

А.В. Мельник

**ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ  
ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА В КОВШЕ**

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, [iipt@iipt.com.ua](mailto:iipt@iipt.com.ua)*

**Введение**

Электроразрядные генераторы упругих колебаний (ЭРГУК) [1] как эффективный инструмент в различных технологических процессах применяются для ряда технологий, основанных на электрических разрядах в жидкости, в числе которых приоритетное место занимает электрогидроимпульсная обработка (ЭГИО) расплава в ковше, отличающаяся высокой эффективностью и экономичностью [2]. При таком способе обработки воздействие на жидкий или кристаллизующийся металл осуществляется посредством акустических волн через передающий упругий или упругоподвижный элемент (мембрану с волноводом) – источник гидродинамического поля давлений в обрабатываемой среде. В общем случае ЭРГУК (см. рисунок) представляет собой разрядную камеру в виде толстостенного цилиндра с верхним жестким и нижним упругим основаниями, заполненную рабочей жидкостью. Между электродом, расположенным на оси камеры, и упругим основанием происходит электрический разряд. При этом в рабочей жидкости камеры возникает волна давления, деформирующая нижнее основание. В свою очередь нижнее основание передает энергию волноводу, погруженному в ковш с расплавом. Таким образом, возмущения от волновода генерируют в жидком металле нестационарное поле давлений, которое формирует в расплаве физические процессы, оказывающие положительное воздействие на качество структуры отливок.

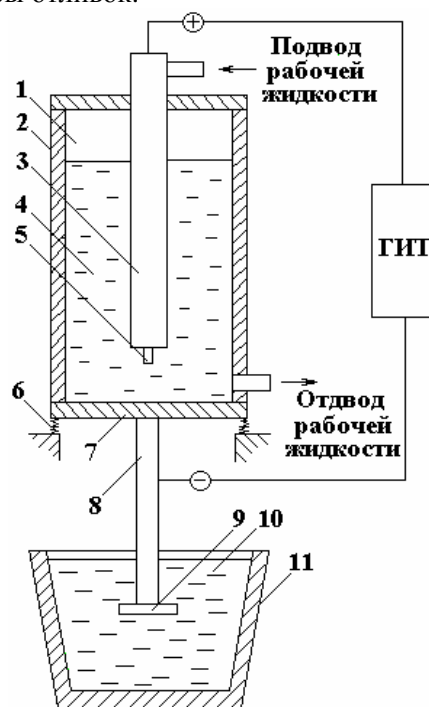


Схема ЭГИО расплава:

- 1 – воздушная полость; 2 – разрядная камера; 3 – электрод;  
4 – рабочая жидкость; 5 – токовод; 6 – упругий элемент; 7 – мембрана;  
8 – волновод; 9 – волноводная насадка; 10 – расплав; 11 – ковш

Теоретическим и экспериментальным исследованиям ЭРГУК как инструмента ЭГИО расплава посвящен ряд работ [1, 3–8]. В то же время в этих публикациях не в достаточной мере отражены сведения о перспективах дальнейшего совершенствования как отдельных элементов генератора колебаний, так и модернизации технологического блока для ЭГИО в целом.

Функциональные возможности ЭГИО определяются формированием в расплаве потенциально реализуемых инструментом обработки физических процессов – внутренних структурно-кинетических изменений (ВСКИ), совокупность которых приводит к изменению его структуры и свойств [9]. Определяющую роль в формировании ВСКИ играют параметры нагружения, поэтому дальнейшее совершенствование и разработка новых установок ЭГИО расплава связаны с исследованием степени влияния на эти параметры конструктивных элементов ЭРГУК и всего технологического узла.

Как показывает практический опыт эксплуатации ЭРГУК [1], основными факторами, влияющими на параметры нагружения расплава, являются: характеристики разрядного контура; геометрические размеры, конфигурации разрядной камеры и мембраны; конструктивные особенности погружаемых в расплав волноводов; свойства рабочей жидкости, заполняющей разрядную камеру; система и режим прокачки жидкости в разрядной камере; объем воздуха в верхней части разрядной камеры; способы монтажного крепления корпуса ЭРГУК.

Таким образом, дальнейшее совершенствование ЭРГУК, способствующее повышению эффективности функциональных возможностей ЭГИО, возможно за счет рационального подбора соответствующих характеристик перечисленных выше факторов и доработки как каждого элемента в отдельности, так и в комплексе, составляющих единый технологический модуль.

Цель работы – провести функциональный анализ физико-технических факторов, оказывающих влияние на параметры нагружения расплава в ковше при ЭГИО, на основании которого дать научно-технические рекомендации по дальнейшему совершенствованию ЭРГУК.

#### **Разрядный контур**

На параметры нагружения обрабатываемого расплава оказывают влияние: напряжение на обкладках конденсаторов  $U_0$ , емкость конденсаторной батареи  $C$ , индуктивность контура  $L$ , длина межэлектродного (разрядного) промежутка  $l_p$ . Они определяют электрические и электродинамические характеристики разрядного контура, а также гидродинамические и акустические характеристики жидкости в разрядной камере [10]. Максимальное значение КПД преобразования электрической энергии достигается при оптимальной величине  $l_p$ , когда активное сопротивление разрядного промежутка соизмеримо с волновым сопротивлением контура. Величины  $C$  и  $U_0$  входят в интегральный параметр контура – запасаемую энергию  $W_0$  ( $W_0 = CU_0^2/2$ ), увеличение которой приводит к росту амплитуды колебаний торца волновода [1]. Теоретические исследования [3] показали, что с ростом  $W_0$  наряду с амплитудой колебаний торца волновода возрастает и продолжительность кавитационных процессов в расплаве. В работе [11] получены зависимости давления на торце волновода от совокупности приведенных характеристик разрядного контура при трех режимах энерговыделения: апериодическом ( $\eta=1$ ), согласованном ( $\eta=0,8$ ), который соответствует максимальному значению электрического КПД, и колебательном ( $\eta=0,37$ ). Здесь  $\eta$  – критерий подобия характеризует долю энергии, выделившуюся в разрядном канале за первый полупериод тока. Значения этого критерия могут изменяться от нуля до единицы [10]. Как показано в [11], наибольшие значения давления наблюдаются при  $\eta=0,37$ , то есть согласованный режим разряда не является оптимальным с точки зрения получения эффективных нагружающих факторов в расплаве. Кроме того, структура и ряд свойств металла существенно улучшаются при переходе от согласованного к колебательному режиму разряда [12].

Таким образом, проектное решение ЭРГУК должно предусматривать в разрядном контуре наличие автоматической системы управления [13], обеспечивающей точное выполнение заданных технологических режимов и мониторинг процесса ЭГИО расплава.

#### **Волноводно-излучательная система**

Исследованиям динамических характеристик волноводно-излучательной системы ЭРГУК на различных стадиях разряда посвящен ряд публикаций [1, 3–6, 8]. В то же время в данных работах не учитывалась возможность перемещения разрядной камеры на упругих подвесках, что соответствует области низких частот спектра генерируемых в расплаве волновых возмущений и наличие плоских насадок на волноводе. Как показывает опыт эксплуатации технологических установок, при монтаже корпуса ЭРГУК на упругих элементах, в качестве которых используются пакеты тарельчатых пружин, степень влияния низкочастотной составляющей колебаний на расплав существенно возрастает. Низкочастотное воздействие способствует перемешиванию расплава и гомогенизации всего объема жидкого металла [14].

В работе [8] на базе численного моделирования колебательного движения волноводно-излучательной системы ЭРГУК на упругих элементах при ЭГИО расплава в ковше установлено, что наличие круговых насадок на торце волновода приводит к более интенсивному затуханию колебаний, т.е. существенной диссипации (рассеянию) затраченной энергии в зависимости от свойств обрабатываемого металла, а диссипированная в материале энергия может играть определяющую роль в формировании структуры нового качества [15]. Применение цилиндрических волноводов с пластинчатой насадкой способствует более активному перемешиванию расплава, обеспечивает значительное снижение температурного перепада по высоте ковша и газосодержания в обработанном металле [2]. Кроме того, такое конструктивное исполнение волновода интенсифицирует в расплаве процессы кавитации, которые являются ключевыми для структурных изменений в металле.

В технических приложениях один из основных технологических параметров ЭГИО – частота посылки импульсов, находящаяся в диапазоне от 0,5 до 20 Гц. Как показано в [8], длительность процессов нагружения лежит в миллисекундном диапазоне, поэтому, регулируя жесткость упругих элементов и размеры волноводных насадок, можно обеспечить условия нагружения с паузой или без нее. В первом случае возникает активная дегазация жидкого металла, так как в паузах между нагружениями пузырьки газа покинут зону обработки [16], во втором – обеспечиваются интенсивное перемешивание расплава и изменение его структуры.

В работе [6] на основе численного моделирования выполнена оценка амплитуды затухающих колебаний торца волновода на послеразрядной стадии. С изменением  $W_0$  максимальное значение амплитуды колебаний торца волновода изменяется приблизительно прямо пропорционально энергии разряда. Изменение же толщины мембраны  $\delta_m$ , например в 2 раза, приводит к изменению амплитуды колебаний уже примерно от 7 до 9 раз, то есть почти на порядок. Таким образом,  $\delta_m$  оказывает более существенное влияние на амплитуду колебаний торца волновода по сравнению с  $W_0$ . Следует отметить, что верхний предел  $\delta_m$  ограничен значением, при котором не происходит заметных изменений амплитуды даже при варьировании характеристик других элементов установки, а нижний – величиной, при которой амплитуда не выходит за область упругих деформаций. Таким образом, монтаж разрядной камеры ЭРГУК на упругих элементах и применение насадок в волноводно-излучательной системе дают возможность повысить эффективность параметров нагружения на различных стадиях обработки.

#### **Разрядная камера**

Управление волновой составляющей передаваемой нагрузки на разрядной стадии целесообразно осуществлять за счет параметров разрядного контура и диаметра волновода, а колебательной составляющей на послеразрядной стадии – варьированием геометрических характеристик камеры ЭРГУК [6, 11]. Кроме того, в качестве факторов, оказывающих основное влияние на параметры нагружения, можно выделить физико-химические свойства рабочей жидкости, систему ее прокачки и наличие воздушной полости над жидкостью.

Численный эксперимент показал [6], что при увеличении диаметра камеры амплитуда существенно повышается, длительность основного перемещения не изменяется, а частота затухающих колебаний значительно падает.

Рабочими жидкостями разрядных камер ЭРГУК служит вода или слабые электролиты [1]. Характеристики свободного разряда существенно зависят от удельного сопротивления рабочей среды. В [1] проведены экспериментальные исследования влияния различных рабочих жидкостей на динамические характеристики передающего элемента ЭРГУК. Показано, что применение кремнийорганической (полиметилсилоксановой) жидкости ПМС-40 в качестве рабочей среды позволяет снизить ускорение передающего элемента ЭРГУК по сравнению с технической водой в 1,25–2,25 раза, а с дистиллированной – в 2,3–3,5 раза. При этом энергетические характеристики спектра колебаний при использовании ПМС-40 выше, чем для дистиллированной воды, но несколько ниже, чем для технической. Таким образом, на параметры нагружения (в зависимости от применяемой технологии) влияют свойства рабочей жидкости.

В работе [4] проведены теоретические и экспериментальные исследования степени влияния объемного содержания воздуха вверху разрядной камеры и прокачки воды через камеру на амплитуду колебаний волновода. Установлено, что наличие воздушной полости и прокачки жидкости увеличивает амплитуду, так как правильно организованная прокачка стабилизирует разряд и минимизирует потери на пробой, а воздушная полость является резонатором процессов динамики парогазовой полости в закрытом объеме. На базе численного моделирования процессов, происходящих в разрядной камере, выявлено, что наличие воздушной полости объемом, составляющим 0,5% от объема разрядной камеры, приводит к значительному росту максимального размаха колебаний волновода. Та-

ким образом, объемным содержанием воздуха можно регулировать (в необходимых пределах) величину и характер передаваемой нагрузки на объект обработки на стадии передела металла в зависимости от заданных служебных свойств отливок.

Используемые в ЭРГУК для ЭГИО расплава рабочие жидкости должны прокачиваться, чтобы обеспечить охлаждение рабочей камеры. Эта мера вызвана высокими температурами жидкого металла, контактирующего с волноводом. В ИИПТ НАН Украины проводились экспериментальные исследования характеристик разрядного контура как при прокачке межэлектродного промежутка, так и без нее [17]. Определены предпробивные потери энергии для различных значений напряжения, диаметра стержня электрода и длины разрядного промежутка. Применялись три схемы прокачки: полый электрод; полый токовод; полый изолятор. Результаты исследований показали, что наиболее удачной и рекомендованной к промышленной эксплуатации является конструкция электрода с прокачкой через полый изолятор. При такой схеме предпробивные потери снижаются в среднем в 1,3÷2,5 раза по сравнению со схемой без прокачки, в результате чего появляется возможность увеличить диаметр стержня электрода и в 2–3 раза увеличить ресурс его работы.

### **Технологический блок**

Функциональный анализ влияния элементов ЭРГУК в комплексе на параметры нагружения представляет собой довольно сложную задачу, так как формирование ВСКИ в расплаве определяется множеством факторов [18]. Кроме того, необходимо учитывать взаимное влияние функциональных возможностей отдельных элементов технологического блока друг на друга. Следует выделить единый общий интегральный параметр нагружения расплава технологическим блоком, который определяется технологическими функциями каждого из элементов установки.

Описание механизмов и процессов нагружения расплава технологическим блоком с учетом взаимного влияния его элементов друг на друга требует постановки и решения дополнительных задач.

При этом теоретические исследования обусловлены трудностями математического описания многопараметрической системы “технологический блок→расплав”. Эксперименты в этом направлении связаны с проведением сложных многофакторных измерений.

### **Выводы**

Повысить эффективность ЭГИО расплава можно за счет совершенствования элементной базы ЭРГУК, что предусматривает следующие мероприятия:

- введение в разрядный контур автоматизированной системы управления, позволяющей подбирать необходимые режимы разряда в зависимости от требуемых параметров обработки;
- расширение функциональных возможностей амплитудно-частотных характеристик параметров нагружения путем ввода в волноводно-излучательную систему дополнительных упругих и демпфирующих элементов;
- применение новых рабочих жидкостей, обеспечивающих высокоэффективную и стабильную работу ЭРГУК с заданными параметрами нагружения;
- применение регулируемой системы прокачки рабочей жидкости через межэлектродный промежуток;
- наличие воздушной полости в верхней части разрядной камеры, объем которой определяет в заданных пределах величину и характер параметров нагружения.

Дальнейшее совершенствование технологических установок для ЭГИО расплава следует проводить в направлении комплексной модернизации всего блока с учетом взаимного влияния его элементов друг на друга.

Выбор единого критерия, связывающего параметры электрогидроимпульсного нагружения с параметрами как всего технологического модуля, так и его отдельных элементов, позволит оптимизировать проектные решения на стадии опытно-конструкторских разработок. В качестве такого критерия можно принять соотношение плотности введенной в расплав энергии и характеристик рассмотренных элементов ЭРГУК.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Поздеев В.А., Царенко П.И., Бутаков Б.И., Малюшевский П.П. Электроразрядные генераторы упругих колебаний. Киев: Наукова думка, 1985. 176 с.
2. Гулый Г.А. Научные основы разрядноимпульсных технологий. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
3. Галиев Ш.У., Барбашова Г.А., Билянский Ю.С., Жирнов М.В., Косенков В.М. Взаимодействие электроразрядного генератора колебаний с жидким металлом в ковше // Проблемы прочности. 1991. № 11. С.78–82.

4. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Исследование амплитуды перемещения передающего элемента электро-разрядного генератора упругих колебаний // Электронная обработка материалов. 2003. № 6 (224). С.63–69.
5. Цуркин В.Н., Мельник А.В., Грабовый В.М. Анализ спектральных характеристик электро-разрядного генератора упругих колебаний // Збірник наукових праць НУК. Миколаїв, 2005. № 2 (401). С.106–112.
6. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Влияние геометрических характеристик электро-разрядного генератора упругих колебаний на перемещение рабочего элемента на послеразрядной стадии // Электронная обработка материалов. 2006. № 1. С. 63–69.
7. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Системный анализ факторов, стабилизирующих параметры нагружения электрогидроимпульсной обработки расплава // Электронная обработка материалов. 2007. № 2. С. 52–59.
8. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Процессы и характер нагружения расплава электро-разрядным генератором колебаний на упругих элементах. Часть I (Динамика волновода) // Электронная обработка материалов. 2008. № 4. С. 82–92.
9. Цуркин В.Н., Грабовый В.М., Синчук А.В. Функциональные возможности электрогидроимпульсной обработки расплава в ковше // Электронная обработка материалов. 2006. № 5. С. 55–61.
10. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
11. Цуркин В.Н., Синчук А.В., Иванов А.В. Расчетная методика для определения влияния параметров разряда на характеристики акустического поля в расплаве при электрогидроимпульсной обработке // Электронная обработка материалов. 2004. №1. С. 82–87.
12. Цуркин В.Н., Синчук А.В., Иванов А.В. Влияние режима электрического разряда на качество металла, подвергнутого ЭГИО в жидком состоянии // Электронная обработка материалов. 2005. № 1. С. 98–103.
13. Вовк И.Т., Друмирецкий В.Б., Кривицкий Е.В., Овчинникова Л.Е. Управление электрогидроимпульсными процессами. Киев: Наукова думка, 1984. 188 с.
14. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. М.: Новые технологии, 2004. 784 с.
15. Семенов Б.И., Иванова В.С. Концепция и средства управления формирования кристаллического строения отливок в новых методах литья // Литейное производство. 2001. № 5. С. 20–25.
16. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Оценка рационального времени выдержки расплава перед разливкой // Зб. наук. праць НУК. 2006. №6 (411). С. 75–81.
17. Экспериментальный поиск путей иницирования разряда принудительной прокачкой рабочей жидкости через межэлектродный промежуток: Отчет о НИР /заключит./ / ИИПТ, НАН Украины; Руководитель В.А.Стрельцов. №ГР 0193U024940; Инв.№ 0395U002540. Николаев, 1994. 49 с.
18. Найдек В.Л. Процессы внеагрегатной обработки металлических расплавов массового назначения // Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. Киев: Наукова думка, 1998. С. 133–154.

*Поступила 15.10.09*

### **Summary**

On the basis of the carried functional analysis of the physical-technical factors influencing on parameters loading melt in a ladle during the electro hydro pulse treatment, recommendations about further improving of electro discharge generators of elastic vibrations are fulfilled.

---