

**В.Б.ЮФЕРОВ**, докт.техн.наук; **Б.В.БОРЦ**, канд.техн.наук;  
**И.В.БУРАВИЛОВ**; **Д.В.ВИННИКОВ**; **А.Ф.ВАНЖА**, канд.техн.наук;  
**Е.В.МУФЕЛЬ**; **Г.В.ПИСАРЕВ**; **А.Н.ПОНОМАРЕВ**;  
ННЦ ХФТИ, Харьков

## **ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ В ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ПЕЧАХ**

Розроблено та виготовлено електрогідроімпульсну установку для дослідження можливостей зменшення розмірів кристалічного зерна в злитках тугоплавких металів, що одержуються під час вакуумно-дугової плавки, при впливі на них акустичних імпульсів різної амплітуди і частоти. Згідно можливостей системи живлення, частота імпульсів складає 0,5-10 Гц, тривалість 3-7 мкс, потужність у межах  $0,8-2 \cdot 10^6$  Вт.

Electro-hydro pulsed plant for investigation the opportunity of decreasing the crystal grain size in ingots of refractory metals obtained during vacuum-arc melting that are subjected to the influence of acoustic pulses of different amplitude and frequency is developed. Proceeding from the opportunities of power system the pulse frequency is in the range of 0,5 to 10 Hz, pulse duration: 3-7 mks, power  $0,8-2 \cdot 10^6$  W.

В процессе вакуумно-дуговой плавки металлов в слитках образуются крупнозернистые дендритные структуры с размером зерна около 3-5 мм в радиальном и 10-20 мм в осевом направлении. Эти структурные особенности возникают, как при фазовом переходе, жидкость – твердое тело, так и при  $\alpha$ - $\beta$  переходах в твердом теле. Процесс кристаллизации металла является, во многом определяющим качество готового изделия. Многие особенности строения слитка, формирующиеся при его затвердевании, после всех этапов передела переходят в полуфабрикаты и готовые изделия. Поэтому возможность влияния на структуру слитков является и важной и актуальной.

Цель данной работы – создание установки для исследования возможности уменьшения размеров кристаллического зерна в слитках металлов, получаемых в процессе вакуумно-дуговой плавки, при помощи акустических импульсов.

Описанный ранее [1] внепечной метод электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО), жидких металлов в ковше или разливе предусматривающий передачу в расплав импульсов акустической энергии, в настоящее время используется для гомогенизации металла в ковше, дегазации и рафинирования его от неметаллических включений. Эффект обработки достигается за счет интенсификации гидродинамических, тепломассообменных и физико-химических процессов в расплаве, влияющих на изменения структурозависимых свойств литого металла. В настоящее время получен большой объем

данных относительно техники и технологии ЭГИО расплава многокомпонентных сплавов на основе таких систем, как Fe-C и Al-Si. Вместе с тем, было замечено несовпадение результатов в ходе обработки различных марок сплавов при одинаковых частотно-энергетических режимах, и сплава одного и того же состава при различных режимах. Следовательно, необходимо решать задачу выбора оптимального режима обработки практически для каждого конкретного случая. Иными словами, для повышения эффективности гидроимпульсной обработки кристаллизующегося металла необходимо, чтобы создаваемый ударный импульс имел частотный спектр, соответствующий резонансному разрушению дендритной структуры, резонансу колебаний пузырьков газа, а также резонансу колебаний жидкого металла в области расплава, как сплошной массы. Импульсная акустическая обработка должна разрушить дендритную структуру слитков таким образом, чтобы при каждом импульсе прекращался рост одного зерна и начинался рост другого. При обработке металлов в ковшах, масса обрабатываемого металла составляет несколько тонн, волновод вводится непосредственно в расплав, запасенная энергия импульсного генератора лежит на уровне 0,5-5 кДж, частота – 1-10 Гц. Оценки показывают, что энерговыход в этих случаях лежит на уровне десятых долей Джоуля на  $\text{см}^{-3}$ , то есть на уровне десятка процентов от величины удельной теплоемкости металла. Во всех этих случаях эффект гидроимпульсной обработки (уменьшение величины кристаллического зерна) был замечен.

В нашем случае, то есть в процессе вакуумно-дуговой плавки металлов, ситуация сильно отличается от рассмотренной выше. Обработка ведется при следующих условиях: скорость плавки, то есть скорость роста слитка, составляет около 1-2 мм/сек, зона расплава составляет 2-5 мм у стенки тигля и 10-50 мм в центре. Зона высоких температур уже затвердевшего слитка, где идут процессы рекристаллизации, может составлять еще 20-50 мм. Размер зерна в слитках, близок к этим величинам. Электрод вакуумно-дуговой печи вводится в тигель сверху, поэтому воздействовать на расплав тем же путем, что и в [1] – затруднительно. Масса жидкого металла не превышает 0,5 кг, масса слитка изменяется в процессе плавки от 0 до 30-100 кг, масса тигля – 100-300 кг, масса вакуумной печи – 200-500 кг, то есть имеются большие присоединенные массы. Таким образом, из-за невозможности прямой обработки расплава, на него приходится воздействовать косвенно и учитывать массу всей вакуумно-дуговой установки и большое количество границ раздела. Удельный энерговыход в расплав, в нашем случае, вряд ли должен отличаться от приведенного выше, уровня в несколько десятых Дж/см<sup>3</sup>. Однако наличие большого количества границ раздела, то есть областей отражения акустических импульсов, снизит коэффициент эффективности энерговыхода в расплав, что потребует увеличения мощности или величины запасенной энергии в накопителях. В то же время, учитывая то, что затвердевание про-

исходит в условиях близких границ, возможно первостепенное значение может иметь частота посылки импульсов, отсюда исходит и стремление в данной работе повысить частоту [3]. Фактором, ограничивающим мощность импульсов, является необходимость учитывать прочность и вибростойкость вакуумной установки. Во время экспериментов было замечено, что от вибрации через определенное количество импульсов происходит раскручивание болтовых соединений, что может привести к ухудшению вакуумных условий, что особо нежелательно при работе с химически активными металлами. Таким образом, оценить величину энергозатрат при вакуумно-дуговой плавке и сопоставить ее с энергозатратами в ковшах, можно лишь ориентировочно. Следующим существенным отличием наших систем, только усиливающим сказанное выше, является то, что вакуумно-дуговые печи являются низковольтным оборудованием, а электрогидроимпульсная установка высоковольтным. Поэтому возникает необходимость их диэлектрической развязки, что опять-таки увеличивает количество границ раздела по тракту акустического импульса и существенно снижает КПД.

Особое место при создании систем вакуумно-дуговой плавки с электрогидравлическим воздействием, вакуумно-дуговая плавка с акустическим воздействием, занимают вопросы электромагнитной безопасности персонала. Эти вопросы менее остро стоят при внепечной обработке металлов, поскольку в этих условиях персонал может находиться на расстояниях около 10 м, что задается термо-тепловой обстановкой. В нашем же случае персонал работает в непосредственной близости, около 1 м, и нормы импульсного магнитного воздействия должны быть учтены, то есть 200 мкТл при частотах 0-100 кГц.

Электрогидроимпульсная установка состоит из трех блоков. Первый блок – это генератор импульсных токов (ГИТ), состоящий из двух конденсаторов, соединенных последовательно или параллельно (общая емкость составила от 0,2 до 0,8 мкФ), однополупериодная схема выпрямления (зарядный трансформатор ВТМ-15/50), газовый разрядник со сменной атмосферой, скорость продувки 3-6 л/мин, киловольтметр. Исходя из возможностей системы питания, частота посылок импульсов составляет 0,5-10 Гц, запасенная энергия 90-360 Дж.

Второй блок – система генерации и передачи акустических колебаний, состоящей из камеры ЭРГУК (электроразрядного генератора упругих колебаний) и волновода, соединяющего ЭРГУК и вакуумно-дуговую печь, параметры которой приведены выше. Обработка осуществляется повторяющимися импульсами давления, создаваемыми при высоковольтном пробое жидкости в электроразрядном генераторе упругих колебаний. Камера ЭРГУК, диаметром 175 мм и высотой 170 мм, выполнена из нержавеющей стали, толщина мембраны 5 мм, электрод 8 из нержавеющей стали диаметром 10 мм [2]. Межелектродный зазор выбирался экспериментальным путем и составил

1 мм. Скорость потока воды в камере около 10 л/мин. Передача акустического сигнала происходит через стальной волновод 2, и диэлектрическую развязку.

Третий блок-это измерительное оборудование. Система регистрации соединена с сетью через разделительный трансформатор. Блок включает персональный компьютер с виртуальным осциллографом «Veleman», пьезокерамические датчики, пояс Роговского. Вся система размещена в заземленных экранах.

Исходя из требований, приведенных выше, рассмотрено несколько вариантов систем передачи акустических колебаний (см. рис 1, 2).

1. Геометрия № 1:

- камера является частью сильноточной разрядной цепи;
- высоковольтные электроды не контактируют с камерой.

2. Геометрия № 2:

- гидравлический волновод;
- металлический волновод.

Для обеспечения совместной работы низковольтного оборудования вакуумно-дуговой установки с ЭРГУК, были сделаны диэлектрические развязки. На рис. 1, а и 1, б приведены варианты исполнения разрядной камеры ЭРГУК.: Рис. 1, а – камера является частью сильноточной разрядной цепи, рис. 1, б – высоковольтные электроды не контактируют с камерой, и существует только емкостная связь между разрядной цепью и камерой. В первом случае, из-за малого межэлектродного промежутка потенциал на камере может составлять значительную часть от приложенного напряжения, поэтому, длина диэлектрической развязки рассчитывалась на полное зарядное напряжение 30 кВ и составила 100 мм. Во втором случае, наведенный на камеру потенциал, должен быть меньше. Однако, в этом случае амплитуда колебаний мембраны ожидается меньшей, так как разрядный промежуток находится на порядок дальше, чем в первом случае, кроме того возможно влияние газовой фазы, находящейся возле мембраны. Таким образом, во втором случае можно уменьшить риск пробоя высоковольтной установки на низковольтную, при одновременном уменьшении выходной акустической мощности.

При выборе конструктивных параметров диэлектрической развязки необходимо, кроме ее электрических свойств (на пробой), учитывать и ее акустические свойства (коэффициент пропускания). Известно, что коэффициент пропускания моночастотного излучения,  $D = 1 - R = 4m/(m + 1)^2$ , где  $m = \rho_1 c_1 / \rho_2 c_2 = (1 + (\rho_1^2 / \rho_2^2)^{1/2}) \sin^2 \alpha$  – отношение акустических сопротивлений. Здесь не учитывается поглощение звука в средах. С другой стороны, если диэлектрическая развязка является пластиной толщиной  $d = n(\lambda_2/2)$ ;  $n = 1, 2, 3, \dots$ , коэффициент пропускания,  $D$ , в этих условиях стремится к 1, однако, если акустические сопротивления материалов волновода существенно различаются, резонансы оказываются достаточно узкими, поэтому длина ди-

электрической развязки должна быть выбрана, как говорится «по месту», то есть в процессе экспериментов. Это особенно необходимо, поскольку есть сомнения в моночастотности нашего генератора – ЭРГУК.

В системе передачи акустических колебаний в качестве диэлектриков, использовались оргстекло, текстолит. Форма диэлектриков – цилиндрическая. Контакт осуществлялся прижимом. Как известно [4], на границах диэлектрик-сталь-диэлектрик коэффициент прохождения звуковых волн составляет 13 %, а границы сталь-медь 99,7 %, поэтому мощность акустического сигнала почти на два порядка ниже, чем без нее.

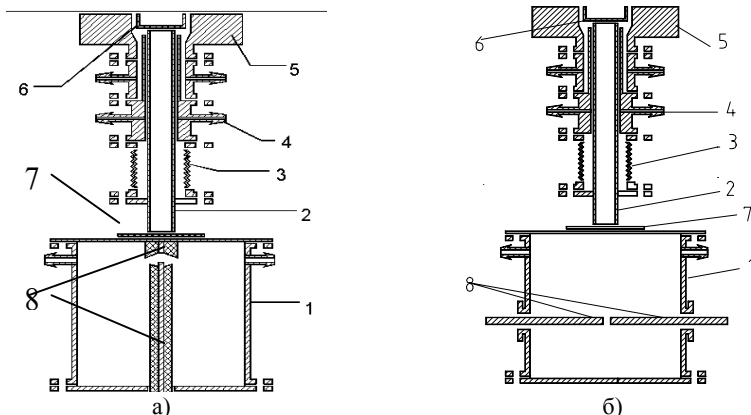


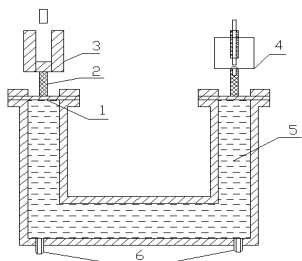
Рисунок 1 – Схематический вид установки – вакуумно-дуговая печь с ЭРГУК и передающим устройством – волноводом (Геометрия № 1):

а) камера- элемент сильноточной цепи разрядного промежутка; б) высоковольтные электроды не контактируют с камерой. 1 – камера ЭРГУК; 2 – волновод; 3 – сифон; 4 – подвод охлаждения; 5 – корпус вакуумной печи; 6 – тигель; 7 – диэлектрик, 8 – электроды

Преимуществом Геометрии № 1, является малое количество границ раздела. Эксперименты на геометрии № 2, рис. 2, а, б, позволили размещать камеру с волноводом направленным вниз. Недостатком этой геометрии, является большое количество границ раздела, что значительно снижает мощность акустического импульса передаваемого на тигель.

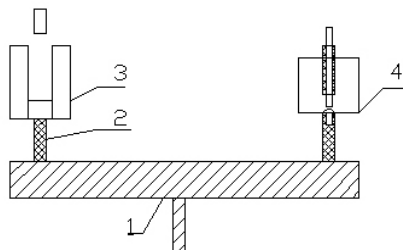
Опыты, проведенные с присоединенным металлическим волноводом показали, что акустический сигнал имеет большую интенсивность, чем в случае с гидроволноводом. Результаты экспериментов по определению частоты посылок импульсов приведены на рис. 3, а-г.

Эксперименты были проведены с запасенной энергией 60 Дж, емкостью 0,2 мкФ. Изменение частоты осуществлялось за счет изменение зарядного напряжения и зазора в газовом разряднике, осуществлялся проток газа и воды в разряднике и камере ЭРГУК.



а)

1 – мембраны, 2 – диэлектрические развязки, 3 – тигель вакуумно-дуговой печи, 4 – ЭРГУК, 5 – вода, 6 – клапана для выхода воздуха

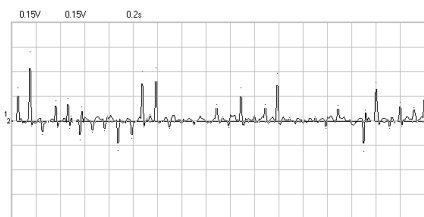


б)

1 – металлический волновод, 2 – диэлектрические развязки, 3 – тигель вакуумно-дуговой печи, 4 – ЭРГУК, 5 – вода, 6 – клапана для выхода воздуха

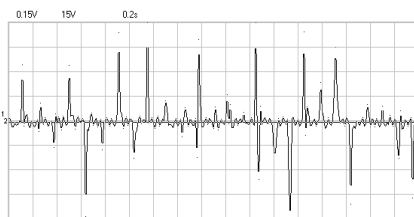
Рисунок 2 – Схематический вид установки – вакуумно-дуговая печь с ЭРГУК и передающим устройством – волноводом (Геометрия № 2):

а) – гидроволновод; б) – металлический волновод



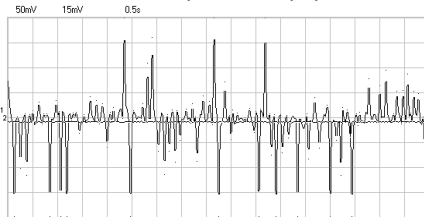
а)

U-24/13; газ – 3,8 л/мин;  
вода – 12 л/мин;  $f = 10$  Гц; 0,2 сек/дел



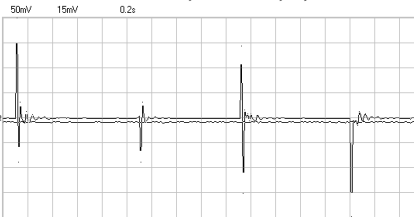
б)

U-24/16; газ – 8,8 л/мин;  
вода – 12 л/мин;  $f = 8$  Гц; 0,2 сек/дел



в)

U-8/7; газ – 8,3 л/мин;  
вода – 11,5 л/мин;  $f = 8$  Гц; 0,5 сек/дел



г)

U-15/10; газ – 4л/мин;  
вода – 4 л/мин;  $f = 2$  Гц; 0,2 сек/дел

Рисунок 3 – Частота посылок импульсов при различных факторах влияющих на работу ЭРГУК, амплитуда колебаний сигнала представлена в относительных единицах

Как видно из рисунков имеется три типа импульсов различающихся величиной амплитуды, причем, в некоторых случаях около 50 % импульсов

имеют одинаковую амплитуду, что определялось скоростями протока газа и воды. Следует заметить, что громкость акустических импульсов не всегда соответствовала амплитуде с пьезодатчика. Полярность импульсов определяется фазой колебания мембраны.

Было установлено, что проток газа и жидкости имеют некоторые значения, которые для каждой системы определялся эмпирически. В ходе эксперимента сила крепления пьезодатчика изменялась, из-за вибрации, что приводило к изменению величины амплитуды сигнала. На рис. 4, а, б представлены виды акустических сигналов в микро и миллисекундной временной развертке, где миллисекундный сигнал, скорее всего, связан с собственными частотами ЭРГУК. Для выяснения природы микросекундного сигнала необходимы дополнительные бесконтактные (оптические) измерения.

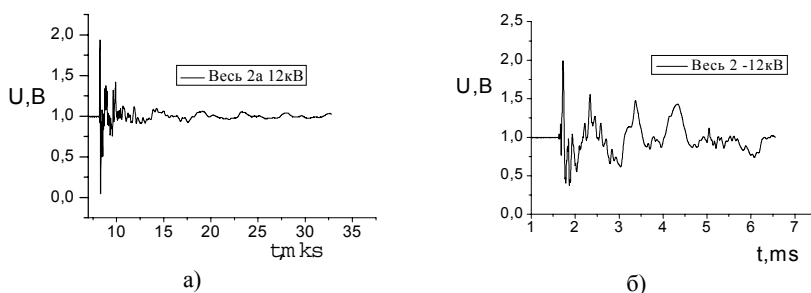


Рисунок 4 – Графики акустических сигналов

### Выводы:

1. Сформулированы требования к установке вакуумно-дугового переплава металлов с импульсным акустическим воздействием.
2. Для установки вакуумно-дугового переплава металлов создана система акустического воздействия для исследования возможностей уменьшения размеров кристаллического зерна в слитках.
3. Создан ЭРГУК работающий в диапазоне частот до 10 Гц и запасенными энергиями от 40 до 360 Дж и четыре системы передающих устройств.
4. Проведены эксперименты с передающими системами, обладающими преимуществами либо с точки зрения энергетики, либо с точки зрения безопасности.
5. Для повышения стабильности работы установки необходимо исследование причин появления импульсов, обладающих различной амплитудой.
6. Представляется существенно важной оптимизация диэлектрических развязок на передающих устройствах.

**Список литературы:** 1. Электрогидроимпульсная обработка кристаллизующихся металлов и сплавов: Сб. науч. тр. / АН УССР. ПКБ электрогидравлики; Редкол.: Гулый Г.А. (отв. ред.) и др. – Киев: Наукова думка, 1990. – 100 с. 2. В.А.Поздеев, П.И.Царенко, Б.И.Бутиков, П.П.Малюшевский Электроразрядные генераторы упругих колебаний. – Киев: Наукова думка, 1985. – 176 с. 3. А.А.Чернов Физика кристаллизации // Вестник АН СССР. – 1984. – 9. – С. 3-11. 4. Л.Бергман Ультразвук и его применение в науке и технике. – Москва, Издательство иностранной литературы, 1957. – 726 с.

*Поступила в редколлегию 11.06.2007.*