



УДК 669.187.2: 533.9:62-41.002

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА РАЗМЕРЫ ЖИДКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВАННЫ ПРИ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ МЕДНЫХ ПЛИТ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ

**В. Г. Кожемякин, В. А. Шаповалов, В. Р. Бурнашев, Д. В. Ботвинко**

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.  
03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Исследовано влияние технологических режимов на глубину проплавления поверхностного слоя модели медной плиты кристаллизатора МНЛЗ. В процессе экспериментов изменяли ток, скорость перемещения заготовки, частоту колебаний плазмотронов, амплитуду колебаний плазмотронов, расход и состав плазмообразующего газа, расстояние от среза сопла до изделия. Определены наименьшее значение тока плазменной дуги при наплавке с перемещением заготовки и колебательным движением плазмотрона; скорость наплавки, при которой образуется качественный наплавленный слой; состав и расход плазмообразующего газа; влияние длины плазменной дуги на глубину проплавления поверхностного слоя модели медной плиты кристаллизатора МНЛЗ. Показано, что плазменно-дуговая технология позволяет восстанавливать изношенный поверхностный слой заготовок. Технология плазменно-дугового рафинирования поверхности с применением легирующих и модифицирующих присадок позволяет вводить в поверхностный слой медной плиты кристаллизатора МНЛЗ более износостойкий материал. Приведены технологические режимы экспериментов и результаты металлографических исследований. Библиогр. 9, ил. 8.

**Ключевые слова:** кристаллизатор; плазменно-дуговая наплавка; машина непрерывного литья заготовок; восстановление; упрочнение; легирование поверхностного слоя; технологические режимы; плазменно-дуговое рафинирование поверхности; глубина проплавления

В настоящее время непрерывная разливка стали освоена более чем в 90 странах мира. Успешно действует примерно две тысячи машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) различной конструкции и назначения. По объемам разливаемой непрерывным способом стали в 2009 г. украинская металлургия занимает двенадцатую позицию в мире и четвертую в Европе после России, Германии и Италии [1].

При непрерывной разливке стали формирование слитков происходит в кристаллизаторах МНЛЗ, изготовленных из медных панелей, которые эксплуатируются в напряженных температурных условиях и подвергаются механическому абразивному износу. Вследствие этого медные стенки кристаллизатора довольно быстро выходят из строя.

Недостатком медных кристаллизаторов являются их низкие прочностные свойства при рабочих температурах ~400 °С. Процесс рекристаллизации, т. е. укрупнения зерен меди происходит уже при значениях температуры 150...200 °С. Крупные зер-

на имеют низкую твердость, вследствие чего металл разупрочняется [2].

Эффективным способом повышения износостойкости является упрочнение металла. Материал стенок кристаллизаторов должен быть достаточно теплопроводным и жаропрочным, химически неактивным по отношению к расплаву, твердым, выдерживать дополнительное термоциклирование в диапазоне рабочих температур разливки и отличаться стабильностью свойств [3].

В работе [4] проанализированы способы восстановления и упрочнения медных плит кристаллизаторов МНЛЗ. Наиболее подходящим выбран плазменно-дуговой способ.

Плазменно-дуговая наплавка (ПДН) основана на ранее разработанном способе плазменно-дугового рафинирования поверхности (ПДРП) с применением легирующих и модифицирующих присадок (лигатур) [5, 6]. При ПДН плоских заготовок на их поверхности путем расплавления поверхностно-

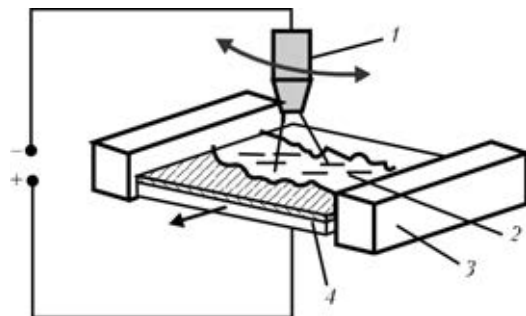


Рис. 1. Схема работы плазменно-дуговой установки ОБ-1957: 1 — плазмотрон; 2 — ванна жидкого металла; 3 — кристаллизатор; 4 — обрабатываемая заготовка

го слоя (основы) заготовки и присадочного материала наводится жидкая металлическая ванна.

Эксперименты проводили на установке ОБ-1957 в контролируемой инертной атмосфере, представляющей герметичную охлаждаемую цилиндрическую камеру, внутри которой под вертикально расположенным плазмотроном в горизонтальной плоскости перемещается заготовка (модель медной плиты кристаллизатора), окруженная медными охлаждаемыми пластинами (кристаллизаторами). Плазмотрону сообщалось колебательное движение в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения заготовки. Установка оснащена плазмотроном ПД-110 с диаметрами катода и соплового канала 10 и 12 мм соответственно. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон чистый (ГОСТ 10157-79) и аргоно-гелиевую смесь.

При движении заготовки относительно плазмотрона перемещался фронт наплавки и кристаллизации металла, последовательно наплавлялась вся поверхность медной плиты кристаллизатора. На рис. 1 показана схема установки для плазменно-дугового переплава ОБ-1957. Управление установкой происходило с пульта. Электрическое питание плазмотронов осуществлялось источниками переменного тока типа А-1458. Установка снабжена форвакуумным насосом ВН-6Г, с помощью которого камера вакуумировалась. Уровень остаточного давления контролировали вакууметром типа ВТ-3. Далее камера заполнялась защитным газом — аргоном с избыточным давлением 0,13 МПа.

Эксперименты по восстановлению и упрочнению поверхностного слоя проводились на медных моделях плит кристаллизаторов МНЛЗ.

Модели кристаллизатора изготавливались согласно всем требованиям, предъявляемым к кристаллизаторам МНЛЗ. Форму и размеры модели определяли исходя из литературных данных, патентов, полезных моделей и кристаллизаторов фирмы «Уралмаш» [7]. Были получены несколько различных моделей кристаллизаторов размерами 135×120×70. Каналы для прохождения охлаждающей воды расположили по оси симметрии толщины стенок. Кристаллизаторы имели 2 или 3 канала охлаждения диаметрами 20, 22 и 30 мм, а также рабочей толщиной (расстояние от каналов охлаждения до поверхности кристаллизатора) 20 и 30 мм (рис. 2).

Перед процессом наплавки на поверхность заготовки закладывался присадочный материал. В случае восстановления поверхностного слоя кристаллизатора использовали чистую медь в виде лома общей массой 0,5...1,0 кг в зависимости от толщины восстанавливаемого слоя, при упрочнении поверхностного слоя — лигатуру из медного сплава общей массой 0,3 кг.

Для упрочнения поверхностного слоя модели кристаллизатора МНЛЗ были выбраны сплавы на основе меди с высокими значениями теплопроводности, температуры разупрочнения и стойкости: CuNi, CuNiB, CuHf, CuZr, CuTi, CuAg, CuCr, CuCrZr [4].

Способ ПДН имеет ряд преимуществ перед другими способами восстановления и упрочнения поверхностного слоя плоских заготовок [4, 8]. Процесс плазменной наплавки обеспечивается большим количеством регулируемых параметров [9].

Для определения приемлемых режимов плазменно-дугового восстановления и упрочнения поверхностного слоя моделей медных плит кристаллизаторов проведена серия экспериментов, в процессе которых изменяли технологические параметры (ток, скорость перемещения заготовки, частоту колебаний плазмотронов, амплитуду колебаний плазмотронов, расход и состав плазмообразующего газа, расстояние от среза сопла до изделия) [5, 6].

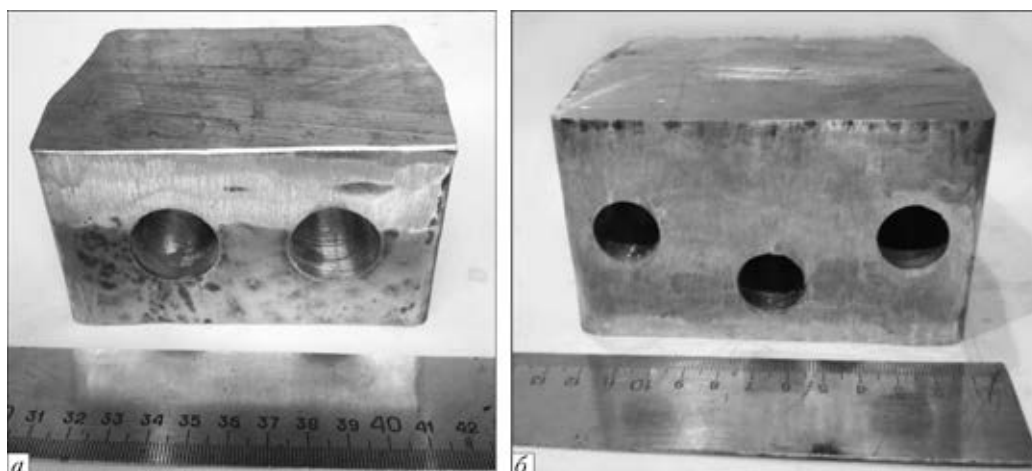


Рис. 2. Модели кристаллизаторов с двумя (а) и тремя (б) каналами охлаждения

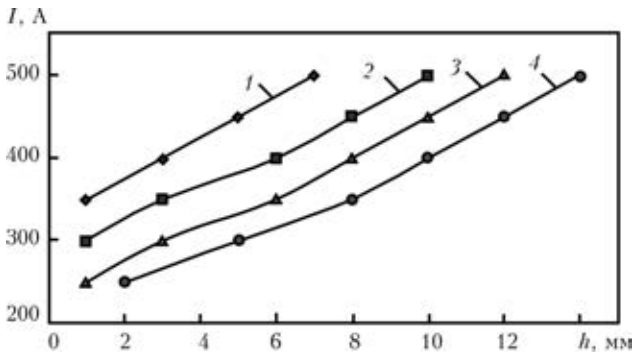


Рис. 3. Зависимость глубины  $h$  проплавления поверхностного слоя модели медного кристаллизатора МНЛЗ от тока и времени нагрева, мин: 1 – 8; 2 – 10; 3 – 12; 4 – 15

**Основные технологические характеристики процесса ПДН**

Ток плазменной дуги, А	250...500
Напряжение на плазматронах, В	40...70
Скорость перемещения заготовки, мм/мин	0...25
Частота колебаний плазматронов, 1/мин	5...10
Амплитуда колебаний плазматронов, мм	0...60
Длина плазменных дуг, мм	20...50
Мощность дуги, кВт	17,5...28,0
Расход плазмообразующего газа (контролировали по показаниям ротаметров РС-3 и РС-3А), л/мин	5...7
Давление газа в рабочей камере, Па	1,2...1,4·10 <sup>5</sup>

Перед процессом наплавки заготовку предварительно нагревали до температуры, равной 0,3...0,6 температуры плавления. Процесс подгрева проводили с перемещением и без плазменной дугой с колебаниями плазматрона по всей ширине заготовки. Скорость перемещения составляла 25 мм/мин, время разогрева достигало 10 мин.

Ток плазменной дуги  $I$  изменяли в пределах 250...500 А, мощность дуги – в интервале 18...25 кВт. При значении тока до 250 А происходит расплавление лигатуры, поверхность основы не расплавляется вследствие интенсивного теплоотвода от зоны нагрева. При токах выше 250 А происходит проплавление поверхности основы и образуется ванна жидкого металла. На рис. 3 показана зависимость тока плазменной дуги от глубины проплавления поверхности основы.

Дальнейшее увеличение тока (свыше 500 А) и времени нагрева (более 15 мин) становится нецелесообразным, поскольку глубина проплавления увеличивается и при этом может произойти проплавление каналов для прохождения охлаждающей воды в медной плите кристаллизатора МНЛЗ.

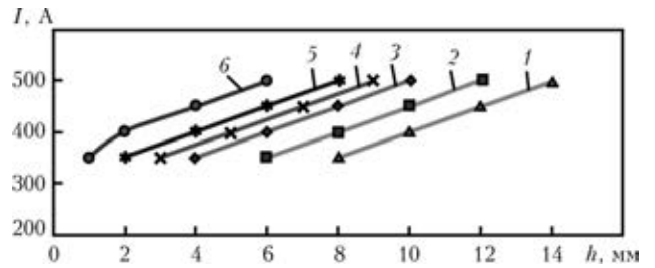


Рис. 4. Зависимость глубины проплавления поверхностного слоя модели медного кристаллизатора МНЛЗ от тока и скорости перемещения заготовки, мм/мин: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15; 5 – 20; 6 – 25; плазмообразующий газ – аргон

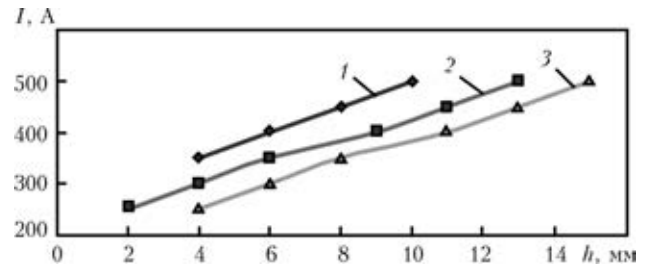


Рис. 5. Зависимость глубины проплавления поверхностного слоя модели медного кристаллизатора МНЛЗ от тока и состава плазмообразующего газа: 1 – Ar; 2 – Ar + He 30%; 3 – Ar + He 50%

На глубину проплавления металлической ванны влияет скорость перемещения заготовки  $v$  относительно плазматрона. Скорость регулировали в пределах 0...25 мм/мин. При увеличении скорости движения заготовки глубина проплавления уменьшается (рис. 4). При скорости 5 мм/мин и токе плазменной дуги 500 А глубина проплавления поверхностного слоя может достигать 12 мм, а при скорости 25 мм/мин и том же токе – 6 мм.

Для наплавки по всей ширине медной плиты (120 мм) производили колебательные движения плазматрона с амплитудой 60 мм и частотой 2 мин<sup>-1</sup>. С применением колебаний с амплитудой 60 мм минимальное значение тока, при котором возможно

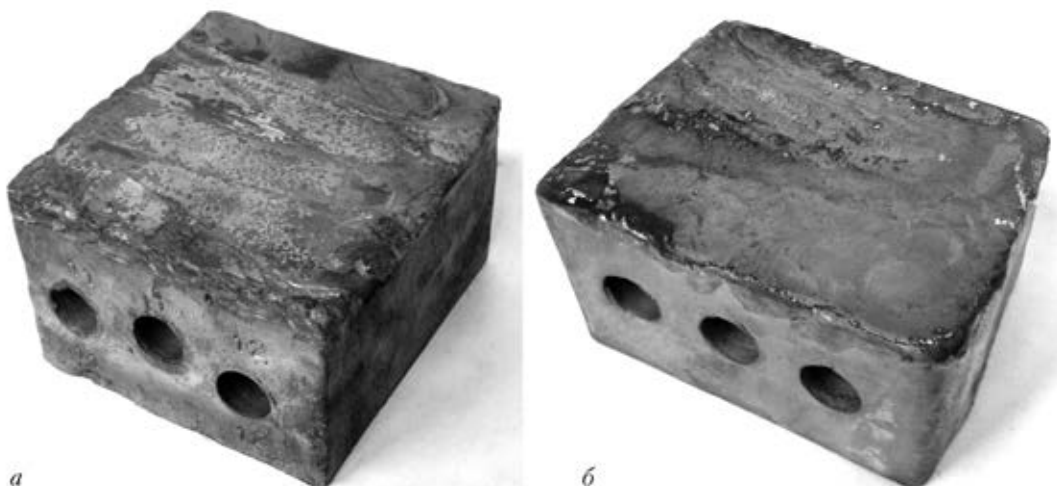


Рис. 6. Внешний вид восстановленного (а) и упрочненного (б) поверхностного слоя модели медного кристаллизатора МНЛЗ

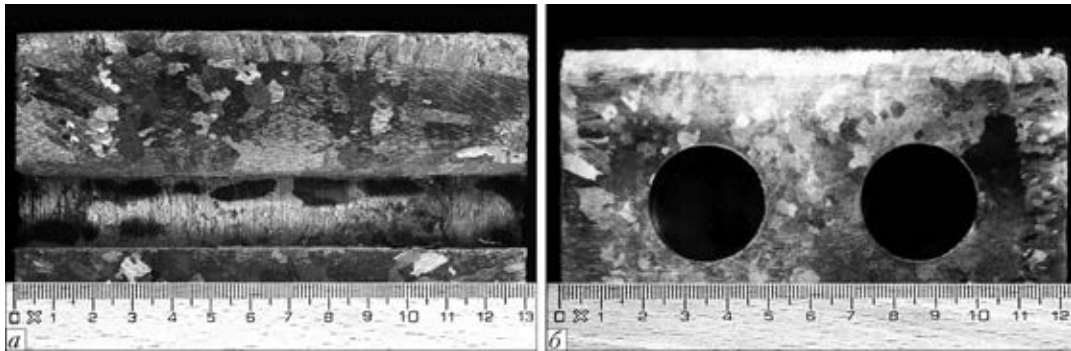


Рис. 7. Макрошлиф восстановленного (а) и упрочненного (б) поверхностного слоя модели медного кристаллизатора МНЛЗ

расплавление основы без перемещения заготовки (медной плиты), увеличивается от 250 до 300 А. Это происходит вследствие рассредоточения теплового потока от плазменной дуги и интенсивного теплообмена. Минимальное значение тока, при котором используются перемещение и колебательное движение, увеличивается до 350 А.

Выбор плазмообразующего газа определяется его физико-химическими свойствами, особенно такими, как теплопроводность, теплоемкость. В качестве плазмообразующего газа при наплавке применяется аргон и аргоно-гелиевая смесь, способствующие достижению наиболее высокой температуры плазмы при наименьших значениях напряжения дуги, энергии, подводимой к дуге, и коэффициента использования ее на нагрев газов.

Применение аргоно-гелиевой смеси в качестве плазмообразующего газа является более эффективным по сравнению с чистым аргоном, т. к. теплоемкость гелия при 1200 °С составляет 63, а аргона — 11,6 кДж/г.

Глубина проплавления существенно увеличивается при использовании аргоно-гелиевой смеси (30 % He) от 10 до 13 мм при значении тока 500 А и скорости движения 10 мм/мин. В случае использования аргоно-гелиевой смеси с содержанием гелия 50 % при тех же режимах глубина проплавления возрастает до 15 мм (рис. 5).

Таким образом, возрастание расхода гелия в аргоно-гелиевой смеси значительно повышает эффективность процесса наплавки. Изменение от 1 до  $2,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с позволяет увеличить глубину про-

плавления, а следовательно, и скорость наплавки в 1,5 раза.

Приемлемый расход аргоно-гелиевой смеси составляет  $(2...5) \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с. При расходе аргоно-гелиевой смеси выше  $5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с глубина проплавления изменяется незначительно.

Увеличение длины плазменной дуги приводит к повышению ее мощности в результате роста напряжения при постоянном токе. Однако плотность теплового потока уменьшается вследствие расширения плазменной дуги по мере увеличения расстояния от среза сопла плазмотрона.

Уменьшение длины плазменной дуги от 5 до  $2,5 \cdot 10^{-2}$  м приводит к увеличению глубины проплавления, но количество расплавленного металла при этом уменьшается, что можно объяснить уменьшением площади пятна нагрева.

В результате проведенных экспериментов были восстановлены и упрочнены поверхности моделей медных плит кристаллизаторов (рис. 6), из которых вырезаны продольные и поперечные темплеты. На указанных образцах проведены металлографические исследования.

Из вырезанных темплетов изготовили макрошлифы (рис. 7). На поперечных темплетах видно, что в зоне сплавления металл плотный, трещин, пор и других дефектов не обнаружено.

Геометрические размеры жидкой ванны (глубину проплавления) определяли на макрошлифах, изготовленных из темплетов. С учетом размеров жидкой ванны рассчитывали массу расплавленного металла, параметры наплавленного слоя, удельный расход электрической энергии.

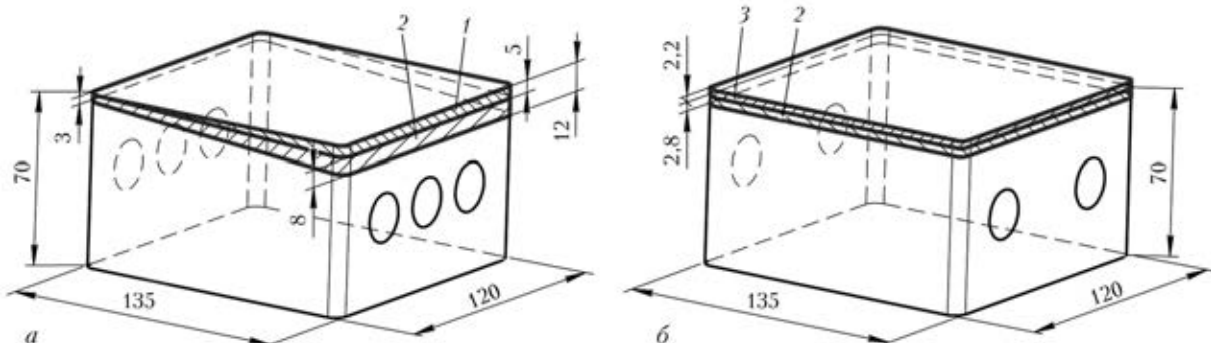


Рис. 8. Схема восстановленного (а) и упрочненного (б) поверхностного слоя медных моделей кристаллизаторов МНЛЗ: 1 — восстановленный слой; 2 — глубина проплавления; 3 — наплавленный слой



На рис. 8, а показан восстановленный поверхностный слой кристаллизатора на рабочей поверхности которого был смоделирован износ, составляющий в нижней части и в углах до 5 мм.

В результате экспериментов по восстановлению поверхностного слоя восстановлен слой до 5 мм с различной глубиной проплавления (от 3 до 8 мм), которая зависела от технологических параметров процесса наплавки и геометрических размеров детали, включая износ на поверхности.

На рис. 8, б показана схема наплавки упрочненного различными лигатурами (CuNi, CuNiB, CuHf, CuZr, CuTi, CuAg, CuCr, CuCrZr) поверхностного слоя. Высота наплавленного слоя 2,2 мм с глубиной проплавления 2,8 мм, что позволило получить 5 мм упрочненного слоя. Таким образом, толщина кристаллизатора увеличилась от 70,0 до 72,2 мм.

### Выводы

1. Определены минимальное значение тока  $I$ , при котором происходит проплавление поверхности основы и образуется ванна жидкого металла, включая скорость перемещения заготовки и колебательные движения (350 А), приемлемая скорость наплавки (10 мм/мин), вид плазмообразующего газа (аргоно-гелиевая смесь с содержанием гелия 30...50 %) и приемлемый расход аргоно-гелиевой смеси  $(2...5) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ .

2. Устаеновлено, что уменьшение длины плазменной дуги от 5 до  $2,5 \cdot 10^{-2}$  м приводит к увели-

чению глубины проплавления, но количество расплавленного металла при этом уменьшается.

3. Изменяя технологические параметры процесса наплавки можно управлять размерами жидкой металлической ванны.

1. Смирнов А. Н. 50 лет непрерывной разливке стали в Украине // Металл и литье Украины. — Донецк, 2010. — С. 3–8.
2. Пат. 2333087 РФ, МПК В 23 Р 006/00, В 23 Н 009/00, В 22 D0 11/059. Способ восстановления рабочих стенок кристаллизатора из меди или ее сплавов / А. А. Киричков, Ю. А. Данилин, Е. М. Файншмидт и др. — Опубл. 10.09.2008; Бюл. № 25.
3. Производство медных стенок кристаллизаторов для МНЛЗ // <http://mlu.com.ua/pub/32-proizvodstvo-mednyx-stenok-kristalizatorov-dlya.html>.
4. Причины разрушения и способы упрочнения медных плит кристаллизаторов МНЛЗ / В.Г. Кожемякин, В. А. Шаповалов, В. Р. Бурнашев и др. // Современ. электрометаллургия. — 2014. — № 4. — С 37–45.
5. Особенности плазменно-дугового переплава поверхностного слоя заготовок из металлов с высокой теплопроводностью / Ю. В. Латаш, Г. Ф. Торхов, М. И. Таранов, А. А. Куранов // Спец. электрометаллургия. — 1984. — Вып. 55. — С. 80–85.
6. Некоторые закономерности плазменно-дугового переплава поверхностного слоя плоских заготовок / Ю. В. Латаш, Г. Ф. Торхов, В. К. Кедрин, М. И. Таранов // Там же. — 1981. — Вып. 47. — С. 101–106.
7. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Л. В. Буланов, Л. Г. Корзунин, Е. П. Парфенов и др. — Екатеринбург: УЦПРР «Марат», 2003. — 320 с.
8. Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменная наплавка. — Киев: Экотехнология, 2007. — 292 с.
9. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. — М.: Машиностроение, 2008. — 406 с.

Investigated was the effect of technological conditions on depth of penetration of surface layer of model of copper plate of the machine for continuous casting of billets (MCCB). During experiments the current, speed of billet displacement, frequency of oscillation of plasmatrions, amplitude of oscillations of plasmatrions, consumption and composition of plasma-forming gas, distance from nozzle cut up to the product were changed. Determined were the least value of plasma arc current during melting with billet displacement and oscillating movement of plasmatron; surfacing speed at which the quality surfaced layer is formed; composition and consumption of plasma-forming gas; effect of length of plasma arc on depth of penetration of surface layer of model of the MCCB mould copper plate, It was shown that the plasma-arc technology allows restoring the worn-out surface layer of billets. Technology of plasma-arc refining of surface with application of alloying and modifying fillers makes it possible to add the more wear-resistant material into the surface layer of the MCCB mould copper plate. Technological conditions of experiments and results of metallographic examinations are given. 9 Ref., 8 Figures.

**Key words:** mould; plasma-arc surfacing; machine for continuous casting of billets; restoration; hardening; surface layer alloying; technological conditions; plasma-arc refining of surface; depth of penetration

Поступила 04.12.2014



## XIII Всеукраинская научно-практическая конференция «СПЕЦИАЛЬНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА»

Киев, НТУУ «КПИ», 21 апреля 2015 г.

Михаленков Константин Викторович, тел.: (093) 478-19-61,  
Рыбак Вячеслав Николаевич, тел.: (067) 918-64-76  
E-mail: admin@fhotm.kpi.ua