

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УПРОЧНЕННЫХ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Кожемякин В. Г., Шаповалов В. А., Бурнашев В. Р., Биктагиров Ф. К.

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. Проведены испытания образцов, полученных плазменно-дуговой наплавкой меди медно-никелевыми сплавами с различным содержанием никеля. Показано, что износостойкость легированной никелем меди повышается по сравнению с чистой медью в 1,2–1,4 раза.

Для порівняльної оцінки зносостійкості поверхневого шару мідних плит кристалізаторів МБЛЗ розроблена методика і створена експериментальна установка, яка дозволяє моделювати основні процеси, що відбуваються на границі стінки кристалізатора – метал. Проведено випробування зразків, отриманих плазменно-дуговим наплавленням міді мідно-нікелевими сплавами з різним вмістом нікелю. Показано, що зносостійкість легованої нікелем міді підвищується в порівнянні з чистою міддю в 1,2–1,4 рази.

To compare the wear resistance of the surface layer of copper plates of caster technique and developed an experimental setup that allows you to simulate the main processes occurring in the border wall of the mold - metal. The samples were tested received plasma-arc welding of copper copper-nickel alloys with different contents of nickel. It is shown that the wear resistance of nickel-copper alloy is increased in comparison with pure copper 1,2–1,4 times.

Кожемякин В. Г.

мл. науч. сотр. отдела № 20
ИЭС НАНУ

waldemar@paton.institute

Шаповалов В. А.

д-р техн. наук, проф., зав. отделом № 20
ИЭС НАНУ

shapovalov@paton.kiev.ua

Бурнашев В. Р.

канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
отдела № 20 ИЭС НАНУ

Биктагиров Ф. К.

д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр.
отдела № 20 ИЭС НАНУ
biktagirov@paton.kiev.ua

ИЭС НАНУ – Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев.

УДК 621.9: 669.2

Кожемякин В. Г., Шаповалов В. А., Бурнашев В. Р., Биктагиров Ф. К.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УПРОЧНЕННЫХ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Одним из путей увеличения ресурса эксплуатации кристаллизаторов МНЛЗ является легирование поверхностного слоя медных плит, направленное на повышение их износостойкости. При сравнительном исследовании износостойкости моделей медных кристаллизаторов с упрочнением поверхности за счет легирования меди различными элементами необходимо учитывать процессы, происходящие при разливке стали на МНЛЗ. Существующие методы определения износостойкости материалов не позволяют создать условия, подобные тем, которым подвергается рабочая стенка кристаллизатора. Поэтому было предложено сконструировать и изготовить установку для испытаний на истирание, позволяющую учитывать основные особенности эксплуатации кристаллизаторов МНЛЗ, такие как нагрев его стенки, давление стали на стенки кристаллизатора, скорость литья металла, а также скорость и частоту качания кристаллизатора [1].

Цель работы – изучить работу установки для испытаний на истирание образцов медных плит кристаллизаторов МНЛЗ, которая позволяет моделировать основные процессы, протекающие во время разливки стали.

При непрерывной разливке жидкая сталь и образовавшаяся твердая корочка оказывают интенсивное тепловое и механическое воздействие на поверхность кристаллизатора. Так, по данным промышленных испытаний температура внутренних стенок кристаллизатора в зависимости от степени их охлаждения и сроков эксплуатации может составлять от 260 до 400 °С [1]. Скорость разливки на МНЛЗ в зависимости от номенклатуры получаемых заготовок колеблется от 0,8 до 5,5 м/мин. Скорость перемещения кристаллизатора вверх и вниз изменяется в следующей последовательности: вниз он опускается со скоростью движения слитка, а вверх – с вдвое большей скоростью. Амплитуда качания изменяется в пределах от 1 до 40 мм, частота – от 10 до 600 циклов в минуту (табл. 1).

Таблица 1

Основные характеристики кристаллизаторов МНЛЗ [2–6]

Тип	Сборные, блочные, гильзовые
Форма	Прямолинейные, радиальные
Материал	Медь
Высота	500...1500 мм
Ширина	50x50 ... 500x500
Толщина рабочей стенки	10...70 мм
Каналы для охлаждения	Сверленные цилиндрические, прямоугольные фрезерованные
Охлаждающая вода	Давление 0,5...0,8 МПа, скорость 5...10 м/с, расход 350 м ³ /ч
Профиль кристаллизатора	Прямой, с обратной конусностью
Смазка	Масла, парафины, шлаковые смеси
Температура стенки	260...400°С
Ферростатическое давление	6,3...9,8 Н/см ²
Сила трения между стенкой и коркой металла	Коэффициент трения 0,5...0,2
Стойкость	До 50 плавов
Скорость разливки на МНЛЗ	0,8...5,5 м/мин
Амплитуда качания кристаллизатора	1...40 мм
Частота качания кристаллизатора	10...600 ц/мин

При движении через кристаллизатор жидкий металл оказывает ферростатическое давление P на затвердевшую корочку (рис. 1). Затвердевшая корочка, в свою очередь, оказывает давление на стенку кристаллизатора, что приводит к абразивному его износу [7]. Давления P на стенки кристаллизатора будет зависеть от высоты столба жидкого металла (h), т.е. высоты кристаллизатора за минусом расстояния до уровня мениска, и удельного веса жидкого металла (γ). Высота кристаллизатора МНЛЗ в среднем составляет 1...1,5 м, а высота мениска около 0,1 м, тогда $h = 1...1,5 - 0,1 = 0,9...1,4$ м. В этом случае применительно к разливке стали:

$$P = \gamma \cdot g \cdot h = 7000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot (0,9 \dots 1,4) \text{ м} = 63000 \dots 98000 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 6,3 \dots 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{см}^2},$$

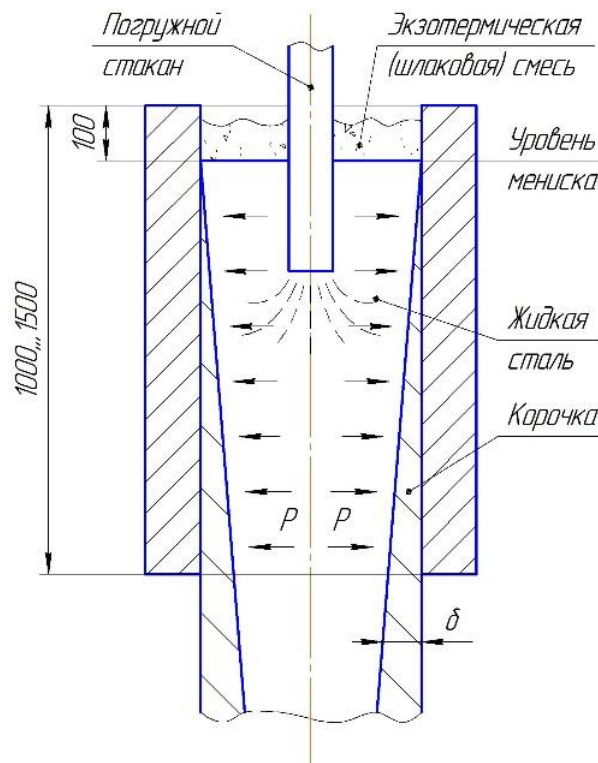


Рис. 1. Схема распределения ферростатического давления в кристаллизаторе МНЛЗ

Конструкция и технологические режимы работы установки на истирание выбирались, исходя из вышеуказанных режимов работы кристаллизатора МНЛЗ.

Основой для создания экспериментальной установки послужила разработанная в ИЭС им. Патона НАНУ блочно-модульная установка для испытаний металлов на истирание [8].

Исследования проводились по методике, разработанной для определения износостойкости наплавленного металла [9, 10] путем истирания поверхности испытуемого образца при его соприкосновении с истирающим диском. В качестве его использовался диск из стали 45 и твердостью 45HRC диаметром 200 мм и толщиной 15 мм и рабочей окружностью 160 мм. Истирающий диск нагревали до температуры 500...550°C, которую контролировали с помощью оптического пирометра (DT-8865).

Скорость вращения истирающего диска выбиралась из расчета скорости литья в МНЛЗ 0,8...5,5 м/мин. Тогда скорость истирающего диска составляет:

$$\omega = \frac{V}{r} = \frac{0,8 \dots 5,5}{0,16} = 5 \dots 34,4 \text{ мин}^{-1}$$

Скорость вращения истирающего диска плавно регулировалась с пульта управления.

Упрочнение поверхности моделей медных плит кристаллизаторов МНЛЗ осуществляли методом плазменно-дуговой наплавки с введением заданного количества легирующего

элемента в наплавленный слой. Наплавка проводилась аналогично разработанному в ИЭС им. Е. О. Патона способу переплава и оплавления поверхностного слоя металлических заготовок, в том числе медных [11].

Из упрочненных медных плит вырезались образцы размерами $40 \times 17 \times 10$ мм. Толщина упрочненного слоя после механической обработки составила 3...4 мм. Испытываемая деталь закреплялась в струбине, которая в свою очередь, имела возможность совершать возвратно-поступательное движение (колебания), имитирующее качание кристаллизатора. Скорость возвратно-поступательных движений и величина хода (амплитуда) рассчитывалась из условия качаний кристаллизатора в пределах $\nu = 10 \dots 600 \text{ мин}^{-1}$ и $l = 1 \dots 40$ мм. Скорость возвратно-поступательных движений детали регулировалась с пульта управления. Температура испытываемого образца находилась в пределах $350 \dots 400^\circ\text{C}$ и измерялась с помощью термопары (тип К), которая находилась в образце на расстоянии 3 мм от рабочей поверхности.

Давление, с которым испытываемая деталь действовала на истирающий диск, рассчитывалось, исходя из максимального давления затвердевшей корочки на стенки кристаллизатора в процессе литья. Ферростатическое давление на нижнем срезе составляет $6,3 \dots 9,8 \frac{\text{H}}{\text{см}^2}$. Тогда сила F , с которой необходимо давить на образец, площадью $S = 4 \text{ см}^2$ ($40 \times 10 \text{ мм}$), равна:

$$F = P \cdot S = 6,3 \dots 9,8 \frac{\text{H}}{\text{см}^2} 4 \text{ см}^2 = 25,2 \dots 39,2 \text{ Н.}$$

Давление образца на истирающий диск с силой около 40 Н оказывала специальная поджимающая пружина.

После проведения испытаний вычисляли потерю массы за 1 км пройденного пути j_0 по формуле:

$$j_0 = \frac{\Delta m}{l} \text{ (кг/км)},$$

где Δm – изменение массы образца, кг; l – на пройденный путь, км.

Таблица 2

Режимы работы установки на истирание

№	Параметры	Величина
1	Нагрузка	40 Н
2	Скорость вращения истирающего диска (контртела)	12 об/мин
3	Диаметр рабочей поверхности истирающего диска	160 мм
4	Амплитуда колебаний образца в вертикальной плоскости	8 мм
5	Частота колебаний образца	120 мин^{-1}
6	Температура истирающего диска (контртела)	$500 \dots 550^\circ\text{C}$
7	Температура образца в зоне истирания	$350 \dots 400^\circ\text{C}$
8	Время испытаний	45 мин

На рис. 2 приведена принципиальная схема устройства для испытаний на истирание при трении металла по металлу при повышенных температурах.

Потеря массы Δm образца определялась путем взвешивания образцов до (m_1) и после (m_2) проведения испытаний на истирание:

$$\Delta m = m_1 - m_2 \text{ (кг)}$$

Длина пути l рассчитывается по формуле:

$$l = \pi \cdot d \cdot n \cdot t \cdot 10^{-6} \text{ (км)}$$

где $\pi = 3,14$; d – диаметр контртела, мм; n – скорость вращения контртела в минуту, об/мин; t – время испытания, мин.

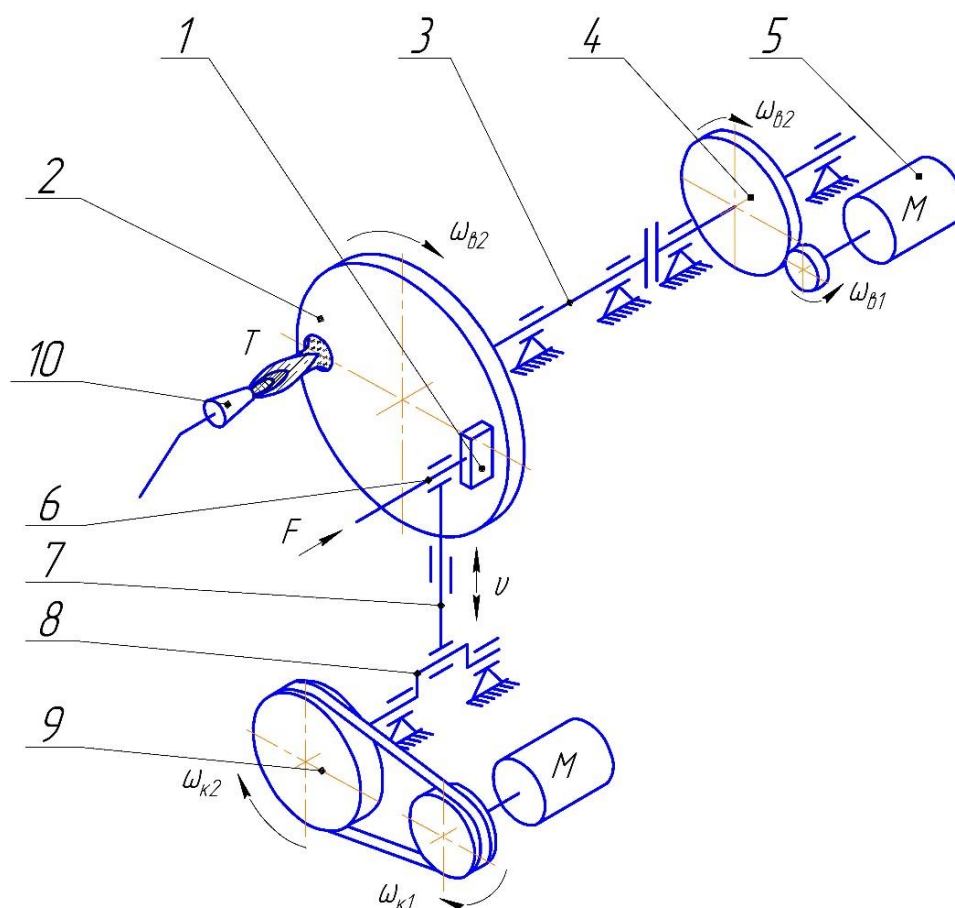


Рис. 2. Принципиальная схема устройства для испытаний на изнашивание:

1 – испытуемая деталь; 2 – истирающий диск; 3 – вал; 4 – зубчатая передача; 5 – электродвигатели; 6 – механизм регулирования силы прижима детали к диску; 7 – шатун; 8 – коленчатый вал; 9 – ременная передача; 10 – газовая горелка;

F – сила прижима детали к диску; $\omega_{\beta 1}$ – скорость вращения 1 двигателя; $\omega_{\beta 2}$ – скорость вращения истирающего диска; $\omega_{\kappa 1}$ – скорость вращения 2 двигателя; $\omega_{\kappa 2}$ – скорость вращения коленчатого вала; ν – частота колебаний шатуна и детали; T – источник нагрева

Износостойкость $j_{\text{из}}$ упрочненного поверхностного слоя определяется отношением потери массы (износа) легированного образца $j_{\text{ол}}$ к потере массы (износу) образца из чистой меди $j_{\text{ом}}$ за 1 км пройденного пути.

$$j_{\text{из}} = \frac{j_{\text{ол}}}{j_{\text{ом}}},$$

где $j_{\text{ол}}$ – потеря массы легированного образца; $j_{\text{ом}}$ – потеря массы образца из чистой меди.

Результаты исследований на истирание применительно к легированным никелем образцам приведены в табл. 3.

Проведенные испытания показали работоспособность созданной установки и ее пригодность для исследований образцов медных плит кристаллизаторов МНЛЗ. Согласно вышеприведенным данным, легирование меди никелем приводит к повышению ее сопротивления истиранию. Так, износостойкость медно-никелевого сплава при содержании никеля около 1 % в 1,2–1,4 раза выше по сравнению с чистой медью.

Таблица 3

Результаты испытаний износостойкости

Образцы	№1	№2	№3	№4
Длина пути l , км	0,2713			
Частота вращения n , об/мин	12			
Вес образца до испытания m_1 , г	53,921	60,166	58,303	52,642
Вес образца после испытания m_2 , г	53,823	60,075	58,225	52,571
Разница между значениями масс Δm , г	0,098	0,091	0,078	0,071
Потеря массы образца, j_0 , г/км	0,3612	0,3354	0,2875	0,2617
Износостойкость, $j_{0из}$ ед.	1	1,077	1,256	1,380
Содержание никеля в меди, % масс.	-	0,59	0,99	1,07

Примечание. №1 – чистая медь; № 2,3,4 – образцы легированные никелем

ВЫВОДЫ

1. Сконструирована и изготовлена установка для испытаний на истирание образцов медных плит кристаллизаторов МНЛЗ, которая позволяет моделировать основные процессы, протекающие во время разлива стали, а именно: движение льющейся стали и качания кристаллизатора, нагрев стенки кристаллизатора, а также давление затвердевшей корочки металла на стенки кристаллизатора. Отработана методика исследований износостойкости на данной установке.

2. Проведены испытания образцов меди, легированных никелем. Показано, что при содержании в меди никеля в количестве 1,0 % масс., износостойкость ее повышается в 1,2–1,4 раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- <http://uas.su/books/mnlz/3.3.3.2/razdel3332.php>.
- <http://metallurgiya.net/metallurgiyastali/186-kristallizatory-mnlz.html>.
- http://emchezgia.ru/razlivka/18_ustroistvo_kristallizatora.php.
- <http://steellab.com.ua/books/teplorabotaMNLZ/3.1/3.1.php>.
- <http://ntc-orion.ru/osnovnye-uzly-mnlz-mehanizm-kachaniya>.
- Машины непрерывного литья заготовок Теория и расчет / Л. В. Буланов, Л. Г. Корзунин, Е. П. Парфенов [и др.] // Уральский центр ПР и рекламы – Марат, 2004. – 349 с.
- Бойко Ю. П. Конструирование машин для металлургических процессов / Ю. П. Бойко, О. С. Ануфриенко, Н. Я. Подоляк.
- Рябцев И. И. Блочно-модульная установка для испытаний наплавленного металла / И. И. Рябцев, Я. П. Черняк, В. В. Осин // Сварщик. – 2004. – № 1. – С. 18–20.
- Металловедение и термическая обработка стали: справочник: в 3 т. / Под ред. М. Л. Бернштейн, А. Г. Рахитадт. // Т. 1: Методы испытаний и исследования: в 2 кн., Кн. 1 / Б. А. Клытин [и др.]. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1991.
- Ланин А. Г. Методы определения термической прочности (обзор) / А. Г. Ланин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1998. – №3. – С. 31–47.
- Особенности плазменно-дугового переплава поверхностного слоя заготовок из металлов с высокой теплопроводностью / Ю. В. Латаш, Г. Ф. Торхов, М. И. Таранов, А. А. Куранов // Специальная электрометаллургия. – 1984. – Вып. 55. – С. 80–85.

Статья поступила в редакцию 05.10.2015 г