

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АППАРАТ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА АЛЮМИНИЯ

В.Н. Хмелёв, С.Н. Цыганок, Д.С. Абраменко, В.А. Нестеров, С.Ф. Рыжова

Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ, г. Бийск

Статья посвящена практическим вопросам разработки и проектирования ультразвуковых аппаратов с пьезоэлектрическими излучателями для воздействия на жидкие среды, находящиеся при высоких температурах (до 1000°C). Авторы подтверждают эффективность применения созданного оборудования на примере ультразвукового воздействия на расплав алюминия.

Ключевые слова: ультразвуковое воздействие, кавитационное воздействие, расплав металлов, ниобий.

ВВЕДЕНИЕ

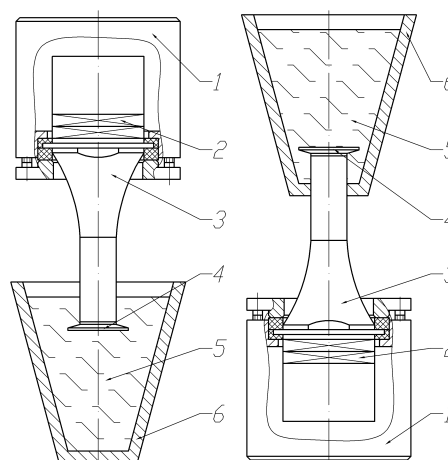
Современным эффективным способом воздействия на расплавленный металл является воздействие механическими колебаниями ультразвуковой частоты высокой интенсивности. При определённых параметрах интенсивности ультразвукового воздействия в расплаве металла возникает такое явление как кавитация. При этом активно протекает процесс рафинирования – удаление водорода и твердых оксидных включений, интенсифицируется процесс дегазации. Особенно это явно выражается в обработке расплава алюминия. Ультразвуковое воздействие на расплав металла способствует его дополнительному перемешиванию, позволяет изменить кинетику процесса кристаллизации и получить предельную степень измельчения литого зерна. Кроме этого, высокоинтенсивное ультразвуковое воздействие позволяет в процессе модифицирования вводить в металл различные композитные элементы и тугоплавкие лигатуры, воздействуя непосредственно на кристаллическую решетку [1, 2].

Алюминий широко применяется в промышленности. Качество исходного сырья влияет на конечные параметры изготавливаемых деталей, поэтому важно получать расплав алюминия и его сплавов, идущий на формирование фасонных отливок и слитков, очищенный от неметаллических включений. Для этих целей широко применяется ультразвуковое воздействие [3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Чтобы эффективно осуществлять ультразвуковое воздействие необходимо погружать рабочий инструмент непосредственно в сам расплав металла, так как показано на рис. 1.

Температура плавления алюминия составляет 800-1000 °С. Это накладывает дополнительные требования к проектированию ультразвукового оборудования, которое может применяться для этих целей.



1 – корпус, 2 – пьезоэлектрические элементы, 3 – концентратор, 4 – рабочий инструмент, 5 – расплав, 6 – тигель

Рис. 1. Схемы осуществления ультразвукового воздействия в расплав (а – сверху, б – снизу)

Таким образом, целью настоящей работы является разработка, проектирование и изготовление ультразвукового технологического аппарата, который предназначен для непосредственного воздействия на расплав алюминия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выбрать материалы компонентов ультразвуковой колебательной системы с учетом температуры расплава;
- предложить систему тепловой защиты пьезоэлектрического преобразователя от высоких температур;
- предложить конструктивную схему ультразвуковой колебательной системы и с помощью метода конечных элементов произвести расчет всех ее элементов при учете температурных режимов работы.
- спроектировать и изготовить электронный генератор для питания ультразвуковой колебательной системы и разработать алгоритм его работы.

Решению поставленных задач посвящена настоящая работа.

РАЗРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В ультразвуковых колебательных системах широко применяются титан и его сплавы. Однако, как показали исследования, проведенные авторами, предельная температура, при которой титан теряет свои свойства (с точки зрения ультразвукового воздействия), составляет 200-250 °С. Точное значение температуры зависит от марки сплава.

Стальные сплавы менее подвержены влиянию температур. Поэтому было предложено выполнить рабочий инструмент, контактирующий с расплавом алюминия, из стали 45. Однако при температуре выше 800 °С железо, содержащееся в сплаве сталь 45 очень сильно окисляется с образованием примесей. Это особенно важно, когда в расплав алюминия вводят дополнительные компоненты. Например, карбоновое волокно для его пропитки. Поэтому возникла необходимость замены материала рабочего инструмента или его части. Было предложено использовать для этих целей сплав ниобия НБ-1П.

Таким образом, были выбраны следующие материалы рабочего инструмента ультразвуковой колебательной системы: погружаемая в расплав алюминия температурой 800-1000 °С часть рабочего инструмента выполняется из ниобиевого сплава НБ-1П, остальная часть рабочего инструмента, находящаяся в тигле на расплаве и вне тигеля, выполняется из стали 45. Полностью изготавливать рабочий инструмент только из ниобиевого сплава нецелесообразно. Он по своей стоимости сравним с серебром, что значительно увеличивает стоимость разрабатываемого ультразвукового оборудования.

В качестве электромеханического преобразователя (преобразователя Ланжевена) в ультразвуковой колебательной системе используются пьезоэлектрические элементы из пьезоэлектрической керамики APC-841 или APC-844. Значением точки Кюри у такой пьезоэлектрической керамики составляет 320°С, а ее рабочая температура 50% от точки Кюри. Вследствие высокой температуры обрабатываемого расплава и теплопередачи через металлические элементы ультразвуковой колебательной системы необходимо предусмотреть устройство компенсации нагрева пьезоэлектрических элементов. Для этого в конструкции ультразвуковой колебательной системы было предложено использовать дополнительное бустерное звено с жидкостным охлаждением. Эффективность такого подхода отмечалась в работе [4], связанной с получением мелкодисперсного порошка алюминия из расплава при акустическом распылении с дополнительным наложением ультразвуковых колебаний на форсунку.

В результате обеспечения всех требований по эксплуатационным характеристикам и особенностям протекания технологического процесса была выбрана многополуволновая конструкция ультразвуковой ко-

лебательной системы. Она состоит из полуволнового электромеханического преобразователя, бустерного звена и активного (двухполуволнового) волновода из стали 45 с узлом крепления на тигеле и активного рабочего инструмента из ниобиевого сплава НБ-1П, который вводится в расплав алюминия.

Расчет основных геометрических размеров электромеханического преобразователя, бустерного звена и дополнительного волновода, выполнялся с учетом методики, приведенной в работах [5, 6]. В конструкциях ультразвуковых колебательных систем, состоящих из полуволновых элементов, очень важно соблюсти их частотное согласование.

Одним из параметров материала, влияющим на собственную резонансную частоту является модуль Юнга. На рис. 2 приведен график его от температуры для используемых материалов: сталь 45 и ниобиевый сплав. Для расчета методом конечных элементов в модальном анализе характеристики исходных материалов (модуль Юнга) был задан с учетом полученных данных.

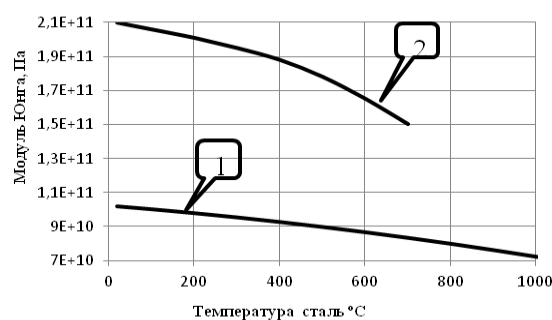


Рис. 2. Зависимость модуля Юнга от температуры

На рис. 3 приведен график распределения температур вдоль осевой линии ниобиевого рабочего инструмента при разных начальных температурах обрабатываемой среды (1 – 300 °С; 2 – 500 °С; 3 – 700 °С).

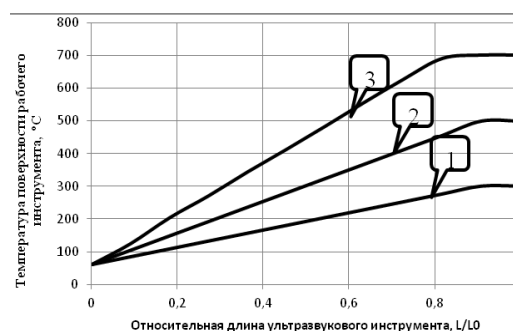


Рис. 3. Распределение температуры по длине ультразвукового инструмента из ниобиевого сплава НБ-1П

Модальный анализ не позволяет задавать распределение температуры в ограниченном объеме одного тела. Поэтому для расчета ниобиевого рабочего инструмента был предложен декомпозиционный подход. Он заключался в разбиении при моделировании

монолитного рабочего инструмента на отдельные составляющие (рисунок 4, а) и установка жесткой связи между ними. Результаты модального анализа приведены на рис. 4, б.

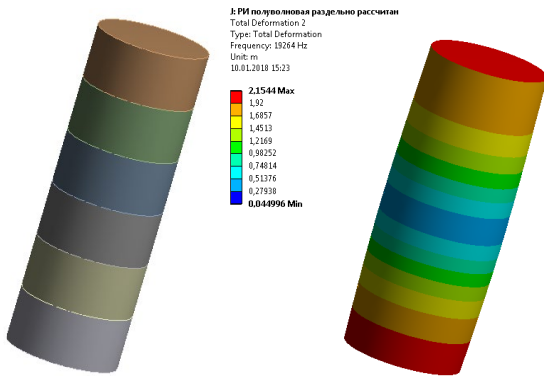
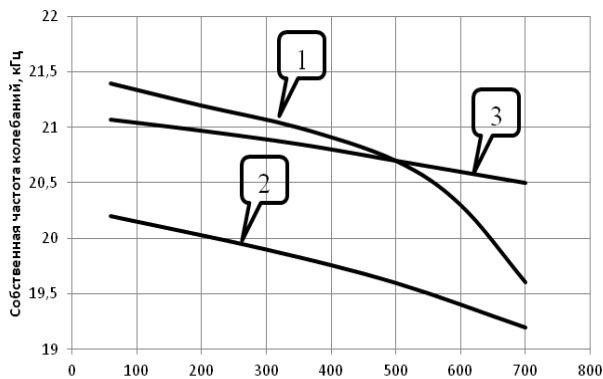


Рис. 4. Модальный анализ и его результат: а – декомпозиция рабочего инструмента; б – распределение амплитуд колебаний

Результаты расчета собственных резонансных частот рабочего инструмента, дополнительного волновода, с учетом температурных режимов и зависимости модуля Юнга от температуры, приведены на рис. 5.



Температура окончания рабочего окончания ультразвукового инструмента, град. С
 1 – двухполуволновой волновод (сталь 45);
 2 – рабочий инструмент (НБ-1П);
 3 – двухполуволновой волновод + рабочий инструмент
 Рис. 5. – Зависимость собственной частота колебаний от температуры

Значительные изменения рабочей частоты двухполуволнового рабочего инструмента (с 19,7 кГц до 21,4 кГц) были скомпенсированы изменениями собственной резонансной частоты ниобиевого рабочего инструмента (с 19,25 кГц до 20,25 кГц) при моделировании их нагрева до 700 °С. Такой подход позволил получить изменения собственной резонансной частоты их объединенной конструкции (волновод + рабочий инструмент) в незначительном диапазоне (с 20,5 кГц до 21 кГц) при нагреве расплава до 700 °С. Экспериментальная проверка изменения резонансной частоты при ультразвуковой обработке расплава

алюминия в тигле подтвердила правильность предложенного подхода.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенных расчетов и по результатам моделирования было спроектировано и разработано ультразвуковое технологическое оборудование для воздействия на расплавы металлов (рис. 6), характеристики которого приведены в табл. 1.



Рис. 6. Ультразвуковой технологический аппарат «Волна-Т» модель УЗТА-1/22-ОРВ

Основные его технические характеристики указаны в табл. 1.

Табл. 1. Технические характеристики

Наименование	Значение
Мощность, ВА, не более	1000
Частота УЗ воздействия, кГц	22±1,65
Питание от сети переменного напряжения, В	220±22
Интенсивность излучения, Вт/см ² , не менее	10
Максимальная температура обрабатываемого расплава, °С	1000

Разработанное оборудование планируется применять для ультразвукового воздействия на расплав алюминия, в частности для пропитки карбонового волокна в расплаве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы была достигнута цель – был разработан, спроектирован и изготовлен ультразвуковой технологический аппарат, который предназначен для непосредственного воздействия на расплав алюминия:

- были выбраны материалы компонентов ультразвуковой колебательной системы, непосредственно находящиеся в зоне повышенных температур: рабочий инструмент из ниобиевого сплава НБ-1П, дополнительный волновод из сплава сталь 45;
- предложена конструктивная схема с использованием бустерного жидкостного звена для тепловой защиты пьезоэлектрического преобразователя от высоких температур;
- на основании компьютерного моделирования методом конечных элементов был предложен подход к проведению модального анализа для расчета геометрических размеров рабочего инструмента и до-

полнительного волновода с учетом влияния температуры на акустические свойства материалов (в частности, на модуль Юнга).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Марков А.И. Применение ультразвука в промышленности. Под ред. А.И. Маркова. М., «Машиностроение», 1975, 239 с.

2. Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Levin S.V., Lebedev A.V. The Apparatus for Ultrasonic Treatment of Melts and Hot Liquids // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P.333-336.

3. Агранат Б.А. Ультразвуковая технология. Под ред. Б.А. Аграната. Издательство: Металлургия, 1974, 504 с.

4. Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Змановский С.В., Хмелев С.С. Использование ультразвуковых колебаний для повышения эффективности распыления расплава алюминия // Научно-технический вестник Поволжья, 2011. – № 5. – С. 135–140.

5. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., Lebedev A.N. Designing and Efficiency Analysis of Half-Wave Piezoelectric Ultrasonic Oscillatory Systems. International Siberian Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials Proceeding EDM'2005: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2005. – P.82-85.

6. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Levin S.V. Rules and Features of the Design of Piezoelectric Sources of High-Intensity Ultrasonic Action // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2013: Novosibirsk, NSTU, 2013. – P. 153-157

7. Khmelev V.N., Abramenko D.S., Barsukov R.V., Genne D.V. Monitoring of Ultrasonic Generators Parameters for Definition of Optimal Modes of Ultrasonic Influence on Different Medium // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P.239–243.

8. Khmelev V.N., Abramenko D.S., Genne D.V., Slivin A.N., Romashkin A.A. Matching of Electronic Generators with Piezoelectric

Vibrating Systems for Effectiveness Increase of Ultrasonic Device // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P. 354–359.

9. Khmelev V.N., Abramenko D.S., Barsukov R.V., Genne D.V. System of Continuous Control of Output Parameters in Ultrasonic Technological Devices // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P. 303–305.

Хмелев Владимир Николаевич – заместитель директора по науке, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Цыганок Сергей Николаевич – доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: grey@bti.secna.ru.

Абраменко Денис Сергеевич – доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.

Нестеров Виктор Александрович – доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: nva@bti.secna.ru.

Рыжова Светлана Федоровна - студент группы ПС-51 Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО "Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», e-mail: swe-ta300498@yandex.ru

ULTRASONIC DEVICES FOR ALUMINUM MELT PROCESSING

V.N. Khmelev, S.N. Tsyganok, D.S. Abramenko, V.A. Nesterov, S.F. Ryzhova

Biysk Technological Institute, Biysk

Abstract – The article is devoted to practical questions of ultrasonic devices development with piezoelectric converter for influence on liquid media, which are at high temperatures (up to 1000°C). The authors confirm the effectiveness of the developed device (for example of aluminum melt ultrasonic processing).

Index terms: ultrasonic influence, cavitation influence, metal melt, niobium.

REFERENCES

1. Markov A.I. Application of ultrasound in the industry. Under the editorship of A.I. Markov. M, “Mashinostroyeniye”, 1975, 239 p.
2. Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Levin S.V., Lebedev A.V. The Apparatus for Ultrasonic Treatment of Melts and Hot Liquids // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P.333-336.
3. Agranat B.A. Ultrasonic technology. Under the editorship of B.A. Agranat. Publisher: Metallurgy, 1974, 504 p.
4. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Zmanovskiy S.V., Khmelev S.S. Use of ultrasonic oscillations for increasing the efficiency of aluminum melt sputtering // Scientific and Technical Herald of the Volga Region, 2011. - No. 5. - P. 135-140.
5. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Zmanovsky S.V., Khmelev S.S. Use of ultrasonic vibrations for increase in efficiency of spraying of fusion of aluminum//the Scientific and technical bulletin of the Volga region, 2011. – No. 5. – P. 135—140.
6. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., Lebedev A.N. Designing and Efficiency Analysis of Half-Wave Piezoelectric Ultrasonic Oscillatory Systems. International Siberian Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials Proceeding EDM'2005: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2005. – P.82-85.
7. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Levin S.V. Rules and Features of the Design of Piezoelectric Sources of High-Intensity Ultrasonic Action // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2013: Novosibirsk, NSTU, 2013. – P. 153-157.
8. Khmelev V.N., Genne D.V., Abramenko D.S., Barsukov R.V., Ilchenko E.V., Tsyganok S.N. // Development of the electronic generators of the ultrasonic technological apparatuses. 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Novosibirsk, NSTU, 2015. – P 204 - 207
9. Khmelev V.N., Abramenko D.S., Barsukov R.V., Genne D.V. Monitoring of Ultrasonic Generators Parameters for Definition of Optimal Modes of Ultrasonic Influence on Different Medium // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P.239–243.

Khmelev Vladimir Nikolaevich – deputy director for science, professor, Biysk Technological Institute, заместитель директора по науке, (3854)432581, e-mail: vnk@bti.secna.ru.

Tsyganok Sergey Nikolaevich – associate professor at the char of methods and means of measurement and automation, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: grey@bti.secna.ru.

Denis Sergeevich Abramenko – associate professor at the char of methods and means of measurement and automation, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.

Nesterov Viktor Alexandrovich – associate professor at the char of methods and means of measurement and automation, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: nva@bti.secna.ru.

Ryzhova Svetlana Fedorovna is a student of PS-51 group of Biysk Technological Institute (branch) of FSBEI HE «Altai State Technical University named after I. I. Polzunov», e-mail sweta300498@yandex.ru