 2. Зливки сталі ШХ-15, виплавлені на печі УПП-3 талу азоту спостерігалось, головним чином, коли він перебував в розплаві у вигляді нітридів.

**Матеріали та методика досліджень.** Ця робота присвячена вивченню впливу технологічних параметрів плазово-дугового перепау на якість підшипникової сталі ШХ15. В якості вихідного металу сталі ШХ15 були використані заготовки, виплавлені в електродуговій печі за стандартною технологією. Потім зливки деформували на круг діаметром 80 мм і різали на заготовки довжиною 700 мм.

Експерименти проводили в плазово-дуговій печі УПП-3 (рис. 1).

Піч оснащена чотирма плазмотронами з постійного струму ПДМ-7 конструкції ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України загальною потужністю 120 кВт. Радіальна схема розташування плазмотронів забезпечує рівномірний обігрів ванни рідкого металу, а за рахунок цього і більш сприятливу конфігурацію ванни. Піч УПП-3 також оснащена механізмом подачі заготовки в зону плавки 7, мідним водоохолоджуваним кристалізатором діаметром 100 мм 4 та механізмом витягування зливка 6.

Експерименти починали з того, що підвищували заготовку діаметром 80 мм та довжиною 700 мм 1 на механізм подачі заготовки. Камеру печі 2 закривали і проводили вакуумування за допомогою вакуумного насоса ВН-2 до тиску  $1 \cdot 10^{-1}$  МПа. Після цього камеру печі заповнювали аргоном. При досягненні робочого тиску 0,25 МПа проводили перепау заготовки в прохідний кристалізатор діаметром 100 мм. В якості плазмотворючого газу

Таблиця 1. Основні технологічні параметри перепау сталі ШХ15

Плавка	Швидкість витягування зливка, мм/хв	Тиск газу в плавильній камері, МПа	Загальна потужність плазмотронів, кВт	Щільність енергії, кВт/см <sup>2</sup>	Витрата аргону, л/год	Флюс
1	3	0,25	40	0,51	1680	–
2	–»–	–»–	–»–	–»–	–»–	–
3	6	–»–	48	0,611	1920	–
4	–»–	0,4	–»–	–»–	–»–	+

використовували аргон (ГОСТ 10157–74). Витрату плазмотворючого газу контролювали ротаметрами (загальний тиск в камері — ротаметром РС-5, а на кожному плазмотроні було встановлено по ротаметру РС-3). При цьому варіювали такими технологічними параметрами, як витрата газу, тиск газу в камері, швидкість витягування зливка, потужність, а також в деяких плавках застосовували флюс. Флюси були виготовлені шляхом сплавлення хімічно чистих реактивів СаО та СаF<sub>2</sub>. Сплавлений моноліт флюсу розмелювали і поділяли на фракції. При перепаві флюс розміром зерен  $\leq 1$  мм подавали порціями за допомогою спеціального пристрою — дозатора. Інтервал між присадками становив 2...4 хв в залежності від швидкості витягування зливка 5. Режими проведення плавки приведені в табл. 1.

**Результати досліджень.** В результаті проведених експериментів при перепаві заготовок сталі ШХ15 в плазово-дуговій печі УПП-3 були отримані зливки наступних розмірів: діаметр — 100 мм, довжина — 450 мм, вага — 27 кг (рис. 2).

Виплавлені зливки було досліджено на хімічний склад. Визначення масової частки кремнію, марганцю, хрому, міді, нікелю виконували методом спектрального аналізу на квантометрі ДФС-10 (відносна похибка 2 %). Масову частку в металі вуглецю визначали кулонометричним методом на АН-160 (абсолютна похибка  $5 \cdot 10^{-4}$  %), кисню, азоту, водню — методом вакуумного плавлення на газоаналізаторах фірми Leco (RO-16, TN-14, TC-30) та фірми

Таблиця 2. Хімічний склад виплавлених зливок сталі ШХ15, мас. %

Зразок	Вміст основних легуючих елементів				Вміст домішок (не більше)						Вміст газів	
	C	Mn	Si	Cr	S	P	Ni	Cu	Ni+Cu	Ti	[O]	[N]
ГОСТ 801–78	0,95...1,1	0,2...0,4	0,17...0,37	1,3...1,65	0,020	0,027	0,30	0,250	0,50	0,1	–	–
1	1,05	0,42	0,28	1,65	0,010	0,008	0,09	–	0,09	–	0,0076	0,0148
2	1,0	0,37	0,27	1,63	0,006	0,060	0,041	0,033	0,0074	–	0,0044	0,023
3	–»–	–»–	–»–	1,65	0,009	0,010	0,02	–	0,02	–	0,0020	0,0096

Примітка. 1 — після ЕДП; 2 — після ПДП; 3 — після ПДП з флюсом.

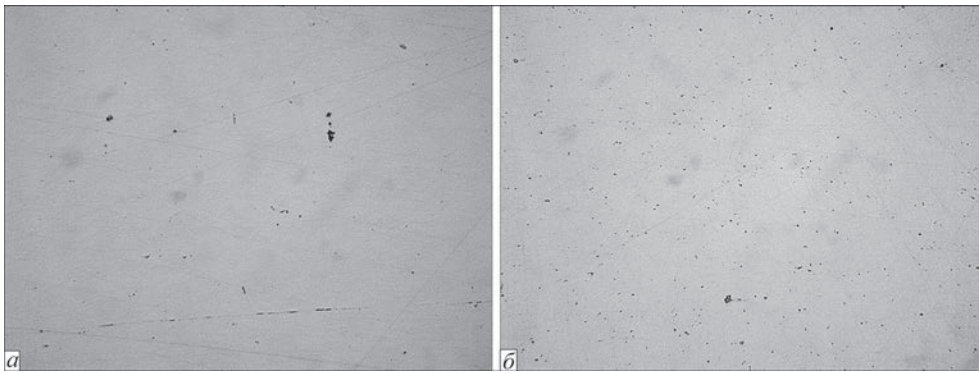


Рис. 3. Неметалеві включення у зразках 1 (а) та 3 (б) сталі ШХ15,  $\times 200$

Нереус — УН-8 (відносна похибка  $\pm 1 \cdot 10^{-4} \%$ ). Результати цих досліджень приведені в табл. 2.

За даними хімічного аналізу (табл. 2) впливає, що вміст вуглецю трохи нижче, ніж у вихідній заготовці, також спостерігається зниження вмісту кремнію, сірки, фосфору, нікелю та міді. При проведенні переплавки з флюсом десульфурація металу йде досить ефективно, однак всі показники хімічного складу сталі ШХ15 знаходяться в межах норми і не виходять за граничні показники ГОСТ 801–78.

Після вивчення хімічного складу зливки прокатили на круг діаметром 36 мм. З донної та головної частин відібрали зразки для газового аналізу. Вміст газових домішок визначали методом вакуумного плавлення. З даних, наведених у табл. 2, впливає, що при ПДП відбувається інтенсивна дегазація металу. Загальний вміст газів знижується в 2 рази, кисню — в 2,3, азоту — в 3, водню — незначно.

Найменший вміст газів отримано в металі плавки, що проведена на підвищеній потужності при швидкості витягування зливка 6 мм/хв.

Для оцінки забрудненості неметалевими включеннями від кожної плавки відбирали зразки із донної та головної частин зливка. Оцінку проводили на мікроскопі НЕОРНОТ-32. Для визначення об'ємної частки забрудненості металу неметалевими включеннями було застосовано автоматизований кількісний аналіз з переглядом великого числа полів зору.

Твердість по Вікерсу вимірювали на твердомірі М-400 фірми Лесо при навантаженні 100 г.

У досліджуваному зразку 1 (табл. 2) спостерігали такі неметалеві включення: точкові оксиди, сульфідні, оксісульфідні, рядки крихких силікатів, карбонітриди та поодинокі силікати (рис. 3, а).

Таблиця 3. Об'ємна частка неметалевих включень в сталі ШХ15

Зразок	Стан металу після	Об'ємна частка, %
1	ЕДП (вихідний)	0,262044577
2	ПДП (литий)	0,172037736
3	ПДП з флюсом	0,0327067

Забрудненість неметалевими включеннями відповідала балу 1 ГОСТ 1778–70.

У зразку 2 спостерігали аналогічні включення, але в меншій кількості, ніж в зразку 1. Найбільш чистий по неметалевим включенням зразок 3. У ньому спостерігалася невелика кількість точкових оксидів і сульфідів (рис. 3, б).

Об'ємна частка забруднення сталі ШХ15 неметалевими включеннями і розподіл включень за розмірами наведені в табл. 3 і на рис. 4 відповідно.

З даних, наведених у табл. 3, видно, що об'ємна частка неметалевих включень знижується майже в 10 разів, кількість дрібних включень — в 5, середніх — в 3 рази. Великих неметалевих включень не виявлено в зразку 3 (рис. 4).

Для виявлення мікроструктури зразки були протравлені 4%-ним розчином азотної кислоти в етиловому спирті.

Елементи мікроструктури оцінювали з використанням шкал ГОСТ 8233–56.

Мікроструктура зразка 1 — це сорбіт з безперервною карбідною сіткою (бал 6, ГОСТ 8233–56, шкала 5), твердість по Вікерсу ( $HV_{0,1}$ ) становить 283 кг·с/мм<sup>2</sup> (рис. 5, а).

Мікроструктура зразка 2 сорбітна з елементами карбідної сітки (бал 3, 4), твердість ( $HV_{0,1}$ ) — 285 кг·с/мм<sup>2</sup> (рис. 5, б).

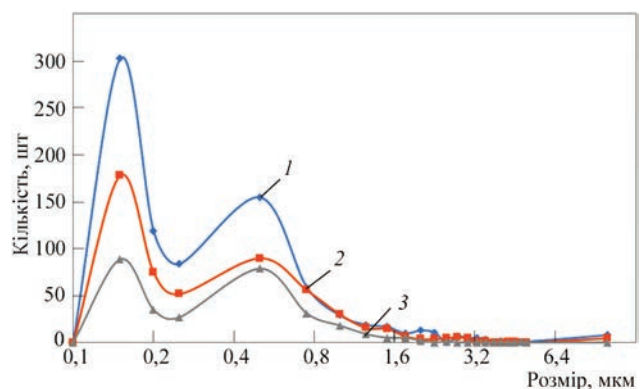


Рис. 4. Розмір та кількість неметалевих включень в зразках 1 (1); 2 (2); 3 (3) в залежності від способу виплавки (табл. 3)



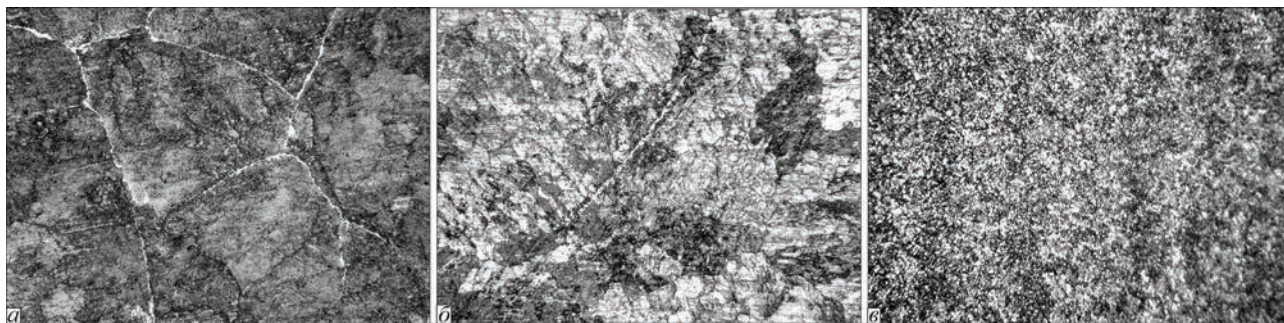


Рис. 5. Мікроструктура ( $\times 500$ ) зразків 1 (а); 2 (б); 3 (в)

Мікроструктура зразка 3 — дрібноігольчатий мартенсит з рівномірно розподіленими надлишковими карбідами. Карбідна сітка в зразку 3 практично не спостерігається, твердість ( $HV_{0,1}$ ) знаходиться в межах 326...394 кг·с/мм<sup>2</sup> (рис. 5, в).

### Висновки

1. Вивчено вплив технологічних параметрів плазмово-дугового переплаву на якість підшипникової сталі ШХ15. Зважаючи на відносно високу чистоту переплавленого металу, вплив швидкості переплавки і щільності енергії на забрудненість неметалевими включеннями, яку оцінювали методом максимального балу, не виявлено.

2. З наведених даних видно, що при плазмово-дуговому переплаві відбувається значне очищення металу від оксидних, силікатних і глобулярних включень.

3. При ПДП без флюсу незначно знижується вміст сірки, а також забруднення сульфідними включеннями. Однак при ПДП із застосуванням флюсів системи CaO–CaF<sub>2</sub> забрудненість металу сульфідними включеннями знижується в 2,5...3,5 рази.

4. Встановлено, що найбільш ефективним з точки зору очищення сталі ШХ15 від неметаліч-

них включень і газових домішок є ПДП з флюсом системи CaO–CaF<sub>2</sub>.

### References

1. Petrov, A.K., Shults, Yu.A. (1973) Problems of quality improvement of bearing steels and increase in service life of rolling bearings. In: *Tool and bearing steels*. Issue 1. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Gromov, V.I., Voznesenskaya, N.M., Leonov, A.V. (2019) New bearing steel VKS241 and steels with super-equilibrium content of nitrogen. In: *Proc. of All-Union Sci.-Tekh. Conf. on High-Strength Steels for Aerospace Engineering and Technologies of their Manufacture (06.09.2019, Moscow)*. Moscow, VIAM, 39–45 [in Russian].
3. Ma F., Song M. (2012) Опыт производства подшипниковой стали ШХ15 повышенной чистоты. *Металлург*, 5, 54–56.
4. Lakomsky, V.I. (1974) *Plasma-arc remelting*. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Tekhnika [in Russian].
5. Paton, B.E., Grygorenko, G.M., Shejko, I.V. et al. (2013) *Plasma technologies and equipment in metallurgy and foundry*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
6. Slyshankova, V.A., Lakomsky, V.I., Dzykovich, I.Ya. (1977) Crystallization and properties of steel ShKh15 produced by PAR method. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, 6, 75–81 [in Russian].
7. Zhdanovsky, A.A., Lakomsky, V.I. (1975) Regularities of evaporation and change of chemical composition of slags in plasma-slag remelting. In: *Refining remeltings*. Issue 5, Kiev, Naukova Dumka, 183–191 [in Russian].
8. Zhdanovsky, A.A., Lakomsky, V.I. (1974) Behavior of non-metallic inclusions in plasma-slag remelting. *Ibid.*, Kiev, Naukova Dumka, 231–239 [in Russian].

### PLASMA-ARC REMELTING OF ShKh15 BEARING STEEL

V.O. Shapovalov, V.R. Burnashev, T.I. Grishchenko, Yu.O. Nikitenko, V.V. Yakusha  
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

It is shown that owing to inert atmosphere (argon) in the furnace chamber, plasma-arc remelting of ShKh15 steel promotes considerable cleaning from nonmetallic inclusions and gas impurities that points to a high refining ability of plasma-arc processing of metal. Ref. 8, Tabl. 3, Fig. 5.

*Key words:* ShKh15 bearing steel; plasma-arc remelting; remelting modes; nonmetallic inclusions; argon; mould; ingot

Надійшла до редакції 05.02.2021



**X МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ**

**ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗВАРЮВАННІ І ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ**

Одеса, Україна, готель «Аркадія», 6–11 вересня 2021

Тел./Факс: (38044) 2008277; E-mail: journal@paton.kiev.ua; http://pwi-scientists.com/ukr/ltwmp2021