

В.Н. Цуркин, А.В. Мельник

ПРОЦЕССЫ И ХАРАКТЕР НАГРУЖЕНИЯ РАСПЛАВА ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ КОЛЕБАНИЙ НА УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТАХ. ЧАСТЬ I (ДИНАМИКА ВОЛНОВОДА)

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, iipt@iipt.com.ua*

Введение

Разработка новых и совершенствование существующих способов обработки жидких и кристаллизирующихся металлов внешними физическими полями, которые способствуют повышению качества отливок, имеют актуальное значение для литейного производства. Среди их многообразия электрогидроимпульсная обработка (ЭГИО) расплава в ковше отличается высокой эффективностью и экономичностью. Более подробное описание этого метода, его функциональных возможностей и механизмов воздействия на расплав приведено в статьях [1–4]. Источником возмущений в расплаве при таком способе обработки является электроразрядный генератор упругих колебаний (ЭРГУК), который посредством мембраны с волноводом создает в жидком металле поле упругих волн. Отметим, что выбор типа ЭРГУК, конструктивных размеров и конфигурации составляющих его элементов – сложная, полностью не решенная задача. Известные проектные решения основываются в большинстве на экспериментальных исследованиях и статистических данных практического применения опытно-конструкторских разработок в производстве.

Служебные свойства готовой металлопродукции определяются как величиной, так и характером передаваемой нагрузки; следовательно, вопросы динамики волноводной системы при ЭГИО расплава в ковше представляют научный и практический интерес.

В технологических установках ЭГИО расплава при монтаже разрядной камеры обычно применяют жесткое заземление, но, как показывают эксперименты и опыт эксплуатации оборудования, степень влияния низкочастотных колебаний на обрабатываемый объект существенно возрастает при закреплении корпуса ЭРГУК на упругих элементах, в качестве которых используются пакеты тарельчатых пружин (ГОСТ 3057-90). Низкочастотное воздействие создает благоприятные условия для перемешивания расплава, что способствует гомогенизации объема жидкой ванны.

Известно, что на эффективность ЭГИО расплава в ковше оказывают существенное влияние конструктивные особенности погружаемых в расплав волноводов, их форма, наличие различных насадок, глубина их погружения в жидкий металл и т.п. [5]. Эксперименты по физическому моделированию электровзрывного воздействия на расплав в ковше [5] показали, что применение цилиндрических волноводов с пластинчатой насадкой приводит к повышению скорости гидротоков до 40%. Это способствует более активному перемешиванию расплава, обеспечивает значительное снижение температурного перепада по высоте ковша и газосодержания в обработанном металле. Кроме того, такое конструктивное решение интенсифицирует в расплаве процессы кавитации, которые являются ключевыми для структурных изменений в металле.

Исследованиям динамических характеристик волноводно-излучательной системы ЭРГУК на различных стадиях разряда посвящен ряд публикаций [1, 2, 6]. Выполнялся также их спектральный анализ [7, 8]. В то же время приведенные в данных работах расчетные схемы не учитывали возможности упругого перемещения корпуса разрядной камеры и наличия насадок на излучателе. Таким образом, ввод в колебательную систему ЭРГУК-жидкий металл дополнительных упругих и демпфирующих элементов позволит расширить модельные представления о процессе ЭГИО расплава в ковше и описать его качественно новыми закономерностями.

В общем случае спектр генерируемых в расплаве волновых возмущений содержит три диапазона частот, которые соответствуют трем стадиям обработки:

I стадия. В области высоких частот нагрузка от расширяющегося канала разряда и прилегающей к нему зоны передается в расплав посредством волновода (активная стадия разряда);

II стадия. Область средних частот, для которой характерно нагружение расплава вследствие фокусировки волн давления стенками разрядной камеры в зависимости от ее формы и пульсации парогазовой полости (ППГ) (пассивная стадия разряда);

III стадия. В области низких частот источником возмущений является непосредственно сам ЭРГУК, который с определенными допущениями можно рассматривать как колебательную систему с сосредоточенными параметрами.

Цель настоящей работы – комплексное исследование динамики волноводно-излучательной системы ЭРГУК на упругих элементах и гидродинамических процессов, происходящих в жидком металле под воздействием ЭГИО расплава в ковше. На первом этапе рассмотрены динамические характеристики волноводов с насадками с учетом демпфирующих свойств расплава. В дальнейшем будут решаться задачи, связанные с определением нестационарного поля давлений, возникающего в обрабатываемом металле на различных стадиях обработки.

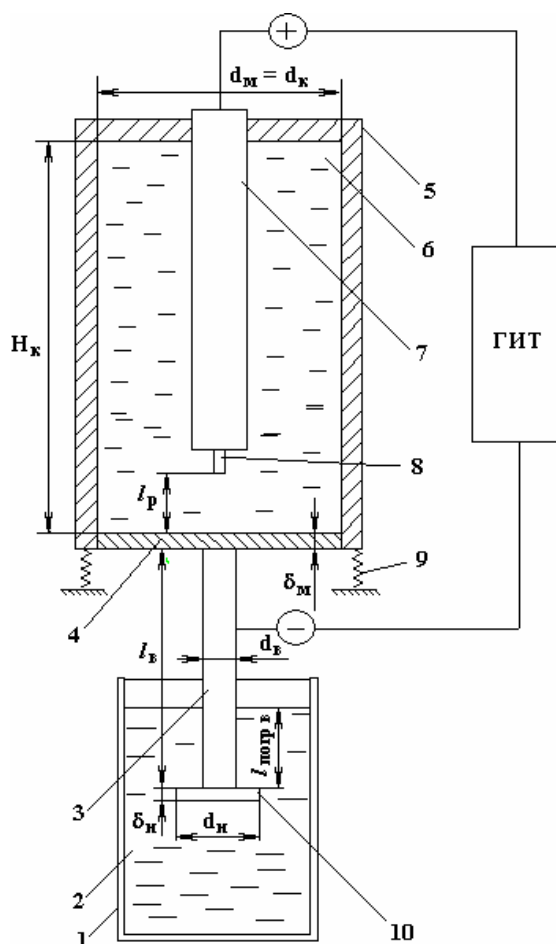


Рис. 1. Общая схема ЭГИО расплава в ковше ЭРГУК на упругих элементах: 1 – ковш; 2 – расплав; 3 – волновод; 4 – мембрана; 5 – разрядная камера; 6 – рабочая жидкость; 7 – электрод; 8 – токовод; 9 – упругий элемент; 10 – круговая насадка

Теоретическое исследование

Для моделирования колебательного движения волноводно-излучательной системы ЭРГУК на упругих элементах при ЭГИО расплава в ковше, общая схема которой представлена на рис. 1, примем следующие физические допущения:

- вода в разрядной камере считается идеальной и сжимаемой жидкостью;
- деформация мембраны описывается законом Гука для изотропных сред;
- в местах крепления мембраны к корпусу камеры принято условие жесткого защемления;
- нагрузка осесимметрично распределена по поверхности мембраны;
- в энергию ППП переходит 30% энергии, выделившейся в разрядный канал [5];

– теплопередача от расплава к волноводно-излучательной системе отсутствует.

Начальные условия:

– движение центров масс волноводно-излучательной системы и разрядной камеры начинается из положения статического равновесия и состояния покоя.

Граничные условия:

– давление в ПГП и в воде на границе раздела сред одинаково;

– на границах раздела воды, мембраны и стенок корпуса разрядной камеры соблюдается условие непротекания.

Внешняя нагрузка от давления, создаваемого расширяющейся ПГП, принималась в форме полуволны синусоиды:

$$F(t) = F_{\max} \sin \frac{\pi}{\tau} t, \quad (1)$$

где F_{\max} – амплитудное значение нагрузки; τ – период нагрузки; t – время.

Величина F_{\max} , действующего на мембрану, находится из уравнения состояния воды в форме Тэта.

Максимальный радиус расширяющейся ПГП составляет 25% от радиуса пульсации ПГП в открытом объеме, а длительность нагрузки τ – 10% от периода пульсации ПГП в открытом объеме [9], который определяется формулой Виллиса.

Демпфирующие свойства расплава характеризуются диссипативными силами волнового и вязкостного сопротивлений. Учитывались присоединенная масса жидкого металла и восстанавливающая сила Архимеда. Коэффициент упругости пластины определяется согласно закону Гука по методике, предложенной в [1].

Тогда динамическую модель ЭРГУК на упругих элементах при ЭГИО расплава в ковше можно представить в виде колебательной системы с двумя степенями свободы, имеющей два упругих элемента и демпфер (см. рис.2). Возмущающая сила соответствует осесимметричной нагрузке (1) от расширяющейся ПГП. Решалась одномерная задача колебаний мембраны с волноводом, который считался абсолютно жестким. В такой постановке согласно [6] можно считать, что движение торца волновода соответствует перемещениям полюса мембраны.

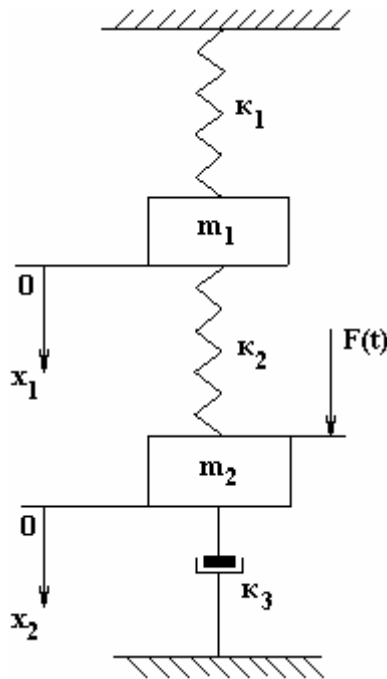


Рис. 2. Динамическая модель ЭРГУК на упругих элементах при ЭГИО расплава

Движение динамической модели с двумя степенями свободы описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -k_1 m_1 - k_2 (x_1 - x_2); \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -c_1 \left(\frac{dx_2}{dt} \right)^2 - c_2 \frac{dx_2}{dt} - c_3 x_2 - k_2 (x_2 - x_1) + F(t), \end{cases} \quad (2)$$

где m_1 – масса разрядной камеры с водой без учета подвижной части волноводно-излучательной системы; m_2 – масса подвижной части мембраны с волноводом с учетом присоединенной массы жидкого металла; k_1 – суммарный коэффициент жесткости пакетов упругих элементов; k_2 – коэффициент жесткости мембраны; x_1 – смещение центра масс разрядной камеры в рабочем состоянии; x_2 – смещение полюса мембраны; c_1, c_2, c_3 – коэффициенты вязкостного, волнового сопротивления и восстанавливающей силы соответственно; $F(t)$ – возмущающая сила. На основании численного решения методом Рунге-Кутты системы (2) проведены расчеты амплитуды затухающих колебаний торца волновода без насадки и с круговой насадкой (в зависимости от ее диаметра) при различных значениях соотношения жесткости упругих элементов ЭРГУК и мембраны.

Обсуждение результатов

Численный эксперимент проводился при величине запасенной энергии конденсаторной батареи 1 кДж. Геометрические параметры ЭРГУК (см. рис. 1) соответствуют тем, которые используются в реальных установках опытно-промышленного назначения для ЭГИО металла в ковше: высота разрядной камеры $H_k=270$ мм; внутренний диаметр разрядной камеры $d_k=230$ мм; рабочая длина канала разряда $l_p=30$ мм; диаметр подвижной части мембраны принимался равным d_k ; толщина мембраны $\delta_m=16,5$ мм; диаметр волновода $d_w=20$ мм; длина волновода $l_w=900$ мм. Расчеты проведены для трех значений диаметра круговых насадок d_n – 30, 50 и 70 мм. Материал мембраны и волновода – СтЗ, объект обработки – расплавы Al, Fe и Pb. Отношение суммарной жесткости упругих элементов к жесткости мембраны k_1/k_2 принималось равным: 0,1; 0,5; 1.

Результаты численного моделирования приведены на рис. 3, 4 и 5 в виде графических зависимостей смещения торца волновода в расплаве от времени. В общем, движение торца волновода представляет собой затухающие гармонические колебания, что объясняется синусоидальным законом (1) изменения возмущающей силы $F(t)$. Наличие круговых насадок на торце волновода способствует более интенсивному затуханию колебаний, причем чем больше диаметр насадки, тем быстрее система возвращается в положение статического равновесия. Например, для расплава алюминия (см. рис. 3) при d_n , равном 30 мм, колебания практически затухают после 200 мс, а с увеличением d_n до 70 мм уже после 40 мс амплитуда падает до нуля. Демпфирующие свойства расплава определяются его плотностью, поэтому с ее повышением более заметно падает амплитуда. Так, если для расплава алюминия при колебаниях волновода без насадки амплитуда падает до 1 мм примерно через 110 мс (см. рис. 3), то для расплава железа это значение амплитуды наблюдается при 38 мс (см. рис. 4), а для свинца соответственно 35 мс (см. рис. 5).

Влияние жесткости упругих элементов ЭРГУК демонстрирует рис. 6. Чем ближе значение жесткости упругих элементов к жесткости мембраны, тем больше частота колебаний волновода, но величина амплитуды при этом значительно уменьшается. Следует отметить, что первый максимум амплитуды существенно превышает последующие значения при $k_1=k_2$.

Перемещение торца волновода в период действия нагрузки, который для данных условий составлял 1,63 мс, изображено на рис. 7. На временном интервале, соответствующем полупериоду нагрузки, в основном перемещении волновода присутствуют высокочастотные составляющие. Причем в большей степени это проявляется у волновода без насадки. Жесткость упругих элементов здесь также влияет на процесс колебательного движения. Чем выше ее значение, тем существеннее на этой стадии период перемещения волновода приближается к периоду действия нагрузки (см. рис. 7, в).

В технических приложениях одним из основных технологических параметров ЭГИО является частота следования импульсов, которая находится в пределах от 0,5 до 20 Гц. Как показано в данной работе, длительность процессов нагружения лежит в миллисекундном диапазоне, поэтому, регулируя жесткость упругих элементов и размеры демпфера (насадки), можно обеспечивать условия нагружения с паузой или без нее. В первом случае получим более активную дегазацию металла, так как в паузах нагружения пузырьки газа успеют покинуть зону обработки [10]. Во втором случае обеспечиваются более интенсивное перемешивание расплава и изменение его структуры.

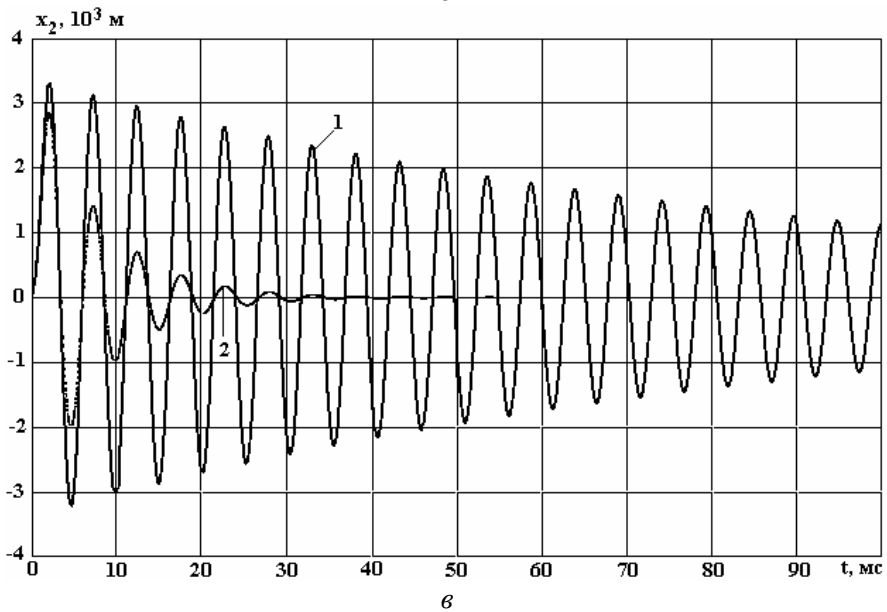
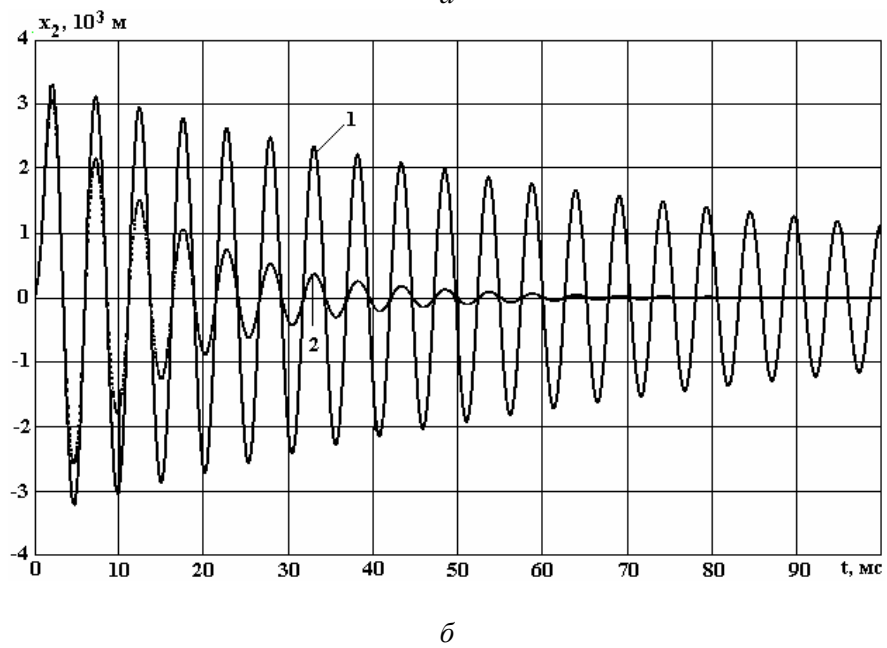
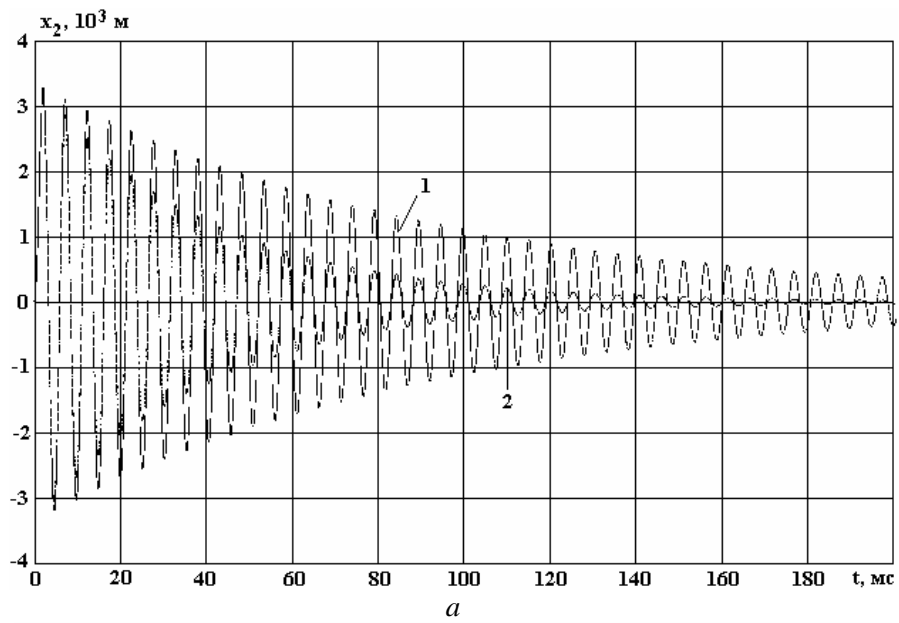
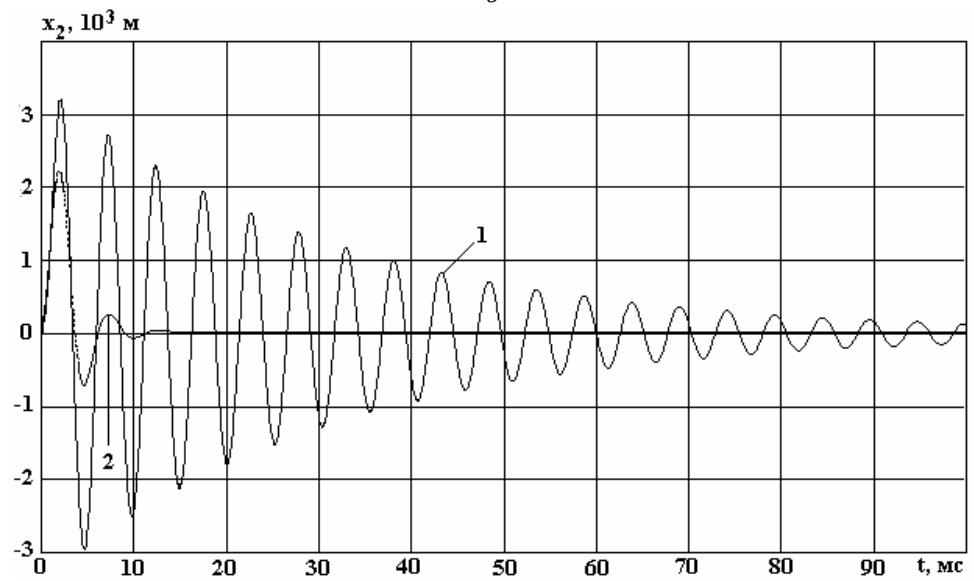
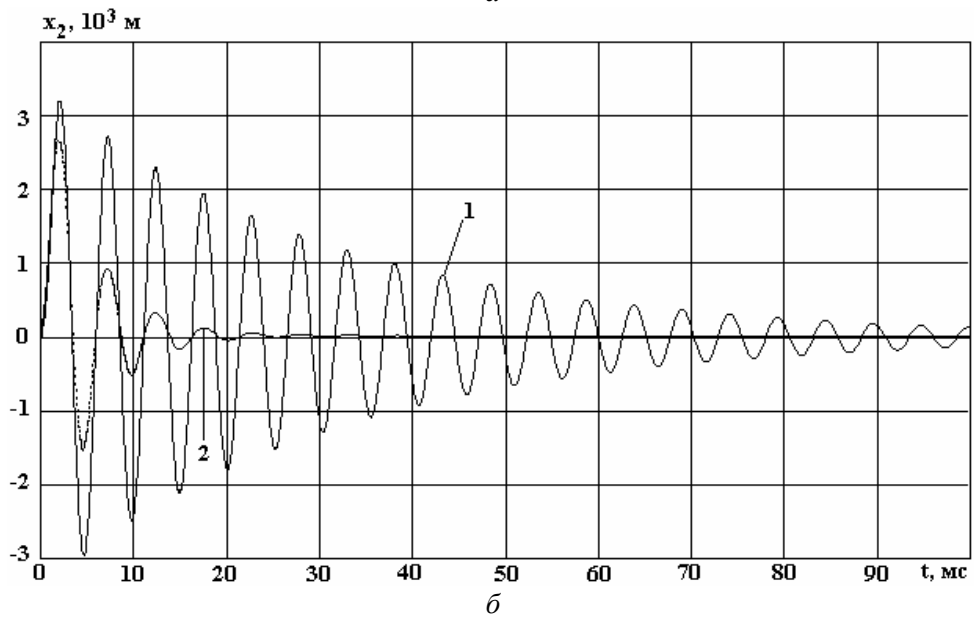
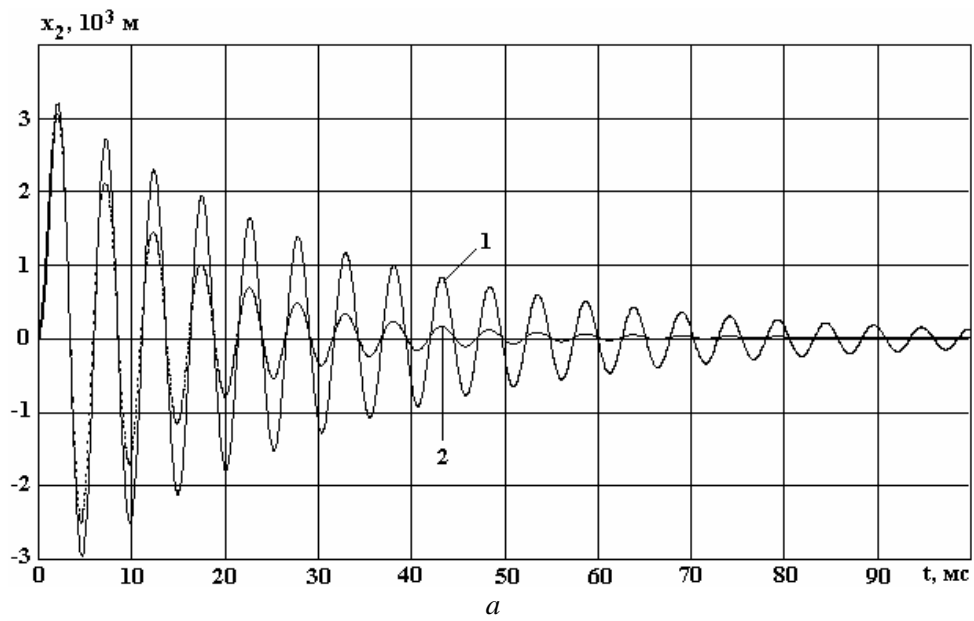


Рис.3. Смещение волновода в расплаве алюминия при $k_1=0,1 \cdot k_2$ и различных значениях диаметра круговой насадки d_n , мм: а – 30; б – 50; в – 70. 1 – без насадки; 2 – с насадкой



в

Рис. 4. Смещение волновода в расплаве железа при $k_1=0,1 \cdot k_2$ и различных значениях диаметра круговой насадки d_n , мм: а – 30; б – 50; в – 70. 1 – без насадки; 2 – с насадкой

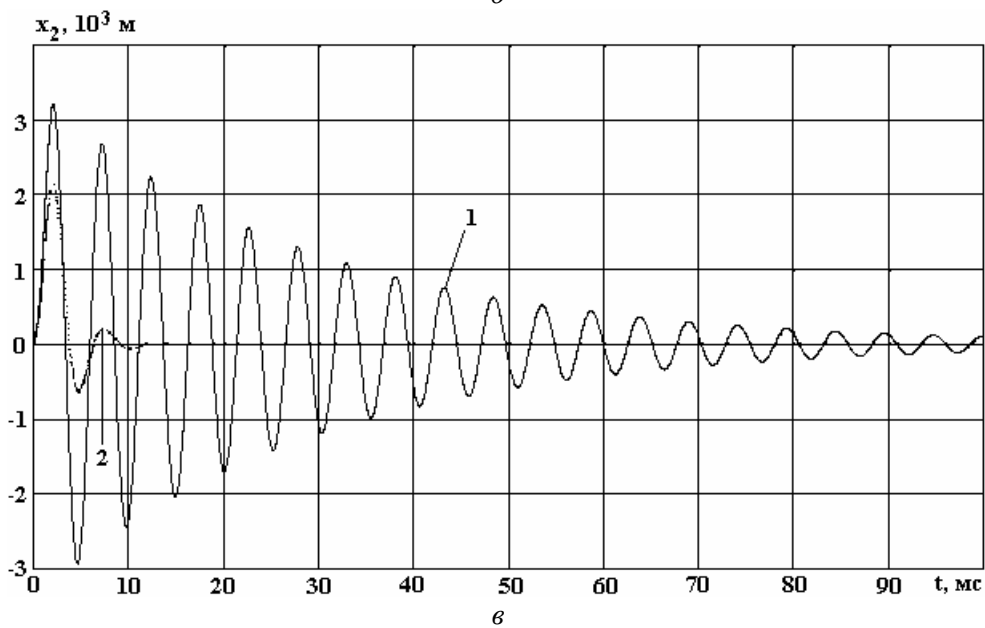
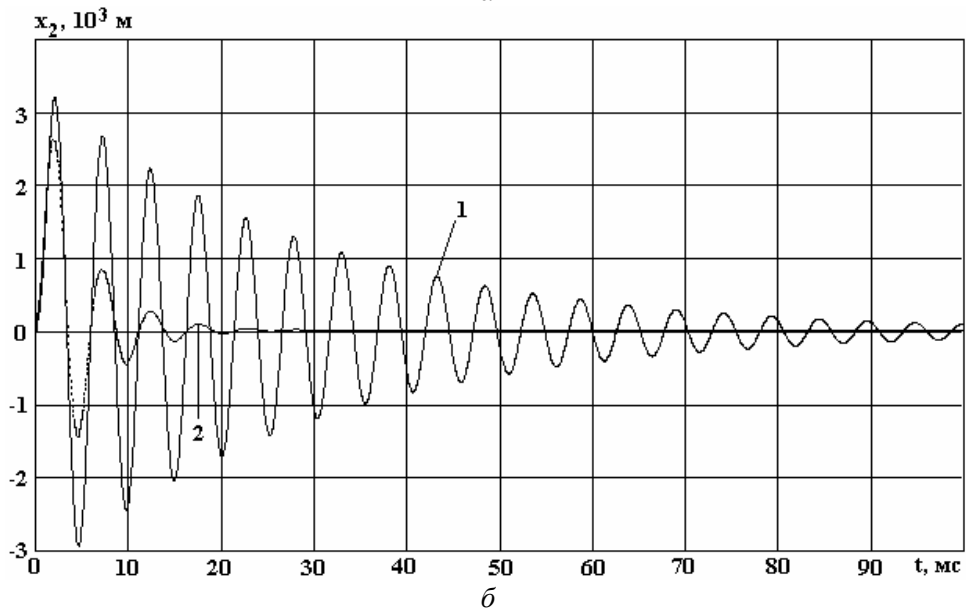
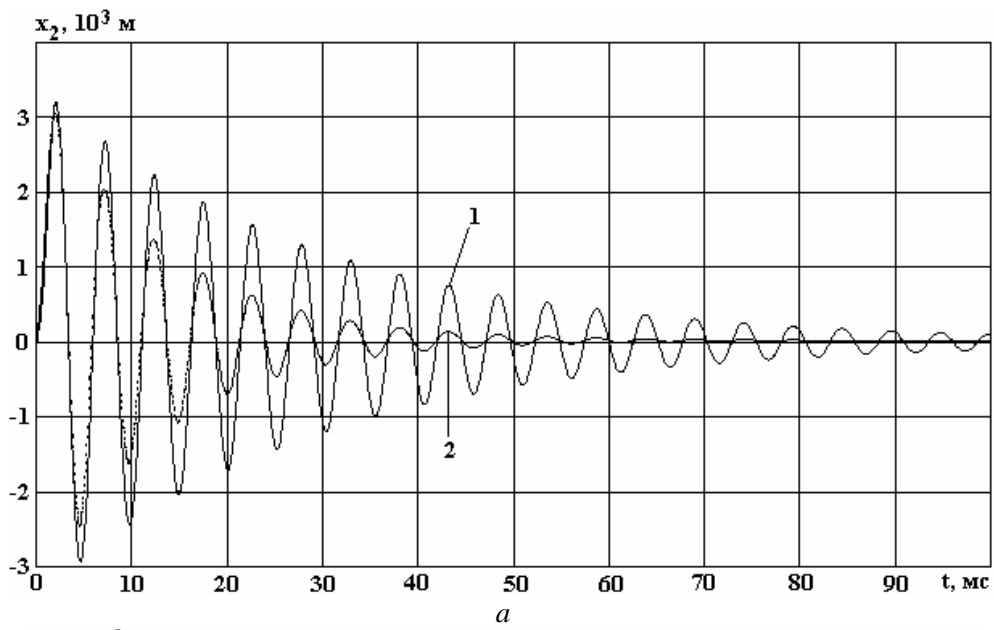


Рис. 5. Смещение волновода в расплаве свинца при $k_1=0,1 \cdot k_2$ и различных значениях диаметра круговой насадки d_n , мм: а – 30; б – 50; в – 70. 1 – без насадки; 2 – с насадкой

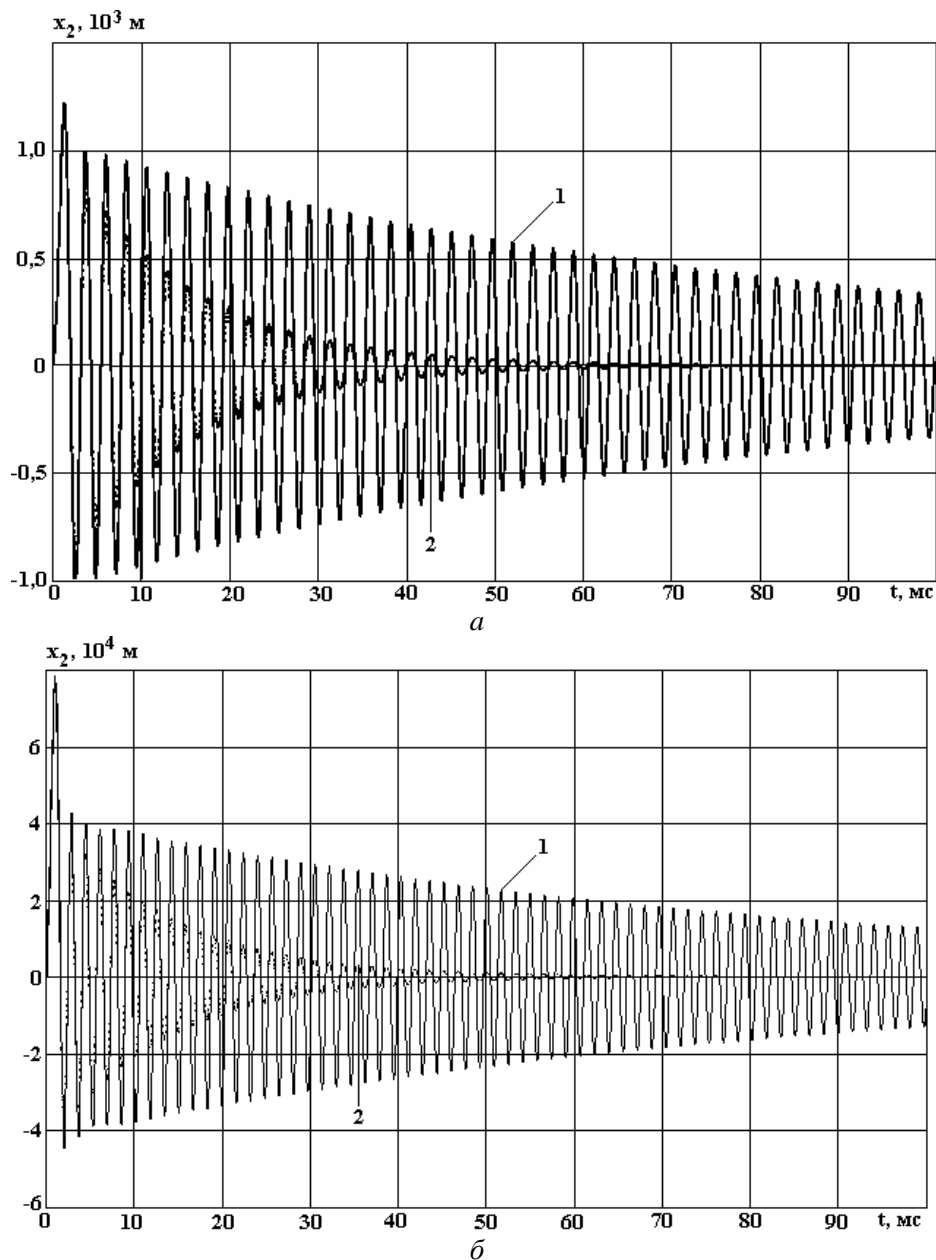


Рис. 6. Смещение волновода в расплаве алюминия при диаметре круговой насадки $d_n=50$ мм и различных значениях k_1/k_2 : а – 0,5; б – 1. 1 – без насадки; 2 – с насадкой

В качестве характеристики диссипативных свойств колебательной системы используется логарифмический декремент колебаний, который равен натуральному логарифму отношения двух последовательных пиковых значений смещения, разделенных во времени одним периодом. С другой стороны, отношение диссипированной (рассеянной) энергии за один цикл к средней энергии цикла также характеризует быстроту затухания колебательного процесса и представляет собой коэффициент поглощения ψ , который при умеренном затухании вдвое больше логарифмического декремента [11]. Оценим значения ψ для данных расплавов в предположении, что затухание колебаний волновода без насадки и с круговой насадкой при d_n , равном 30 мм, умеренное (см. рис. 3–5,а), то есть $\psi=\text{const}$ для всего процесса движения. Полученные результаты представлены в таблице.

Значения коэффициента поглощения ψ при ЭГИО расплавов

Расплав Al		Расплав Fe		Расплав Pb	
Волновод без насадки	Волновод с насадкой, $d_n=30$ мм	Волновод без насадки	Волновод с насадкой, $d_n=30$ мм	Волновод без насадки	Волновод с насадкой, $d_n=30$ мм
0,112	0,268	0,325	0,75	0,355	0,81

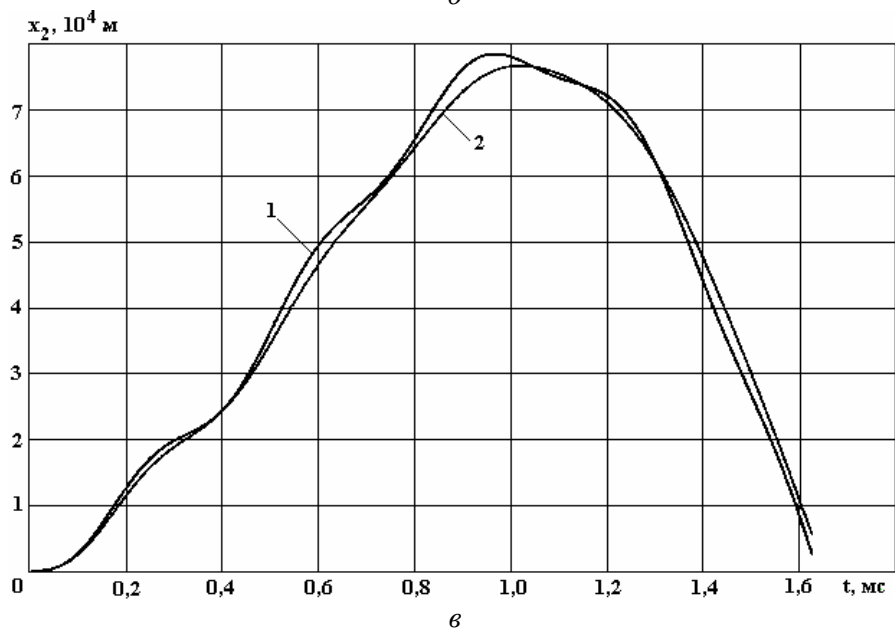
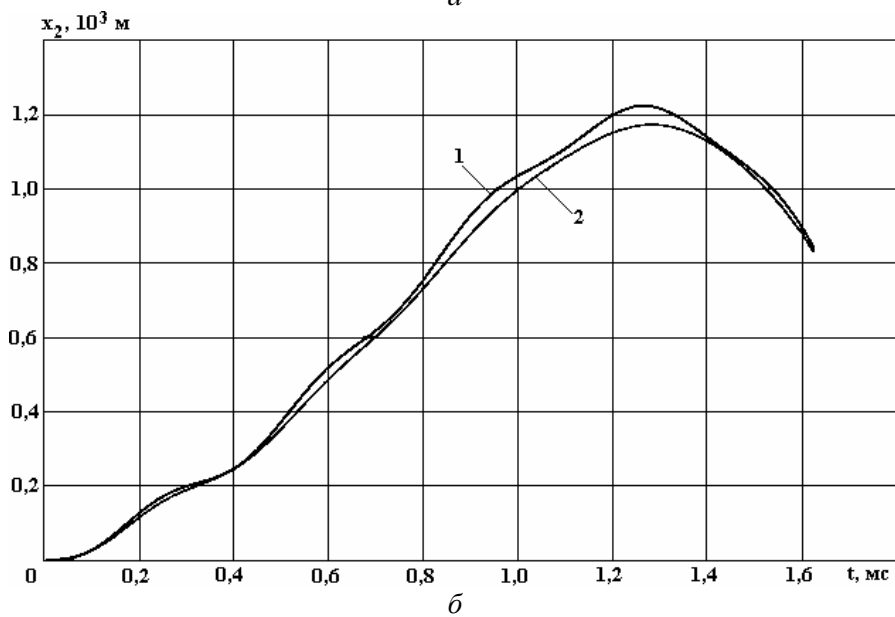
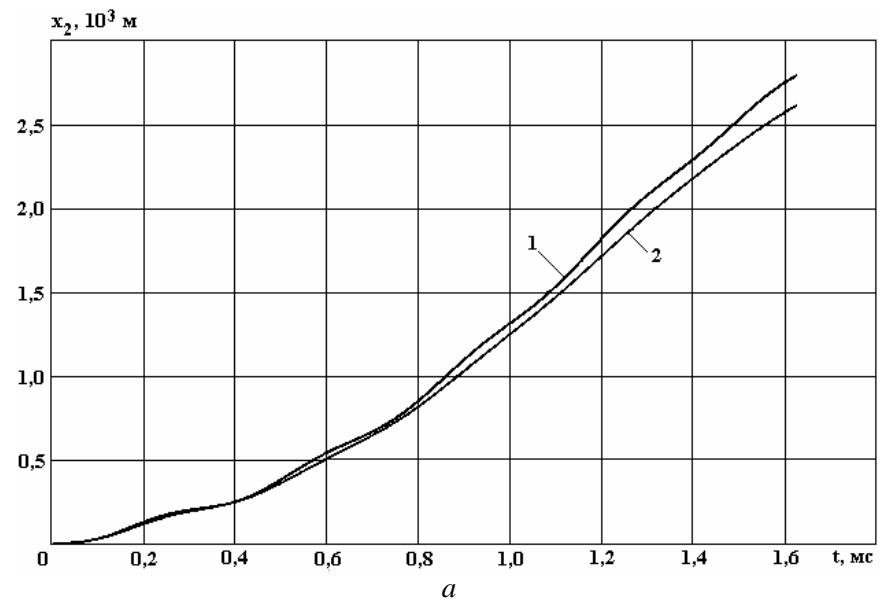


Рис.7. Смещение волновода в расплаве алюминия в период действия нагрузки при диаметре круговой насадки $d_n=50$ мм и различных значениях k_1/k_2 : а – 0,1; б – 0,5; в – 1. 1 – без насадки; 2 – с насадкой

При использовании волновода с круговой насадкой диаметром $d_n=30$ мм значение ψ увеличивается приблизительно в 2,3 раза по сравнению с волноводом без насадки для всех приведенных расплавов. С повышением d_n колебания волновода гасятся более интенсивно (см. рис. 3–5, б, в), а ψ будет изменяться уже по другому закону и значительно возрастет. Доля диссипированной энергии определяется также физическими свойствами расплава. Так, для расплавов железа и свинца значение ψ примерно в 3 раза больше по сравнению с расплавом алюминия, причем как в случае волновода с насадкой, так и без нее (см. табл.).

Анализ полученных результатов показывает, что применение волноводных насадок при ЭГИО расплава способствует быстрому затуханию колебаний, то есть существенной диссипации (рассеянию) затраченной энергии в зависимости от свойств обрабатываемого металла.

При любом виде нагружения затраченную энергию можно представить в виде суммы двух составляющих, то есть энергия E_0 , передаваемая в расплав через рабочий элемент ЭРГУК, переходит в некую энергию E_n и энергию диссипации $E_{дис}$:

$$E_0 = E_n + E_{дис}.$$

Энергия E_n расходуется на генерирование нестационарного поля давлений, акустической кавитации, развития локальных акустических потоков и течений и т.п., что способствует дегазации, рафинированию от вредных примесей, гомогенизации расплава, активации потенциальных центров зародышеобразования.

Влияние энергии диссипации на структуру металла неоднозначно и определяется способом обработки. При этом до недавнего времени исследователи пренебрегали вкладом доли $E_{дис}$ в формирование новой структуры объекта обработки. Вместе с тем, как показывают последние исследования в области синергетики [12, 13], роль диссипированной в материале энергии может быть определяющей в формировании структуры нового качества.

Выводы

1. При ЭГИО расплава ЭРГУК на упругих элементах применением волноводных насадок доля диссипируемой энергии увеличится, что в свою очередь, наряду с энергией E_n , приводящей к внутренним структурно-кинетическим изменениям, будет оказывать влияние на процессы самоорганизации в расплаве и формирование качественно новой структуры.

2. Коэффициент поглощения ψ расплавов Fe и Pb при ЭГИО волноводами как с насадкой, так и без нее приблизительно в 3 раза превышает величину ψ расплава Al, то есть доля диссипированной энергии существенно зависит от свойств обрабатываемого металла.

3. Регулируя величину соотношения жесткости упругих элементов ЭРГУК и мембраны, можно при высоких скоростях гидротоков в расплаве достигнуть значительной доли энергии диссипации, соизмеримой с величиной E_n .

4. Оптимальный подбор жесткости упругих элементов и геометрических размеров волноводных насадок позволит обеспечить более активную дегазацию, интенсивное перемешивание и изменение структуры расплава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Исследование амплитуды перемещения передающего элемента электроразрядного генератора упругих колебаний // Электронная обработка материалов. 2003. № 6. С. 63–69.
2. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Влияние геометрических характеристик электроразрядного генератора упругих колебаний на перемещение рабочего элемента на послеразрядной стадии // Электронная обработка материалов. 2006. № 1. С. 63–69.
3. Цуркин В.Н., Грабовый В.М., Синчук А.В. Функциональные возможности электрогидроимпульсной обработки расплава в ковше // Электронная обработка материалов. 2006. № 5. С. 55–61.
4. Грабовый В.М., Синчук А.В., Цуркин В.Н. Механизм влияния ЭГИО на состояние расплава перед разливкой и кристаллизацию высокоуглеродистых сплавов // Теория и практика металлургии. 2000. № 6 (20). С. 28–31.
5. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
6. Галиев Ш.У., Барбашова Г.А., Билянский Ю.С., Журнов М.В., Косенков В.М. Взаимодействие электроразрядного генератора колебаний с жидким металлом в ковше // Проблемы прочности. 1991. № 11. С. 78–82.
7. Цуркин В.Н., Мельник А.В., Грабовый В.М. Анализ спектральных характеристик электроразрядного генератора // Зб. наук. праць НУК. 2005. № 2 (401). С. 106–112.
8. Поздеев В.А., Царенко П.И., Бутаков Б.И., Малюшевский П.П. Электроразрядные генераторы упругих колебаний. Киев: Наукова думка, 1985. 176 с.

9. Литвиненко В.П., Шамко В.В., Дервянко Ю.И. Влияние жесткой оболочки на динамику парогазовой полости // Основные проблемы разрядно-импульсной технологии. Киев: Наукова думка, 1980. С. 50–61.
10. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Оценка рационального времени выдержки расплава перед разливкой // Зб. наук. праць НУК. 2006. № 6 (411). С. 75–81.
11. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л.: Машиностроение, 1976. 320 с.
12. 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.
13. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 382 с.

Поступила 31.01.08

Summary

The results of numeral modelling of wave guide-radiate system dynamics for electrical discharge generator of vibrations with resilient elements are presented. Possibility of metal structure change due to the optimum selection of rigidity of resilient elements and application of wave guide nozzles is shown. It is ascertained, that the part of energy dissipation depends on nozzle configuration and properties of the treated metal.
