



ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕННОГО И ЛЕГИРОВАННОГО ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕДНЫХ ПЛИТ ПРИ ПДРП

В.Г. Кожемякин¹, В.А. Шаповалов¹, В.Р. Бурнашев¹,
Д.В. Ботвинко¹, Д.А. Бирюченко²

¹Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²НТУУ «Киевский политехнический институт».

03056, г. Киев-56, пр-т Победы, 37. E-mail: birjuchenko@gmail.com

Настоящая работа посвящена изучению качества восстановленного медью и легированного модификаторами поверхностного слоя медной плиты кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок способом ПДРП. В данной работе изучали качество поверхности, структуру металла, химический состав, газонасыщенность, механические и физические свойства легированного и восстановленного слоя. Основными показателями качества плазменно-дуговой наплавки является глубина проплавления основного металла, ширина прохода с поперечными колебаниями одним плазмотроном, трещины, поры наплавленного слоя, несплавления, а также волнистость поверхности. Содержание легирующих элементов в меди до 1 мас. % позволило значительно повысить ее механические свойства. Все представленные физические и механические свойства легированного и восстановленного поверхностного слоя медной плиты указаны без термомеханической обработки. Твердость поверхностного слоя повышается в 1,25 раза, а предел прочности дает прирост на 8 %. Результаты газового анализа показали, что содержание кислорода практически не изменилось, а содержание водорода снизилось в 2 раза. Полученные данные по электропроводности легированного и восстановленного слоя сопоставимы с электропроводностью промышленных медных кристаллизаторов. Для сравнительной оценки износостойкости поверхностного слоя медных плит кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок разработана методика и создана экспериментальная установка, позволяющая моделировать основные процессы, происходящие на границе стенка кристаллизатора — металл. Отработана методика исследований износостойкости на данной установке. Результаты проведенных исследований показывают, что износостойкость меди повысилась в 1,2...1,5 раза. Библиогр. 12, табл. 5, ил. 3.

Ключевые слова: медная плита; кристаллизатор МНЛЗ; восстановление; легирование; поверхностный слой; медные сплавы; качество наплавки; ПДРП

Повышение производительности машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) в современных условиях происходит за счет роста скорости разливки, увеличения размеров отливаемых слитков. Это приводит к повышению требований к механическим свойствам материалов рабочих стенок кристаллизаторов и сохранению этих свойств продолжительное время при повышенных температурах, т. е. к повышению жаропрочности.

Существенно повысить прочность чистой меди можно только путем наклепа при холодной пластической деформации. Однако вследствие низкой жаропрочности сохранить упрочнение в процессе длительной эксплуатации при температуре выше 100 °С и кратковременной — выше 150 °С невозможно. Поэтому в промышленности вместо меди используют медные сплавы с высокой температурой рекристаллизации. Для обеспечения высокой теплопроводности и повышенной температуры рекристаллизации степень легирования медных

сплавов должна быть крайне малой, в пределах сотых долей процента [1].

Одним из путей увеличения ресурса эксплуатации кристаллизаторов МНЛЗ является легирование поверхностного слоя медных плит, направленное на повышение их износостойкости. Этот процесс может осуществляться способом плазменно-дугового рафинирования поверхности (ПДРП) [2]. Данный способ был разработан в ИЭС им. Е.О. Патона и внедрен на некоторых заводах Украины и за рубежом. Технология ПДРП позволяет расплавлять плазменной дугой отдельные участки поверхностного слоя на необходимую глубину и полностью удалять дефекты поверхностного слоя плоских и цилиндрических слитков.

В данной работе были проведены серии экспериментов по легированию и восстановлению поверхностного слоя с использованием плазменно-дуговой технологии. В процессе легирования медных плит методом ПДРП на их поверхности



Таблица 1. Технологические режимы ПДП поверхностного слоя моделей медных плит кристаллизаторов МНЛЗ

Параметры	Величина
Ток плазменной дуги, А	250...500
Напряжение на плазматронах, В	40...70
Скорость перемещения заготовки, мм/мин	10...25
Частота колебаний плазматронов, 1/мин	0...10
Амплитуда колебаний плазматронов, мм	0...60
Длина плазменных дуг, мм	20...50
Мощность дуги, кВт	17,5...28
Расход плазмообразующего газа (аргон, смесь аргона + 30 %...50 % гелия), л/мин	5...7
Количество плазматронов, шт	1
Давление газа в рабочей камере поддержки, Па	(1,2...1,4)10 ⁵

наводится жидкая металлическая ванна путем расплавления на заданную глубину. Используя технологию ПДРП возможно легировать металл и изменять содержание легирующих элементов на различных участках поверхностного слоя и изменять износостойкость в необходимых местах рабочей поверхности медной плиты кристаллизатора.

Эксперименты проводили на лабораторной установке ОБ-1957 на изготовленных медных моделях плит кристаллизаторов МНЛЗ размером 135×120×70 из меди марки М1. Технологические режимы, приведены в табл. 1. Легирование поверхностного слоя производилось сплавами, имеющими высокую температуру рекристаллизации и высокую тепло- и электропроводность: CuCr, CuCrZr, CuZr, CuHf, CuNi, CuNiB, CuAg, CuTi. Для восстановления поверхностного слоя применялась чистая электротехническая медь.

Для определения качества легированного и восстановленного слоев необходимо дать оценку их химическому составу, механическим и физи-

ческим свойствам. К основным показателям качества плазменно-дуговой наплавки можно отнести: глубину проплавления основного металла, ширину прохода с поперечными колебаниями, трещины, поры легированного слоя, несплавления, а также волнистость поверхности [3].

В предыдущих работах [4, 5] показано, что, изменяя технологические параметры процесса наплавки, такие как ток, скорость перемещения заготовки, частоту колебаний плазматронов, амплитуду колебаний плазматронов, расход и состав плазмообразующего газа, расстояние от среза сопла до изделия, можно управлять размерами жидкой металлической ванны, что позволяет легировать поверхностный слой на заданную глубину от 2 до 8 мм. Из упрочненных и восстановленных моделей плит кристаллизаторов медными сплавами были вырезаны продольные и поперечные темплеты. Глубина проплавления основного металла в обоих случаях составила до 6 мм (рис. 1).

При легировании поверхностного слоя использование колебательных движений плазматрона позволяет увеличить термический КПД нагрева и, как следствие, повысить производительность процесса, снизить удельный расход электроэнергии. Так, для оплавления всей ширины плиты потребовались колебательные движения плазматрона. Результаты исследований показали, что при амплитуде 60 мм и ширине медной плиты 120 мм легированный слой ровный, без каких-либо дефектов и несплавлений. При легировании плиты шириной более 120 мм (в частности 125...135 мм) на торце плиты остаются несплавления. Это объясняется уменьшением плотности потока энергии в пятне нагрева плазменной дуги. Вследствие этого необходимо повышать энергетические затраты путем увеличения тока плазменной дуги.

Макроструктура легированного и восстановленного слоев плотная, поры, раковины, трещины не обнаружены. В процессе ПДП поверхностного слоя медных плит растут оплавленные кристаллы, поэтому граница основного и легированного (восстановленного) металла не всегда четко выражена (рис. 2). От поверхности легированного и восстановленного слоя в глубину расположена зона столбчатых кристаллов. В поверхностном слое толщиной 3...6 мм направление осей кристаллов плавно изменяется на 90°, что связано с характером теплоотвода от жидкой ванны при ПДП поверхностного слоя.

Как известно, чем более гладкая поверхность, тем меньше затрат приходится на механическую обработку легированного слоя. Таким образом, возникает необходимость в исследовании формирования волнообразной поверхности.

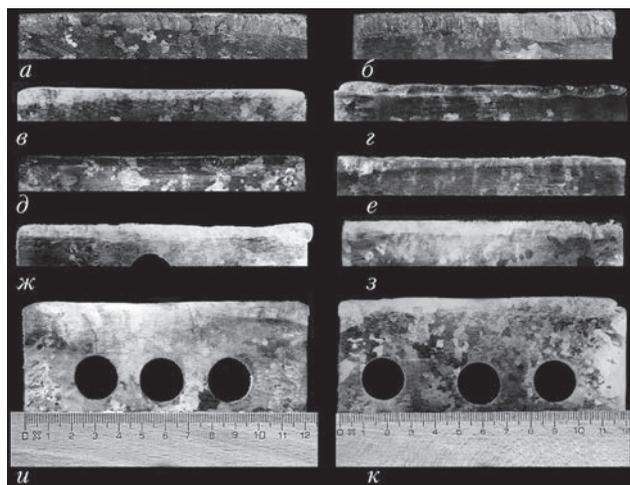


Рис. 1. Макрошлифы поперечного сечения медных плит легированных элементами: а — восстановленный продольный слой; б — восстановленный поперечный слой; в — никель-бор; г — серебро; д — титан; е — хром-цирконий; ж — цирконий; з — хром; и — гафний; к — никель

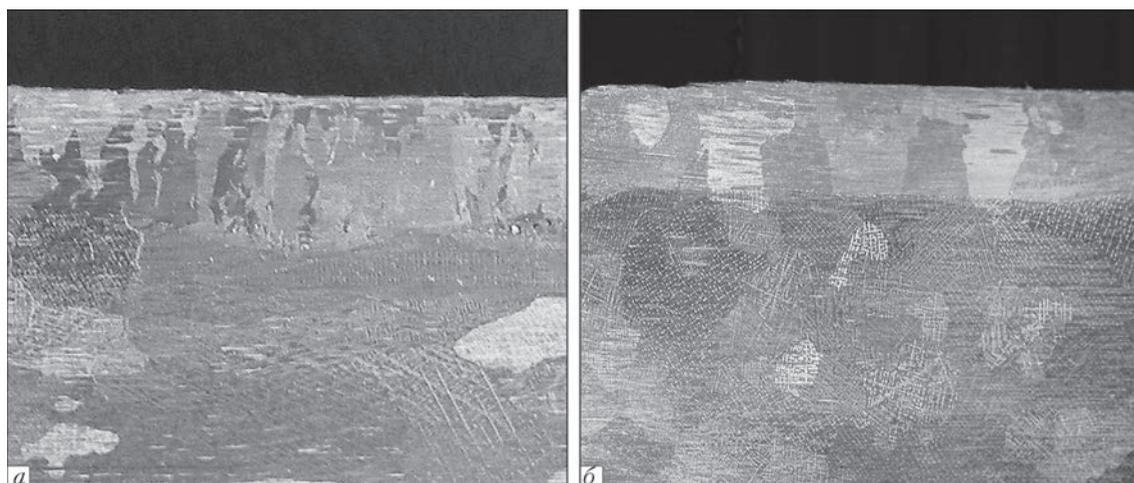


Рис. 2. Макроструктура ($\times 3$) восстановленного (а) и легированного (б) поверхностного слоя медной плиты кристаллизатора

При плазменно-дуговой наплавке сочетание процессов колебания жидкого металла и кристаллизации приводит к формированию волнообразной поверхности. К причинам, вызывающим появление волнистости, можно отнести: неравномерность поступления металла в ванну, периодичность протекания процесса кристаллизации металла, колебания поверхности жидкого металла [2, 6].

При постоянной скорости перемещения заготовки V увеличение частоты колебаний плазмотрона ν приводит к измельчению структуры сформированной поверхности, а при малой частоте колебаний формируется достаточно гладкая поверхность. С увеличением частоты колебаний плазменной дуги и ростом скорости движения возрастает волнистость восстановленного поверхностного слоя (рис. 3, а). Увеличение мощности дуги, либо снижение скорости перемещения заготовки приводит к увеличению геометрических размеров ванны. Увеличение геометрических раз-

меров ванны приводит к снижению волнистости (рис. 3, б), однако при этом возможен слив жидкой металлической ванны.

Химический состав легированного поверхностного слоя может оказать весьма существенное влияние на конечные свойства медной плиты. При проведении экспериментов химический состав легированного поверхностного слоя определяли спектральным методом на предварительно механически обработанной поверхности образца с шероховатостью не более $Ra\ 2,5$ (ГОСТ 2789–73). Результаты химического анализа показали состав легированного металла (табл. 2). Степень усвоения легирующих элементов рассчитывали по формуле:

$$C_y = \frac{C_\phi}{C_p} 100\%,$$

где C_ϕ — фактический состав; C_p — расчетный.

Как видно из табл. 2, степень легирования не превышает 1 %. Такие сплавы можно назвать как



Рис. 3. Поверхность (а) восстановленного и (б) легированного слоев медной плиты. Технологические режимы: а — $V = 25$ мм/мин, $\nu = 15$ мин $^{-1}$, $I = 400$ А, $U = 40 \dots 50$ В, газ — аргон; б — $V = 10$ мм/мин, $\nu = 6$ мин $^{-1}$, $I = 400$ А, $U = 40 \dots 50$ В, газ — аргон



Таблица 2. Результаты химического анализа легированного поверхностного слоя

Расход легирующей добавки, %	Химический состав легирующего слоя в образцах, мас. %							Степень усвоения элементов в образцах, %						
	3	4	5		6	7	8	3	4	5		6	7	8
	Hf	Cr	Cr	Zr	Ti	Ni	Ag	Hf	Cr	Cr	Zr	Ti	Ni	Ag
0,5	<u>0,145</u> 0,077	<u>0,196</u> 0,030	<u>0,101</u> 0,065	<u>0,101</u> —	<u>0,193</u> 0,048	<u>0,272</u> 0,260	<u>0,089</u> 0,071	53,19	15,41	64,23	—	24,88	95,42	79,61
1,0	<u>0,290</u> 0,090	<u>0,389</u> 0,019	<u>0,202</u> 0,117	<u>0,202</u> —	<u>0,386</u> 0,063	<u>0,545</u> 0,450	<u>0,178</u> 0,450	31,09	4,88	57,82	—	16,35	82,54	39,81
1,5	<u>0,434</u> 0,110	<u>0,584</u> —	<u>0,303</u> 0,140	<u>0,303</u> —	<u>0,594</u> 0,071	<u>0,818</u> 0,578	<u>0,268</u> 0,092	25,33	0,00	46,22	—	12,26	4,65	34,39

Примечания. Над чертой приведен расчетный состав, под чертой — фактический. Образцы: 1 — основа (медь); 2 — восстановленный слой; 3–8 — образцы поверхностного слоя, легированного медными сплавами.

микролегированными (суммарное содержание добавок не превышает 0,1 %), так и низколегированными (от 0,1 до 3...5 %) медными сплавами. В обоих случаях данные сплавы отличаются высокой электро- и теплопроводностью, более высокой прочностью и твердостью по сравнению с чистой медью, а также высоким уровнем жаропрочности. Такие свойства определяются не только суммарным содержанием легирующих элементов в сплаве, но и в значительной степени зависят от физико-химического взаимодействия между ними, а также и от структурного состояния материала [1].

В данной работе выявлены следующие факторы, влияющие на усвоение легирующих элементов: угар легирующих элементов при выплавке лигатуры и в процессе легирования медной плиты; вероятность слива жидкой ванны с поверхностного слоя при легировании медной плиты; несплавление легирующих элементов; снятие легированного поверхностного слоя механической обработкой (недостаточная глубина легированного слоя).

Как известно, кислород является вредной примесью в меди, он присутствует в виде оксида Cu_2O . При весьма малых концентрациях кислорода в структуре меди присутствует хрупкая закись меди. Соединение Cu_2O оказывает отрицательное влияние на коррозионную стойкость меди [7, 8]. Для исследования газонасыщенности поверхностного слоя производился анализ образцов, отобранных из легированного, восстановленного слоев и основного металла. Содержание кислорода в меди определяли методом газовой экстракции при восстановительной вакуумной плавке, основанной на взаимодействии растворенного и связанного в оксиды кислорода с углеродом. Результаты исследований показали, что содержание кислорода в сплавах CuZr , CuCrZr , CuNi , CuNiB практически не изменилось, а в сплавах CuHf , CuCr , CuTi , CuAg и наплавленном слое повысилось незначительно, что соответствует составу меди марки М1 (табл. 3).

Водород взаимодействует с находящейся в меди закисью меди по реакции $\text{CuO} + \text{H}_2 = 2\text{Cu} + 2\text{H}_2\text{O}$. Выделяющиеся пары воды нерастворимы в меди и создают высокое давление, приводящее к несплошностям по границам зерен и пустотам в теле зерна. Эти несплошности затем развиваются в трещины, что особенно сильно проявляется при горячей обработке давлением. Это явление называют водородной болезнью. Она развивается не только вследствие взаимодействия водорода с закисью меди по границам зерен. Атомарный водород, диффундирующий с поверхности вглубь металла по границам зерен, может взаимодействовать с атомарным, сегрегированным на границах зерен, кислородом, образуя пары воды достаточно высокого давления [7, 8]. Результаты исследований по определению водорода показали, что его содержание снизилось практически вдвое (табл. 3). Массовую долю кислорода и водорода в меди определяли на газоанализаторах RO-316, RH-2 фирмы «LECO».

Выбранные элементы для легирования поверхностного слоя меди повышают ее прочность и твердость, образуя с медью ограниченные твердые растворы. Такая низкая степень легирования меди данными сплавами позволила значительно повысить ее механические свойства. Твердость определялась на темплетях из вырезанного поверхностного слоя по методу Роквелла на твердомере ТК-2М по шкале «В». Для сравнительной оценки твердости легированного и восстановленного слоя с промышленными медными плитами кристаллизаторов значения твердости переводили в единицы *НВ* по Бринеллю. Повышение твердости поверхностного слоя отмечалось во всех сплавах, однако наиболее высокие показания дали сплавы CuCrZr , CuHf . Восстановленный поверхностный слой имеет твердость близкую по значению к твердости медной основы кристаллизатора.



Таблица 3. Содержание кислорода и водорода в легированном и восстановленном слоях, мас. %

№ образца	Медь и медные сплавы	Кислород	Водород
1	Основа	0,0067	0,001
2	Восстановленный	0,008	0,0008
3	слой	0,0082	0,0007
4	CuHf	0,0108	0,0006
5	CuCrZr	0,0066	0,0005
6	CuTi	0,0106	0,0008
7	CuNi	0,0073	0,0006
8	CuAg	0,0102	0,0006
9	CuZr	0,0068	0,0004
10	CuNiB	0,0071	0,0005

Испытания на разрыв выполнялись на разрывной машине ZD 10. Образцы выбирались величиной не более толщины легированного и восстановленного слоев и изготавливались по ГОСТ 9454–78 (тип 4). Предел прочности на разрыв легированного слоя особого увеличения не показал, кроме сплава CuCrZr, который дал прирост прочности на 8 %.

Также проводили испытания образцов, изготовленных по ГОСТ 1497–73 (тип 3), на ударную вязкость на машине маятниковый копер типа «МК-30». Механические свойства легированного и восстановленного поверхностных слоев приведены в табл. 4.

Для сравнительной оценки износостойкости поверхностного слоя медных плит кристаллизаторов МНЛЗ разработана методика и создана экспериментальная установка, позволяющая моделировать основные процессы, происходящие на границе стенка кристаллизатора – металл. Методика проведения исследований по истиранию описана в литературе [9]. Результаты исследования износостойкости легированной и восстановленной поверхности приведены в табл. 5.

Как видно из табл. 5, стойкость легированного слоя в значительной мере определяется материалом. Наибольшую износостойкость показали образцы, легированные CuCrZr, CuHf, CuNiB с коэффициентами износостойкости 1,5, 1,3, 1,3 соответственно.

Таблица 4. Механические свойства легированного и восстановленного поверхностных слоев

№ образца	Медь и медные сплавы	Предел текучести σ_T , МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Ударная вязкость a_n , Дж/см ²	Твердость, НВ
1	Основа	72	165	60,3	59
2	Восстановленный	70	158	59,5	59
3	слой	80	155	65,1	71
4	CuHf	77	166	70,3	60
5	CuCrZr	90	180	61,2	74
6	CuTi	80	170	61	66
7	CuNi	77	165	90,1	66
8	CuAg	75	165	73,8	70
9	CuZr	75	165	57,3	66
10	CuNiB	70	165	60,3	71

Теплопроводность легированного и восстановленного слоев экспериментально определить сложно. Проще и точнее ее можно определить путем пересчета значений электропроводности или удельного электрического сопротивления по номограмме Видемана-Франца в показатели теплопроводности [10]. Оценка электропроводности проводилась путем измерения электросопротивления образца, вырезанного из восстановленного и легированного слоя с помощью микроомметра Ф4104-М1 по стандартной методике [11].

Как видно из табл. 5, значения удельной электропроводности легированного слоя ниже, чем электропроводность меди основы кристаллизатора. Однако все полученные данные по электропроводности сопоставимы (в пределах 40...50 МСм/м) с электропроводностью промышленных медных кристаллизаторов (35...54 МСм/м) [12], кроме сплава CuTi, который показал наименьшее значение электропроводности — 27,1 МСм/м.

Все представленные свойства (химические, механические, физические) легированного и восстановленного поверхностного слоев были указаны без какой-либо обработки. Для повышения механических свойств таких сплавов более чем в 2 раза необходимо произвести термомеханиче-

Таблица 5. Значения удельной электропроводности и коэффициента относительной износостойкости легированных образцов при повышенной температуре

Свойства	Основа	Восстановленный слой	CuHf	CuCr	CuCrZr	CuTi	CuNi	CuAg	CuZr	CuNiB
Относительная износостойкость, ед.	1	0,8	1,3	1,2	1,5	1,2	1,2	1,2	–	1,3
Удельная электропроводность, МСм/м	51,92	51,55	47,78	44,31	50,18	27,1	40,11	43,1	45,71	48,31



скую обработку (ТМО). В литературе [1, 8] представлены данные по упрочнению приведенных сплавов и их свойства после ТМО. Например, серебряная бронза БрСр0,1 после холодной пластической деформации имеет предел прочности на разрыв $\sigma_b = 440$ МПа с твердостью *НВ* 110 и температурой рекристаллизации 300 °С. Медь с содержанием хрома 0,05 % в твердом растворе после пластической деформации имеет температуру рекристаллизации 400...500 °С. Медногафниевый сплав с содержанием 0,1 % гафния при закалке + старении имеет $\sigma_b = 240$ МПа и твердость *НВ* 70, а при закалке+деформации+старении — $\sigma_b = 440$ МПа, твердость *НВ* 140 и температуру рекристаллизации 570 °С.

Таким образом, применение ТМО позволит значительно повысить механические свойства легированного поверхностного слоя до соответствия требованиям, предъявляемым к медным стенкам кристаллизаторов МНЛЗ, что в свою очередь повысит износостойкость медных плит.

Выводы

Установлено, что легирование поверхностного слоя медных плит кристаллизаторов МНЛЗ повысило твердость поверхностного слоя в 1,25 раза (*НВ* 59...74), предел прочности на разрыв увеличился до 180 МПа, повышение износостойкости составило 1,2...1,5 раза (при электропроводности 40...50 МСм/м) в нетермообработанном состоянии.

Показано, что для широкополосной наплавки и легирования поверхностного слоя заготовок шириной более 120 мм необходимо применять двух- или трехплазмотронную схему.

Определено, что изменение технологических параметров ПДРП и легирования (ток, скорость перемещения заготовки, частота и амплитуда колебаний плазмотронов, расход и состав плазмообразующего газа, расстояние от среза сопла до изделия и состав лигатуры) позволяет управлять

качеством поверхностного слоя медных плит кристаллизаторов МНЛЗ.

1. *Осинцев О.Е., Федоров В.Н.* Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник. — М.: Машиностроение, 2004. — 336 с.
2. *Плазменно-дуговой переплав поверхностного слоя заготовок меди и никеля / Ю.В. Латаш, Г.Ф. Торхов, Ю.И. Костенко, В.П. Кольчев // Спец. электрометаллургия. — 1988. — Вып. 57. — С. 60–65.*
3. *Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А.* Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. — М.: Машиностроение, 2008. — 406 с.
4. *Влияние технологических параметров на размеры жидкой металлической ванны при плазменно-дуговой наплавке (ПДН) медных плит кристаллизаторов МНЛЗ / В.Г. Кожемякин, В.А. Шаповалов, В.Р. Бурнашев, Д.В. Ботвинко // Современ. электрометаллургия. — 2015. — № 1. — С. 21–25.*
5. *Восстановление поверхностного слоя медной плиты кристаллизатора МНЛЗ с использованием плазменно-дуговой технологии / В.Г. Кожемякин, В.А. Шаповалов, В.Р. Бурнашев, Д.В. Ботвинко // Там же. — 2015. — № 3. — С. 25–29.*
6. *Формирование поверхности при плазменно-дуговом рафинировании поверхностного слоя / Ю.В. Латаш, Г.Ф. Торхов, В.К. Кедрин и др. // Спец. электрометаллургия. — 1983. — Вып. 51. — С. 71–73.*
7. *Меркулова Г.А.* Металловедение и термическая обработка цветных сплавов: учеб. пособие. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2008. — 312 с.
8. *Николаев А.К., Костин С.А.* Медь и жаропрочные медные сплавы: энцикл. терминолог. слов.: фундаментальный справ. — М.: ДПК Пресс, 2012. — 715 с.
9. *Упрочнение поверхностного слоя медных плит кристаллизаторов МНЛЗ гафнием с применением плазменно-дуговой технологии / В.Г. Кожемякин, В.А. Шаповалов, В.Р. Бурнашев и др. // Современная электрометаллургия. — 2015. — № 2. — С. 25–31.*
10. *Калашиников С. Г.* Электричество. — 6-е изд., стереот. — М.: Физматлит, 2004. — 624 с.
11. *Паспорт.* Микроомметр Ф4104-М1 Ба2.722.054. ПС. Электронный ресурс. Режим доступа http://www.energoaudit.ru/local/files/energoaudit/f4104_m1.pdf
12. *АТМ* — передовая технология изготовления кристаллизаторов. Электронный ресурс. Режим доступа http://www.kme-osnastka.com/uploads/all/file/amt_russisch.pdf

The present work is devoted to the study of quality of the surface layer, copper-restored and alloyed by modifiers, of copper plate of mould of the machine for continuous casting of billets using the PARS method. In this work the surface quality, metal structure, chemical composition, gas saturation, mechanical and physical properties of the alloyed and restored layer were studied. The main characteristics of the plasma-arc deposition quality is the depth of the base metal melting, width of pass with transverse oscillations by one plasmatron, cracks, pores of restored layers, lack of fusion, and also the surface rippling. Content of alloying elements in copper up to 1 mass % allowed increasing greatly its mechanical properties. All the given physical and mechanical properties of the alloyed and restored surface layer of the copper plate are indicated without heat treatment. Hardness of the surface layer is 1.25 times increased, and the tensile strength shows the increment by 8 %. The results of gas analysis showed that the oxygen content was not almost changed, and the content of hydrogen was 2 times reduced. The obtained data as to the electric conductivity of the alloyed and restored layer are commensurable with the electric conductivity of the industrial copper moulds. For the comparative evaluation of the wear resistance of the surface layers of copper plates of moulds of the machines for the continuous casting of billets the method was developed and experimental equipment was designed, allowing modeling the main processes occurring at the mould wall-metal interface. The procedure of investigations of wear resistance in this equipment was optimized. Results of carried out investigations show that the copper wear resistance was 1.2...1.5 times increased. Ref. 12. Tables 5, Figures 3.

Key words: copper plate; MCCB mould; restoration; surface layer; copper alloys; deposition quality; PARS

Поступила 11.11.2015