



The technical process of production and restoration of worn cathodes and targets of chemically active metals (Ti, Zr, V and others) with the help of cathode ray in vacuum is developed. Regenerating of worn cathodes, targets is carried out by means of insertion in chill of worn base and successive cathode ray deposition on certain places of required quantity of metal (from 2 till 50mm).

А. В. АЛИФАНОВ, В. Н. АЛЕХНОВИЧ, В. В. АЛЕХНОВИЧ, ФТИ НАН Беларуси

УДК 621.9.048.7

ПОЛУЧЕНИЕ КАТОДОВ И МИШЕНЕЙ ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ ИЗ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ПЕРЕПЛАВА

Введение

Применение специальных методов литья и высокоэффективных источников нагрева позволяет решать задачу изготовления катодов и мишеней повышенной чистоты из химически активных металлов. В данной работе рассмотрен процесс получения литых циркониевых катодов путем электронно-лучевого переплава металла в условиях вакуума методом последовательного формирования отливки в водоохлаждаемом кокиле.

Определение условий формирования качественной отливки

Качество формируемого литого катода, предназначенного для распыления в установках ионно-плазменного упрочнения, определяется не только чистотой применяемого металла, но и наличием пор, раковин, несплавлений. Электрическая дуга, горящая на поверхности катода, попав в пору или раковину шириной 3–5 мм и глубиной более 5 мм, гаснет, нарушая ход процесса упрочнения. Отсутствие или наличие дефектов в процессе формирования отливки проявляется в зависимости от режимов процесса плавления. Основным условием отсутствия пор и раковин в теле отливки является правильный выбор температуры перегрева заливаемого металла и температуры подогрева поверхности формируемой отливки.

Передача тепла от порции перегретого металла массой 5–10 г, упавшей на массивное наращиваемое основание отливки, происходит с высокой скоростью, поэтому анализ разрабатываемого процесса можно свести к решению задачи о плоской стенке, контактирующей с неограниченным телом (рис. 1). Данная задача, соответствующая условию четвертого рода, рассматривалась А. И. Вейником в работе [1]. Полученное решение имеет сложный вид, что затрудняет его применение в инженерной практике. Учитывая, что толщина наращиваемого

слоя основания невелика и с целью упрощения математических расчетов примем, что температура по толщине слоя металла постоянна (рис. 2).

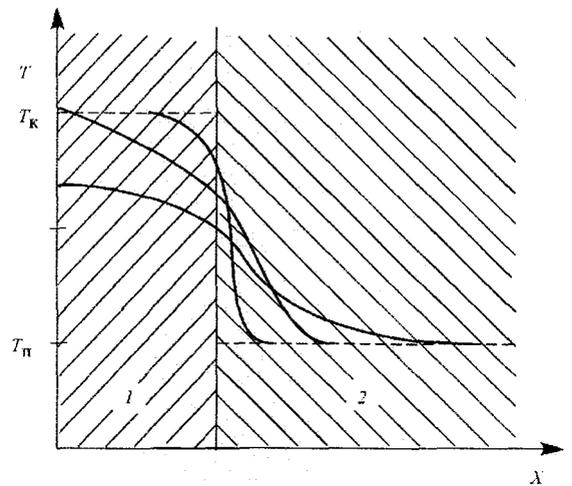


Рис. 1. Схема распределения температуры в сечении плоской стенки (1) и неограниченной среды (2)

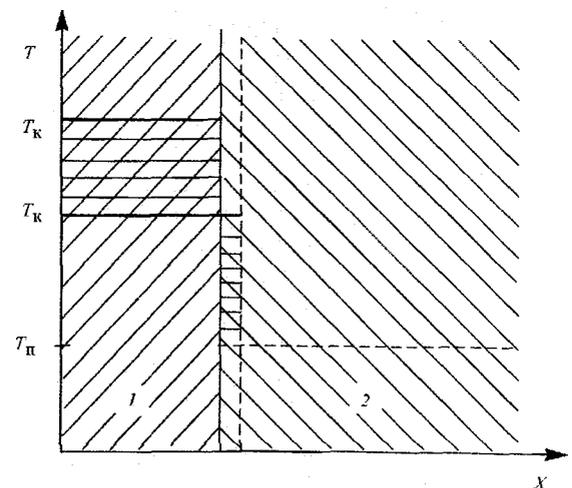


Рис. 2. Схема распределения температуры в сечении плоской стенки (1) и неограниченной среды (2) с учетом принятых допущений

Тогда количество теплоты, теряемой каплей в процессе теплообмена $m_o C_o (T_{пер.о} - T_{пл.о})$, равно количеству теплоты, полученному тонким слоем подложки толщиной ξ в процессе теплового контакта:

$$m_o C_o (T_{пер.о} - T_{пл.о}) = \xi F \rho_o C (T_{пл.о} - T_{ср.о}), \quad (1)$$

где m_o – масса перегретого падающего металла (например, циркония), кг; C_o – удельная теплоемкость материала отливки (циркония), Дж/(кг · К); $T_{пер.о}$ – температура перегрева выливаемого металла, К; $T_{пл.о}$ – температура плавления металла отливки, К; ξ – толщина расплавленного металла основания отливки, м; ρ_o – удельный вес материала основания отливки (циркония), Н/м³; F – площадь контакта упавшего расплавленного металла на основание отливки, м²; C – удельная теплоемкость материала основания отливки (циркония), Дж/(кг · К); $T_{ср.о}$ – температура предварительного подогрева материала основания отливки.

Отсюда, задавшись величиной ξ и зная экспериментально найденное значение площади контакта упавшего металла с основания отливки, для формирования качественной отливки можно определить требуемую величину перегрева наращиваемого металла:

$$T_k \geq T_{пл} + \frac{\xi F \rho C (T_{пл} - T_{ср.о})}{V \rho_o C_o}. \quad (2)$$

Если наращиваемая часть отливки и основание изготавливаются из одного металла (например, циркония), то выражение (2) примет вид

$$T_k \geq T_{плz} + \frac{\xi F (T_{плz} - T_{ср.о})}{V} = \frac{\xi_1}{\xi_2} (T_{плz} - T_o), \quad (3)$$

где ξ_2 – толщина наращиваемого слоя металла отливки, м.

Повышение коэффициента использования энергии электронного луча

В ряде работ [2–4] рассматривались вопросы, связанные с повышением коэффициента использования энергии электронного луча. В настоящей работе было предложено повысить коэффициент использования энергии электронного луча путем уменьшения теплового потока от отливки к кокилю, что достигается применением кокиля с внутренней ребристой поверхностью (рис. 3). Для еще большего увеличения термического сопротивления между отливкой и кокилем в пространство между ребрами наносится покрытие или кокильная краска, имеющая низкую теплопроводность. В кокиле данной конструкции непосредственного контакта жидкого металла с покрытием и кокильной краской не происходит, что способствует сохранению высокой чистоты металла отливки.

Суммарная температуропроводность зазора между отливкой и ребристой поверхностью кокиля α_3 , создающая тепловой поток от отливки к кокилю, определяется из выражения

$$\alpha_3 = \alpha_b + \alpha_{л1} = \left(\frac{(\alpha_b + \alpha_{л1}) \alpha_p}{\alpha_b + \alpha_{л1} + \alpha_p} \right) \frac{l_p}{l_p + l_b} + \left(\frac{\alpha_{л2} \alpha_{кр}}{\alpha_{л2} + \alpha_{кр}} \right) \frac{l_b}{l_p + l_b}, \quad (4)$$

где α_b – температуропроводность воздушного зазора, Вт/(м² · К); $\alpha_{л1}$ – лучистая составляющая температуропроводности, Вт/(м² · К); α_p – температуропроводность материала ребер, Вт/(м² · К); $\alpha_{кр}$ – температуропроводность материала краски, Вт/(м² · К);

$$\alpha_b = \frac{\lambda_b}{X_b}, \quad \alpha_p = \frac{\lambda_p}{X_p}, \quad \alpha_{кр} = \frac{\lambda_{кр}}{X_{кр}}, \quad (5)$$

где $\lambda_b, \lambda_p, \lambda_{кр}$ – соответственно коэффициенты теплопроводности естественного зазора, материала кокиля (ребер) и краски, Вт/(м² · К); $X_b, X_p, X_{кр}$ – соответственно толщина зазора между отливкой и кокилем, высота ребра, толщина слоя краски, м; $\alpha_{л1}$ – лучистая составляющая температуропроводности естественного зазора, Вт/(м² · К); $\alpha_{л2}$ – лучистая составляющая температуропроводности в зазоре между отливкой и кокильной краской, Вт/(м² · К);

$$\alpha_{л1} = \frac{C_1 [T_1^4 - T_2^4]}{T_1 - T_2}, \quad \alpha_{л2} = \frac{C_2 [T_1^4 - T_3^4]}{T_1 - T_3}, \quad (6)$$

где T_1, T_2, T_3 – соответственно температуры поверхности отливки, кокиля, краски, К; C_1, C_2 – приведенные коэффициенты лучеиспускания систем «поверхность отливки – поверхность кокиля», «поверхность отливки – поверхность краски»; l_p – толщина ребра, м; l_b – ширина впадины ребра, м.

Как видно из формул (4)–(6), перенос тепла в зазоре отличается исключительной сложностью, что подтверждается данными, приведенными в [5].

Величины параметров, используемых в уравнении теплопроводности (4), зависят от температуры между отливкой и кокилем и в процессе нагрева

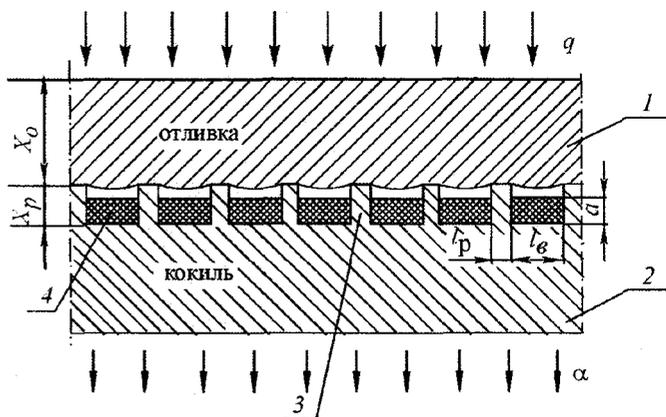


Рис. 3. Конструкция кокиля с ребристой поверхностью: 1 – отливка; 2 – кокиль; 3 – ребро; 4 – теплоизолирующее покрытие

отливки непрерывно изменяются. Поэтому точные численные значения термического сопротивления между отливкой и кокилем можно определить только экспериментальным путем. Обычно пользуются их усредненным значением.

Толщина ребер l_p и ширина впадин l_b (рис. 3) на внутренней поверхности кокиля выбираются из следующих соображений. Минимальное значение толщины ребра выбирается с учетом обеспечения его механической прочности и предельно допустимого значения температуры на вершинах ребер. Экспериментально установлено, что для медного кокиля толщина ребер должна быть не меньше 0,8 мм при высоте ребра 0,8–1,0 мм.

Ширина впадин l_b определяется из условия незатекания расплавленного металла в пространство между ребрами. При смачивании металлом отливки поверхности кокиля обычно происходит затекание металла между ребрами.

Для предотвращения затекания металла ширина впадины должна удовлетворять условию

$$l_b \leq \frac{2\sigma_{ж} \cos \theta}{X_0 \rho g}, \text{ м}, \quad (7)$$

где $\sigma_{ж}$ — коэффициент натяжения расплавленного металла отливки, Н/м; θ — краевой угол смачивания, град; X_0 — высота отливки, находящейся в жидком состоянии, м; ρ — плотность металла отливки, кг/м³; g — ускорение силы тяжести, м/с².

Приставка к установке ВУ-1Б для изготовления и восстановления циркониевых катодов

Основными критериями при разработке приставки для изготовления и восстановления циркониевых катодов на ионно-плазменной установке ВУ-1Б являлись легкость и быстрота ее переналадки. Отсутствие в вакуумных камерах ионно-плазменных установок окон для монтажа требуемых приспособлений затрудняет их переоборудование для осуществления техпроцесса литья. В связи с этим было принято решение все механизмы, необходимые для осуществления техпроцесса изготовления отливки, разместить на специально спроектированной двери вакуумной камеры. В этом случае переналадка установки для осуществления техпроцесса получения отливки будет сводиться к замене дверей вакуумной камеры, крепление которых производится двумя винтами.

Внешний вид приставки для изготовления циркониевых катодов на установке ВУ-1Б показан на рис. 4. В ее состав входят дверь вакуумной камеры 1 с установленными на ней механизмом подачи 2 переплавляемого прутка, вращающимся водоохлаждаемым кокилем 3,

электронной пушкой 4, смотровой системой 5. Приставка комплектуется серийно выпускаемым блоком питания электронной пушки. Модернизации был подвергнут механизм подачи переплавляемого металла. Схема механизма подачи показана на рис. 5.

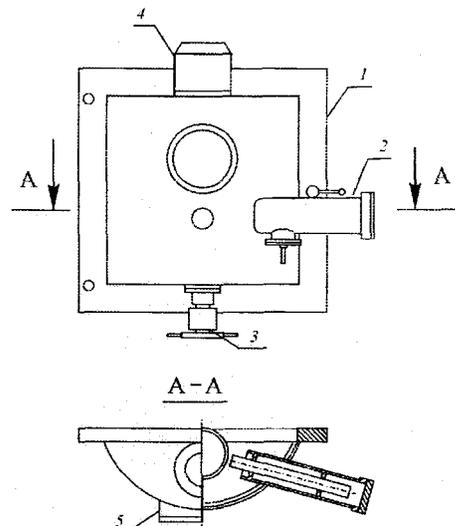


Рис. 4. Схема приставки для изготовления циркониевых катодов

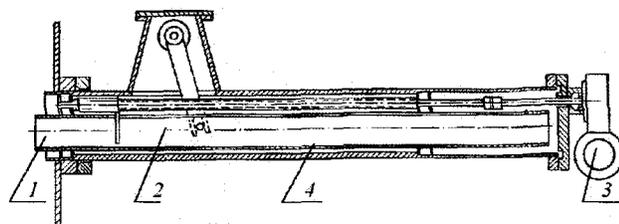


Рис. 5. Механизм подачи переплавляемого металла

Работа механизма подачи прутковой заготовки циркония в процессе получения отливки осуществляется оператором вручную. Рассматриваемый механизм позволяет совершать возвратно-поступательное движение с ходом 0,035 м контейнера 1, с находящимся в нем прутком 2, а также поступательное движение прутка из контейнера в зону действия электронного луча по мере его расплавления. Оба процесса совершаются одной ручкой управления 3. Загрузка прутка в направляющую контейнера осуществляется изнутри при открытой двери вакуумной камеры. Для предотвращения перегрева корпуса 4 механизма подачи на внутренней поверхности корпуса установлен водоохлаждаемый экран (на рисунке не показан). Откачка вакуума в камере и электронной пушке достигается с использованием средств откачки вакуумной камеры базовой установки.

В таблице приведены основные характеристики приставки и режимы изготовления циркониевого катода.

Технические характеристики приставки и режимы технологического процесса изготовления циркониевого катода

Наименование	Количество
Мощность электронного луча, кВт	3,0
Габариты изготавливаемого литого циркониевого катода, мм : диаметр высота	70 60
Габариты изготавливаемой литой циркониевой мишени, мм : диаметр высота	300 30
Время откачки воздуха из вакуумной камеры, мин	10
Давление остаточных газов в вакуумной камере, Па	$1,33 \cdot 10^{-3}$
Время формирования циркониевой отливки, мин	40
Время восстановления изношенного циркониевого катода, мин	20
Время остывания литой заготовки до $T = 100^{\circ}\text{C}$, мин: в вакууме в атмосфере аргона	30 12
Диаметр электронного луча, мм	1,5
Зона сканирования электронного луча, мм: в процессе формирования отливки в процессе выравнивания и устранения дефектов отливки	10 x 10 (1,5-2,0) x 1,5
Вращение кокиля, об/мин: в процессе формирования отливки, в процессе выравнивания, устранения поверхностных дефектов	прерывистое 0,5-6,0

Изготовление циркониевых катодов на установках ВУ-2МБС

Применение разработанной технологии изготовления литых катодов на ионно-плазменной установке второго поколения ВУ-2МБС позволило расширить ее технологические возможности. Установка данного типа включает в себя два испарителя с катодами диаметром 110 мм. Отсутствие циркониевых заготовок такого диаметра делает вопрос изготовления и реставрации катодов у потребителя особенно актуальным.

Внешний вид и схема компоновки блоков в вакуумной камере установки ВУ-2МБС показаны на рис. 6. В верхней части камеры вместо плазменного испарителя устанавливается электронная пушка 1. В нижней части камеры смонтирован сменный вращающийся водоохлаждаемый кокиль 2. На боковой стороне вакуумной камеры монтируется механизм подачи переплавляемого металла 3. На корпусе механизма подачи переплавляемого металла внутри камеры крепится устройство ввода в расплав легирующих добавок 4. Смотровая система вакуумной камеры 5 снабжена системой с вращающимся экраном 6. Электронная пушка питается от серийно выпускаемого блока питания для вакуумных установок ВУ-800.

Электронная пушка диодного типа имеет прямоканальный катод, систему фокусировки, сканирования и перемещения электронного луча во взаимно перпендикулярных координатах.

Механизм подачи переплавляемого металла собран в цилиндрическом корпусе диаметром 150 мм и длиной 800 мм (см. рис. 5). Внутри корпуса на фторопластовых направляющих перемещается контейнер с переплавляемым металлом. С помощью ручки управления 3 оператор наряду с

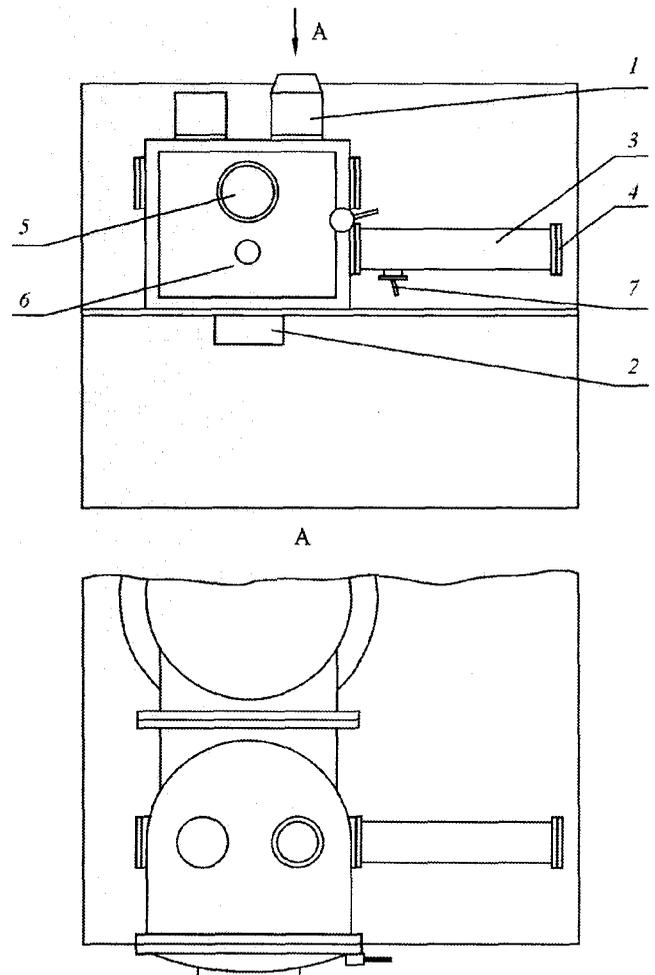


Рис. 6. Схема модифицированной ионно-плазменной установки ВУ-2МБС: 1 – электронная пушка; 2 – вращающийся водоохлаждаемый кокиль; 3 – механизм подачи переплавляемого металла; 4 – загрузочное окно; 5 – смотровая система; 6 – привод экрана против запыления смотровой системы; 7 – привод механизма подачи переплавляемого металла

возвратно-поступательным движением контейнера может осуществлять выдвигание переплавляемого прутка из контейнера. Загрузка прутков осуществляется через загрузочное окно. Для изготовления катодов диаметром 110 мм за время одной загрузки переплавляемого металла в контейнер устанавливается пакет из трех прутков иодидного циркония, связанных между собой вольфрамовой проволокой. Вращение водоохлаждаемого кокиля 3 (см. рис. 4) осуществляется путем включения приводного двигателя с редуктором.

Литые катоды и мишени, изготовленные и восстановленные по разработанной технологии [6]

Применяемые на серийно выпускаемых ионно-плазменных магнетронных установках катоды, мишени имеют различные конфигурации и спо-

собы крепления в ионном испарителе. Наиболее распространенные конструкции катодов и мишеней приведены на рис. 7, а. Разработанная технология позволяет получать литые заготовки (рис. 7, в), из которых путем последующей механической обработки (снятия припусков, нарезания резьбы) изготавливают катод или мишень. В процессе напыления на упрочняемую деталь или инструмент рабочая (верхняя) часть катода или мишени постепенно уменьшается (рис. 7, б). Эксплуатация изношенного катода или мишени, у которых расстояние между распыляемой и водоохлаждаемой плоскостью меньше 5 мм, сопряжена с опасностью ее проплавления и выходом из строя диффузионного паромасляного насоса. Поэтому своевременное восстановление катода или мишени (рис. 7, г) имеет большое практическое значение.

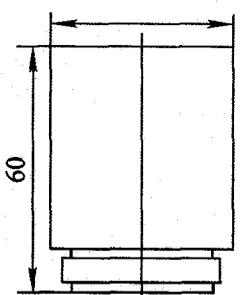
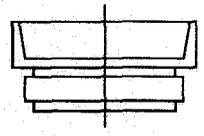
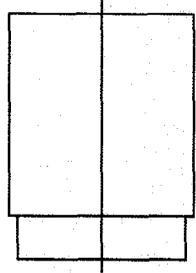
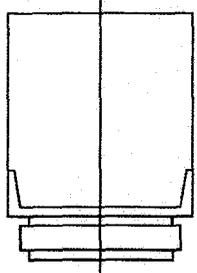
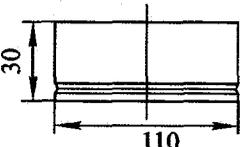
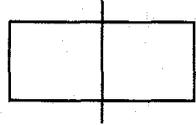
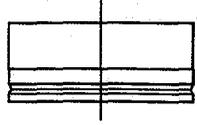
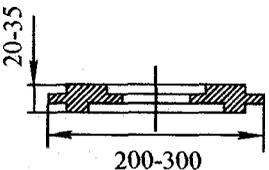
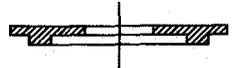
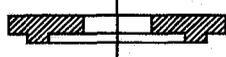
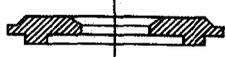
Катоды, мишени применяемые в установках ионно-плазменного, магнетронного напыления. Тип установки	Изношенный катод, мишень	Литая заготовка катода, мишени, получаемая по разработанной технологии	Восстановление изношенного катода, мишени
а	б	в	г
 <p>60</p> <p>БУ-1Б</p>			
 <p>30</p> <p>110</p> <p>БУ-2МБ</p>			
 <p>20-35</p> <p>200-300</p> <p>“Оратория”</p>			

Рис. 7. Конфигурации катодов и мишеней, восстанавливаемые по разработанной технологии

В настоящее время отработавшие свой срок нижние части катода или мишени, изготавливаемые из дефицитного материала, сдаются в металлолом. Процесс восстановления катодов или мишеней позволяет экономить дефицитный материал, создать безотходную технологию. Разработанная технология позволяет изготавливать биметаллические литые катоды или мишени, нижняя часть которых изготавливается из относительно дешевого материала — алюминия, титана, а верхняя — из редких металлов, например, из циркония. В этом случае вначале изготавливается циркониевая отливка, материал которой имеет более высокую температуру плавления, а затем формируется нижняя часть отливки из алюминия или титана. В этом случае количество алюминия, титана не превышает 1% в переходной зоне, толщина которой находится в пределах 3 мм.

На рис. 8 показаны прутки переплавляемого иодида циркония 1, изношенное основание катода 2 и циркониевый катод 3, восстановленный по разработанной технологии. Таким же образом восстанавливают и отработанные мишени.

Выводы

1. Разработанный метод изготовления отливки путем последовательного наращивания металла в форме в сочетании с возможностью концентрации энергии электронного луча позволил ограничить требующуюся для получения циркониевой отливки мощность электронного луча в пределах 2,5–3,0 кВт.

2. Теоретическое рассмотрение основных составляющих энергетического баланса и численных значений, полученных экспериментальным путем, позволило наметить пути повышения экономичности разрабатываемого процесса.

3. Предложенная конструкция кокиля с ребристой внутренней поверхностью позволила повысить коэффициент использования энергии электронного луча.

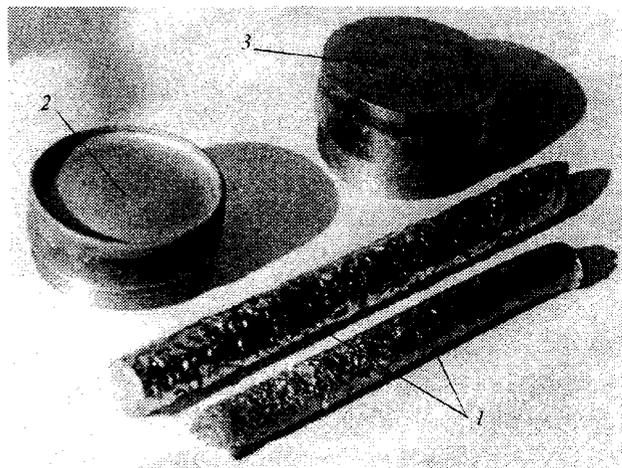


Рис. 8. Внешний вид прутка переплавляемого иодида циркония 1, изношенного основания катода 2 и циркониевого катода 3, восстановленного по разработанной технологии

4. Проведенные теоретическое и экспериментальное исследования процесса нагрева литой циркониевой заготовки, находящейся на водоохлаждаемой подложке, позволили определить величину и характер изменения термического сопротивления зазора, найти основные параметры процесса литья, обеспечивающие получение качественной отливки.

Литература

1. Вейник А.И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959.
2. Ерохин А.А., Резниченко В.Ф., Худышев А.Ф. Об эффективном коэффициенте полезного действия процесса проплавления электронным лучом // Физика и химия обработки материалов. 1970. №3. С. 131–133.
3. Зуев И.В., Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Эффективный к.п.д. электронно-лучевого нагрева // Физика и химия обработки материалов. 1976. №1. С. 22–25.
4. Башенко В.В. Коэффициент полезного действия электронно-лучевой обработки металлов // Электронная обработка материалов. 1965. Т.6, №5. С. 12–18.
5. Анисович Г.А. Затверждение отливок. Мн.: Наука и техника, 1979.
6. Алехнович В.Н., Алифанов А.В., Гордиенко А.И., Поболь И.Л. Электронно-лучевая обработка материалов. Мн.: Белорусская наука, 2006.