

## ИЗЫСКАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ НАПЛАВОЧНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*Исследована износостойкость, горячая твердость и твердость после нагрева стандартных наплавочных сплавов в условиях абразивного изнашивания при повышенных до 550 °С температурах. На базе проведенных исследований разработана самозащитная порошковая проволока для износостойкой наплавки скребков смесителей огнеупорного производства.*

**Ключевые слова:** износостойкость, твердость, горячая твердость, порошковая проволока, наплавка, скребки смесителей.

### Введение

Для повышения износостойкости деталей, эксплуатирующихся в контакте с абразивными частицами, возможны два основных пути синтеза износостойких сплавов:

- 1) создание материалов с метастабильной структурой, способной поглощать энергию, вносимую извне, и рассеивать ее путем фазовых и структурных превращений;
- 2) создание материалов с относительно термостабильной структурой.

Использование сплавов первой группы для многих быстроизнашиваемых деталей огнеупорного производства (пластины пресс-форм, гильзы и др.) эффективно и обеспечивает значительное повышение износостойкости за счет упрочнения поверхности при протекании  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. Однако, как показали наши исследования [1, 2], для условий интенсивного абразивного изнашивания при наличии повышенных (до 550 °С) температур, например, скребки смесителей огнеупорного производства, такие сплавы слабо сопротивляются воздействию абразивных частиц. Это связано с термическим разупрочнением матрицы сплава, что при наличии незначительного количества карбидной фазы приводит к резкому снижению ее твердости и, как следствие, к падению износостойкости.

Поэтому для сплавов, подверженных абразивному изнашиванию при повышенных температурах, перспективными являются материалы второй группы с термостабильной структурой. Относительная стабильность таких сплавов при нагреве до рабочих температур обеспечивается наличием в структуре значительного количества карбидной фазы, не претерпевающей существенных изменений в процессе нагрева до 550 °С.

### Материалы и методика исследований

Для повышения срока службы скребков наиболее перспективным является метод наплавки изнашиваемых мест скребка. Поэтому в дальнейшем для этой цели рассматривались только наплавочные материалы.

Изыскание сплавов для повышения срока службы скребков смесителей, эксплуатирующихся в условиях интенсивного абразивного изнашивания при повышенных температурах, проводилось в два этапа [3].

На первом этапе на основании анализа условий эксплуатации скребков смесителей определялись наиболее приемлемый для данных условий тип металлической матрицы износостойкого материала и максимально возможное, с точки зрения обеспечения технологической надежности, количество карбидной фазы. Затем из существующих наплавочных материалов выбирали несколько сплавов, наиболее полно удовлетворяющих этим требованиям. По результатам этих испытаний производили окончательный выбор материала, обеспечивающего повышение срока службы деталей.

Определенный таким образом сплав для заданных условий изнашивания является наиболее приемлемым из известных наплавочных материалов.

На втором этапе разрабатывался новый сплав, состав и структура которого обеспечивают требуемое сочетание износостойкости и эксплуатационной надежности.

В соответствии с данной методикой, на первом этапе были испытаны материалы, применяемые на различных огнеупорных заводах для повышения долговечности скребков смесительных аппаратов. Это – наплавочные порошкообразные смеси типа КБХ, сталинит и штучные наплавочные электроды типа Т-590, Т-620, сормайт (табл. 1).

**Результаты исследований и их обсуждение**

Микроструктура сплавов, наплавленных этими материалами, представляет собой заэвтектическую матрицу с различным количеством и морфологией избыточной карбидной фазы. Твердость наплавок составляет 50-58 HRC.

Срок службы скребков, упрочненных такими наплавочными материалами, находится приблизительно на одном уровне, составляет 4-5 суток и не удовлетворяет производство.

В условиях эксплуатации скребков смесителей, когда в процессе изнашивания кромки нагреваются до 550 °С, важной характеристикой состояния металла является его горячая твердость. А также способность восстанавливать исходную твердость после нагрева до температур изнашивания и охлаждения до комнатной температуры, так как в процессе эксплуатации скребков происходит их периодическое охлаждение до комнатных температур при загрузке новых порций перемешиваемой шихты, а также при плановых периодических остановках смесительного аппарата.

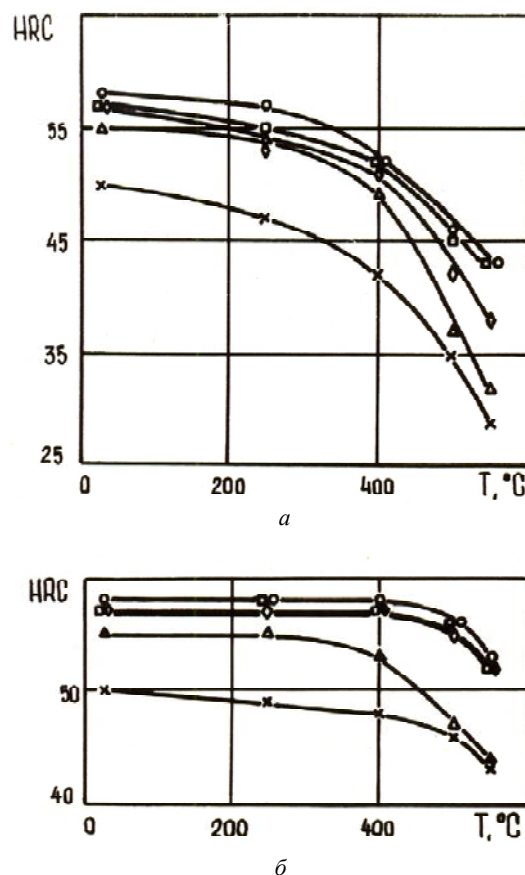
В связи с этим были проведены дюрOMETрические исследования сплавов, используемых огнеупорными заводами для наплавки скребков смесителей, результаты которых представлены на рис. 1.

Горячая твердость и твердость после охлаждения исследованных наплавок при нагреве до максимальных температур эксплуатации скребков (500-550 °С) существенно снижается.

Исходя из соображений технологичности, наиболее приемлемым наплавочным материалом для упрочнения скребков смесителей является порошковая проволока с внутренней защитой, позволяющая вести процесс наплавки полуавтоматическим способом открытой дугой.

Поэтому в дальнейшем из стандартных наплавочных материалов были отобраны две порошковые проволоки ПП АН-125 и ПП АН-170. Срок службы скребков, наплавленных этими материалами, существенно (в 2,5-2,6 раза) отличается (см. табл. 1). Это связано со структурным состоянием наплавок: в микроструктуре

металла, наплавленного порошковой проволокой ПП АН-170, содержится до 40 % количества избыточной карбидной фазы, в то время как структура наплавки ПП АН-125 имеет эвтектическое строение. Тем самым еще раз подтвердилась необходимость изыскания наплавочных сплавов с большим содержанием твердой фазы.



**Рис. 1.** Изменение горячей твердости (а) и твердости после нагрева и охлаждения (б), используемых огнеупорными заводами наплавочных сплавов в зависимости от температуры испытаний: ○ – Т-590, ◇ – Т-620, □ – сталинит, Δ – KBX, × – сормайт

**Таблица 1** – Химический состав, твердость и износостойкость сплавов, испытанных в условиях эксплуатации скребков смесителей

Материал	Твердость HRC	Химический состав, % масс.						Относит. износостойкость, ε
		C	Cr	Mn	Si	B	Проч., Fe – остальное	
Сормайт (эталон)	50	2,9	28	1,5	3,5	–	3,5 %Ni	1,0
Сталинит	57	5,2	10,4	9,2	0,9	–	–	1,2
KBX	55	2,5	21,0	0,4	1,5	0,9	–	1,1
Т-590	58	3,3	25,0	2,0	2,0	1,3	–	1,4
Т-620	57	3,2	20,5	1,8	2,2	1,1	0,6 %Ti	1,3
ПП АН-125	52	2,0	15,0	1,0	1,5	0,7	0,3 %Ti	1,1
ПП АН-170	60	0,8	20,0	–	–	3,0	0,6 %Ti	2,9
ПП-ЗМИ-2	64	3,1	17,5	–	4,8	3,2	0,6 %Ti	3,9

ДюрOMETрические исследования металла, наплавленного порошковыми проволоками ПП АН-125 и ПП АН-170 в нагретом состоянии и после охлаждения, позволили установить, что горячая твердость сплава, наплавленного ПП АН-125, во всем интервале температур падает и достигает 39 HRC при 550 °С (рис. 2, а).

Твердость наплавки ПП АН-170 в нагретом состоянии выше на 5–6 HRC, чем сплава ПП АН-125, что хорошо согласуется с результатами определения износостойкости этих материалов в производственных условиях (см. табл. 1).

Способность восстанавливать исходную твердость после различных температур нагрева у сплава, наплавленного ПП АН-125, ниже, чем наплавки ПП АН-170. Так, для сплава ПП АН-125 исходная твердость восстанавливается после охлаждения до комнатной температуры от температуры нагрева 400 °С, а для ПП АН-170 – после нагрева до 500 °С. С повышением температуры нагрева наступает интенсивное разупрочнение обоих сплавов, что приводит к снижению твердости после охлаждения от 550 °С и горячей твердости (см. рис. 2).

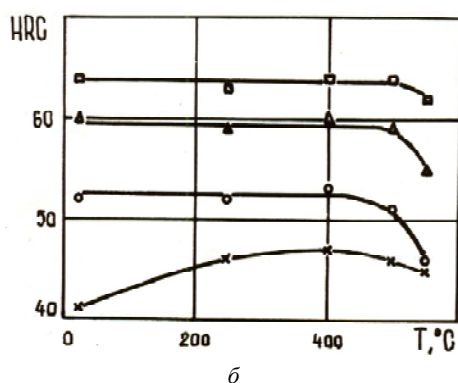
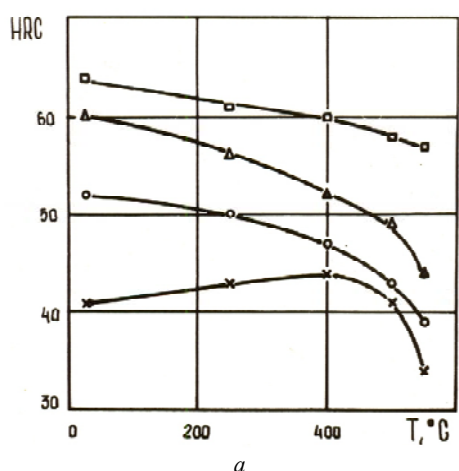


Рис. 2. Изменение горячей твердости (а) и твердости после нагрева и охлаждения (б), исследованных наплавочных материалов в зависимости от температуры испытаний:

○ – ПП АН-125, Δ – ПП АН-170, □ – ПП-ЗМИ-2,  
× – ПП-3Х2В8

Для сравнения был исследован теплостойкий сплав, наплавленный порошковой проволокой ПП-3Х2В8. Несмотря на то, что твердость после отпуска данного сплава даже несколько повысилась по сравнению с исходной, горячая твердость при 550 °С существенно (до 34 HRC) снизилась (см. рис. 2, а). Недостаточная твердость металла, наплавленного ПП-3Х2В8, а также отсутствие избыточной карбидной фазы в структуре сплава не позволяет его использовать в качестве износостойкого материала в условиях интенсивного абразивного изнашивания при повышенных температурах.

Таким образом, на первом этапе изыскания наиболее приемлемого сплава для повышения срока службы скребков был выбран наиболее износостойкий из стандартных наплавочных материалов – порошковая проволока с внутренней защитой ПП АН-170.

Однако данный сплав содержит недостаточное количество карбидной фазы и, очевидно, не является оптимальным для условий эксплуатации скребков. Поэтому на втором этапе разрабатывалась порошковая проволока, обеспечивающая еще более значительное повышение износостойкости скребков смесителей в сравнении с наплавкой ПП АН-170.

При создании сплава для наплавки скребков смесителей исходили из результатов исследований, полученных ранее: наиболее перспективными для данных условий эксплуатации являются высококарбидные сплавы. Тип матрицы (за исключением не износостойкой ферритной) не оказывает существенного влияния на сопротивляемость сплава абразивному изнашиванию при повышенных температурах. Наиболее приемлемой в данных условиях, очевидно, оказывается аустенитная основа сплава, удовлетворительно сопротивляющаяся воздействию абразивных частиц и достаточно прочно удерживающая карбидную фазу от выкрашивания в процессе изнашивания. Такому структурному состоянию наиболее полно соответствуют заэвтектические сплавы, получаемые наплавкой. В этом случае избыточная упрочняющая фаза располагается в ледебуритной основе, представляющей собой эвтектическую смесь аустенита и мелкодисперсных вторичных выделений [4].

Тип карбидной фазы, ее форма, размеры и характер распределения в матрице должны обеспечивать оптимальное соотношение износостойкости и надежности в эксплуатации. Анализ литературных данных [4–6] и многочисленные исследования наплавочных материалов, выполненные на кафедре сварки ЗНТУ, позволяют считать, что мелкодисперсные избыточные карбиды компактной формы, равномерно распределенные в основе сплава, наиболее эффективны, т. к. способствуют существенному повышению износостойкости при сохранении удовлетворительных пластических свойств металла.

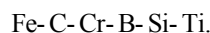
При разработке сплава для наплавки скребков смесителей за основу была принята система легирования

Fe-C-Cr, включающая относительно дешевые и недефицитные элементы. В сплавах данной системы в зависимости от отношения хрома к углероду возможно образование различных карбидов [4]. Так как в хромистых сплавах присутствуют комплексные карбиды  $(Cr, M)_7C_3$  и  $(Cr, M)_{23}C_6$  [5, 7], а легирование одновременно несколькими элементами позволяет качественно улучшить карбидную фазу [4], то было использовано комплексное легирование хромом, бором, кремнием и титаном.

Введение бора в сплав измельчает карбидную фазу [4, 8], способствует переходу сплава из доэвтектического состояния в заэвтектическое. Бор, легируя основу и твердую фазу, образуя соединения типа  $(Cr, Fe)_7(CB)_3$  и  $(Cr, Fe)_{23}(CB)_6$ , значительно повышает твердость и износостойкость сплава [8, 9].

С целью повышения теплостойкости [10], более равномерного распределения упрочняющей фазы и увеличения ее содержания за счет снижения растворения углерода в железе [4] в сплав вводился кремний. В работе [11] показано, что кремний, не образуя собственной карбидной фазы, способствует ее измельчению и увеличению количества в структуре сплава. Повышение износостойкости было получено при введении в сплав титана [12], который измельчает структуру сплава, уменьшает размеры включений эвтектической сетки карбидов.

Таким образом, при создании сплава для наплавки скребков была определена следующая система легирования:



Содержание и соотношение легирующих элементов в принятой системе оказывает существенное влияние на износостойкость и технологическую надежность сплавов в эксплуатации: увеличение уровня легирования наплавленного металла с целью повышения количества карбидной фазы приводит к повышению его износостойкости, но снижает эксплуатационную надежность.

Условия эксплуатации скребков смесительных аппаратов огнеупорного производства (интенсивный абразивный износ без существенных ударных нагрузок при повышенных температурах) позволяет использовать сплавы со значительным количеством горячих и холодных трещин, т. к. «мягкая» феррито-перлитная основа конструкционных сталей типа Ст. 3–Ст. 5, используемых для изготовления скребков, достаточно прочно удерживает металл наплавки. Кроме того, после нанесения износостойкого слоя скребки не подвергаются механической обработке, что позволяет значительно легировать наплавленный металл с целью получения в структуре большого (до 70–75 %) количества твердой карбидной фазы.

Для получения заэвтектических структур в наплавленном металле уровень легирования по углероду был принят 3,0–3,5 %. Количество хрома в сплаве определяется содержанием углерода. При отношении  $Cr/C \geq 5$

(в атомных процентах) образуется в основном кубический карбид  $M_{23}C_6$ , обладающий большей износостойкостью, чем гексагональный  $M_7C_3$  [4, 10]. Исходя из этого, принято содержание хрома в пределах 15–20 %. Содержание титана в сплаве составляло 0,4–0,6 %.

С целью определения оптимального количества бора и кремния были исследованы образцы, наплавленные порошковыми проволоками при варьировании содержания бора в пределах от 0,5 до 4,2 %, а кремния – от 1,9 до 4,9 % (табл. 2).

Таблица 2 – Химический состав опытных наплавов

Маркировка наплавки	Химический состав, % мас.				
	C	Cr	Si	B	Ti
8–3	3,1	17,5	4,8	3,2	0,6
8–6	3,1	13,7	4,8	0,5	0,5
8–7	3,1	16,8	3,7	1,1	0,4
8–9	3,1	15,3	1,9	2,9	0,5
8–10	3,1	18,7	4,9	4,2	0,6

Металлографические исследования опытных сплавов показали, что с повышением содержания бора в наплавленном металле количество упрочняющей фазы увеличивается. Влияния количества кремния на структуру исследованных сплавов отмечено не было.

Твердость всех сплавов составляет 63–66 HRC. С повышением температуры поверхности образцов наблюдается пропорциональное снижение твердости (рис. 3). Однако интенсивность падения горячей твердости сплавов различна. Так, минимальная твердость поверхности в нагретом состоянии во всем интервале температур была отмечена для сплавов 8–9 и 8–6, содержащих наименьшее количество кремния и бора соответственно.

С увеличением содержания бора и кремния в наплавленном металле горячая твердость повышается [13]. Максимальной твердостью в интервале температур 20–600 °C обладает сплав 8–10 с 4,2 % B и 4,9 % Si. Однако технологическая надежность его не позволяет использовать для упрочнения скребков смесителей: наплавленный слой имеет большое количество трещин, а в процессе изготовления образцов наблюдалось выкрашивание и отслаивание металла наплавки.

Сплав 8–3 при том же уровне легирования кремнием, что и 8–10, содержит меньшее количество бора (до 3,2 %), что приводит к снижению горячей твердости на 3–5 HRC. Но при этом технологическая надежность его существенно выше.

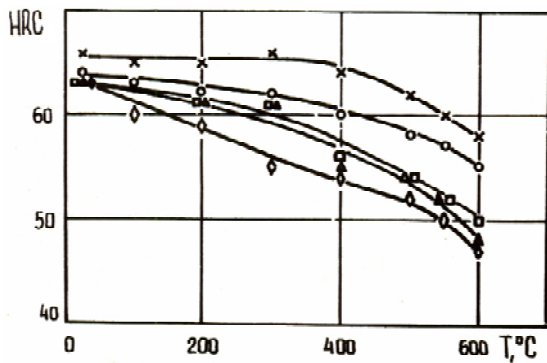


Рис. 3. Изменение горячей твердости опытных наплавочных

○ – 8-3, Δ – 8-6, □ – 8-7, ◇ – 8-9, × – 8-10

Маркировка согласно табл. 2

Следовательно, в оптимальном сплаве для упрочнения скребков смесителей содержание бора необходимо ограничить 3,0–3,2 %, а кремния – 4,5–5,0 %.

Для обеспечения данного уровня легирования наплавленного металла была рассчитана шихта порошковой проволоки. Для защиты зоны горения дуги и ванны расплавленного металла в состав шихты введен углекислый кальций, что позволило вести процесс наплавки открытой дугой.

Металл, наплавленный разработанной порошковой проволокой ПП-У30Х20Р3С5Т-О (ПП-ЗМИ-2), содержит во втором слое 70–75 % избыточной карбидной фазы (рис. 4), равномерно распределенной в ледебуритной матрице.

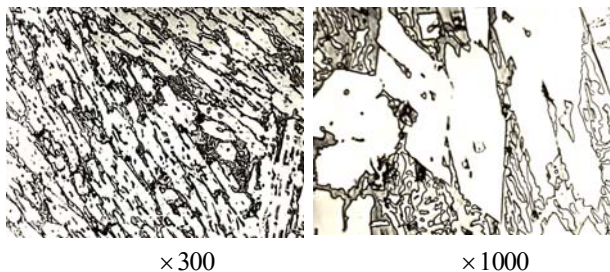


Рис. 4. Микроструктура сплава У30Х20Р3С5Т

Рентгеноструктурным и микрорентгеноспектральным анализами структурного состояния металла, наплавленного разработанной порошковой проволокой, установлено, что избыточная фаза представляет собой смесь боридов железа  $Fe_2B$  и специальных сложнелегированных карбоборидов типа  $M_7C_3$  и  $M_{23}(CB)_6$  высокой твердости, расположенных в аустенитной матрице. Это соответствует наиболее приемлемому структурному состоянию сплава для условий интенсивного абразивного изнашивания при температурах до 550 °С.

Исследования горячей твердости и твердости после нагрева и охлаждения показали, что эти параметры у разработанного сплава выше, чем у металла, наплавленного стандартной порошковой проволокой ПП АН-170 (см. рис. 2). Это связано с наличием в сплаве

У30Х20Р3С5Т большего количества избыточной твердой фазы.

Испытаниями наплавочных материалов в производственных условиях установлено, что наибольшей износостойкостью обладают скребки, наплавленные разработанной порошковой проволокой ПП-ЗМИ-2 (см. табл. 1). При этом срок службы скребков увеличивается в 2,8–3,9 раза в сравнении с используемыми огнеупорными заводами наплавочными материалами – сормайт, Т-590, КБХ и др. Износостойкость скребков, наплавленных разработанной порошковой проволокой, в 1,3–1,6 раза выше, чем при наплавке стандартной проволокой ПП АН-170.

### Выводы

1. Исследования износостойкости сплавов, используемых огнеупорными заводами для повышения срока службы скребков смесителей, показали, что ни один из наплавочных материалов не обеспечивает достаточной износостойкости и не удовлетворяет производство.

2. Из стандартных наплавочных материалов наибольшей износостойкостью в условиях эксплуатации скребков смесителей обладает сплав, наплавленный порошковой проволокой ПП АН-170.

3. Исследовано влияние легирования на горячую твердость сплавов. Установлено, что увеличение бора и кремния в наплавке приводит к повышению его горячей твердости. Оптимальное содержание бора и кремния в наплавленном металле для условий абразивного изнашивания при повышенных (до 550 °С) температурах составляет 3,0–3,2 % В и 4,5–5,0 % Si.

4. Результаты всего комплекса исследований, представленных в данной работе, позволили создать для наплавки скребков смесителей порошковую проволоку ПП-У30Х20Р3С5Т, более приемлемую, чем стандартные наплавочные материалы.

### Список литературы

1. Исследование условий эксплуатации и характера изнашивания скребков смесителей / В. С. Попов [и др.] // Огнеупоры : научн.-технич. и производств. журнал. – М. : Металлургия, 1988. – № 8. – С. 38–40.
2. Брыков Н. Н. Роль структуры в сопротивляемости сплавов абразивному изнашиванию при повышенных температурах / Н. Н. Брыков, М. Ю. Осипов // В кн. : Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий. – Запорожье, 1986. – С. 299–300.
3. Брыков Н. Н. Методика изыскания износостойких сплавов для наплавки быстроизнашиваемых деталей огнеупорного оборудования, подверженных интенсивному абразивному износу / Н. Н. Брыков, Г. А. Пугачев, М. Ю. Осипов // Внедрение прогрессивных методов наплавки деталей и изготовление металлоконструкций в условиях металлургического завода : тезисы докладов. – Днепропетровск : 1984. – С. 13–14.
4. Лившиц Л. С. Основы легирования наплавленного металла / Л. С. Лившиц, Н. А. Гринберг, Э. Г. Куркумелли. – М. : Машиностроение, 1969. – 186 с.

5. Шумикин А. Б. Влияние упрочняющей фазы на свойства износостойких сплавов / А. Б. Шумикин, В. С. Попов // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – М., 1973. – № 1. – С. 138–141.
6. Восстановление и повышение износостойкости и срока службы деталей машин / под ред. В. С. Попова. – Запорожье : изд-во ОАО «Мотор Сич», 2000. – 394 с.
7. Особенности износа поверхностных слоев деталей песковых насосов / [Ю. Г. Бобро, М. Ф. Баранов, О. И. Коваленко, П. Е. Порядченко] // Трение и износ. – 1981. – Т. II. – № 6. – С. 1108–1111.
8. Гринберг Н. А. Влияние бора на фазовое строение и свойства наплавленного металла при абразивном изнашивании / Н. А. Гринберг, И. А. Монгайт // Металловедение и терм. обраб. металлов. – 1978. – № 12. – С. 48–50.
9. Куркумелли Э. Г. Влияние бора на свойства износостойких хромистых и хромоникелевых наплавов / Э. Г. Куркумелли, Н. А. Гринберг, Л. С. Лившиц // Металловедение и терм. обраб. металлов. – 1974. – № 5. – С. 60–62.
10. Геллер Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – М. : Металлургия, 1983. – 527 с.
11. Влияние кремния на износостойкость и усталостную прочность наплавочного сплава 200Х15ВРНСЗГЗ / [В. С. Попов, Н. Н. Брыков, Г. А. Пугачев, М. Ю. Осипов] // В кн. : Прогрессивные методы сварки в тяжелом машиностроении и наплавки в черной металлургии. – Жданов, 1977. – С. 49–51.
12. Кириевский Б. А. Влияние легирующих элементов на структуру и стойкость высокохромистого чугуна при абразивном изнашивании / Б. А. Кириевский, Л. Г. Смолякова, Н. Я. Костинская // В кн. : Литые износостойкие материалы. – Киев, 1976. – С. 53–57.
13. Осипов М. Ю. Влияние бора на горячую твердость сплава 300Х20СЗТ / М. Ю. Осипов // В кн. : Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий. – Запорожье, 1984. – С. 163–164.

Одержано 29.04.2014

**Осіпов М.Ю. Вищукування і дослідження зносостійких наплавочних сплавів для роботи в умовах абразивного зношування при підвищених температурах**

*Досліджено зносостійкість, гарячу твердість і твердість після нагріву стандартних наплавочних сплавів в умовах абразивного зношування при підвищених до 550 °С температурах. На базі проведених досліджень розроблений самозахисний порошковий дріт для зносостійкого наплавлення скребок змішувачів вогнетривкого виробництва.*

**Ключові слова:** зносостійкість, твердість, гаряча твердість, порошковий дріт, наплавлення, скребки змішувачів.

**Osipov M. Surveys and studies of wear resistant alloys surfacing for working in abrasive wear at elevated temperatures**

*The wear resistance, hot hardness and toughness after heating of standard surfacing alloys at abrasive wear at elevated up to 550 °C temperatures was investigated. On the basis of studies self-shielded flux-cored wire for wear resistant surfacing of scrapers mixers refractory production was designed.*

**Key words:** wear, hardness, hot hardness, cored wire, surfacing, scrapers faucet.