

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

УДК 621.7.04

doi: 10.21685/2072-3059-2024-1-12

Исследование воздействия ультразвуковых колебаний на границе раздела двух сред: газ–жидкость

А. А. Казинский¹, Д. В. Бабакаев²

^{1,2}Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

¹aak@sstu.ru, ²demonmat11@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью данной работы является исследование воздействия ультразвуковых колебаний на поверхность жидкости для последующего использования в процессах электродуговой наплавки. *Материалы и методы.* Для достижения поставленной цели использовался дюралевый ампульно-ступенчатый концентратор при частоте 21400 Гц. Измерения проводили на пьезоэлектрическом преобразователе с частотой 19–24 кГц, в качестве жидкости использовалась техническая вода. *Результаты.* Установлены зависимости высоты излучающей поверхности концентратора ультразвуковых колебаний (УЗК) от поверхности жидкости, на которой происходит воздействие и образование «лунки»; определены параметры ультразвуковой волны, проходящей через раздел двух сред: вода–воздух; определены размеры глубины «лунки», давления и площади поверхности при максимальном воздействии. *Выводы.* Полученные результаты могут и будут использованы в процессах электродуговой наплавки металлов в качестве формообразующего фактора.

Ключевые слова: ультразвук, ультразвуковая обработка, колебания, длина волны, генератор, металлургия, машиностроение, наплавка

Для цитирования: Казинский А. А., Бабакаев Д. В. Исследование воздействия ультразвуковых колебаний на границе раздела двух сред: газ–жидкость // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 1. С. 137–149. doi: 10.21685/2072-3059-2024-1-12

The influence of the material of the ultrasonic vibration concentrator on the amount of the amplitude of mechanical vibrations

A.A. Kazinskiy¹, D.V. Babakaev²

^{1,2}Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

¹aak@sstu.ru, ²demonmat11@mail.ru

Abstract. *Background.* The purpose of this article is to study the effect of ultrasonic vibrations on the surface of a liquid for subsequent use in electric arc surfacing processes. *Materials and methods.* To reach this goal, a duralumin ampoule-step concentrator was used at a

© Казинский А. А., Бабакаев Д. В., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

frequency of 21400 Hz. Measurements were carried out on a piezoelectric converter with a frequency of 19-24 kHz, as a liquid – industrial water. *Results.* The dependences of the height of the radiating surface of the ultrasonic vibration concentrator (USVC) on the surface of the liquid on which the impact and formation of the “hole” occur are determined; the parameters of the ultrasonic wave passing through the separation of two media water-air are determined; the dimensions of the depth of the “hole”, pressure and surface area at maximum exposure are determined. *Conclusions.* The results obtained can and will be used in the processes of electric arc surfacing of metals as a shaping factor.

Keywords: ultrasound, ultrasonic treatment, vibrations, wavelength, generator, metallurgy, mechanical engineering, surfacing

For citation: Kazinskiy A.A., Babakaev D.V. The influence of the material of the ultrasonic vibration concentrator on the amount of the amplitude of mechanical vibrations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(1):137–149. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-1-12

Введение

Ультразвуковые вибрации оказывают значительное влияние на различные материалы и их свойства, включая металлы и жидкости. Одно из применений ультразвуковых колебаний – при формообразовании расплава металла, где ультразвуковые колебания (УЗК) используются для формирования поверхности в процессе кристаллизации. УЗК могут быть использованы при формообразовании элементов при кристаллизации сталей [1]. В этой работе сосредоточимся на расчете воздействия ультразвуковых колебаний на поверхность жидкости с учетом возможности ее кристаллизации.

Основная часть

Изучение воздействия ультразвука на расплав металла представляет интерес для исследователей в области металлургии. Известно, что ультразвук (механическая вибрация с частотой более 20 кГц) оказывает влияние на свойства металлов. Сообщалось, что ультразвуковые волны могут приводить к значительному уменьшению размера металлических зерен, улучшению гомогенизации расплава и повышению вязкости. Использование ультразвуковой технологии имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами обработки, включая сокращение времени обработки, улучшение качества продукции и повышение энергоэффективности. Ультразвуковая обработка может быть выполнена на месте, что устраняет необходимость в дополнительных этапах обработки или оборудовании. Процессом также можно легко управлять, что позволяет точно манипулировать свойствами материала.

Обсудим воздействие ультразвука на расплав металла в качестве формообразующего элемента.

Ультразвуковые волноводы – это устройства, используемые для направления ультразвуковых волн. Они обычно изготавливаются из материалов с низким акустическим сопротивлением, таких как пластик или керамика, и предназначены для передачи ультразвука с минимальными потерями или искажениями. Ультразвуковые волноводы могут использоваться в различных областях применения, включая медицинскую визуализацию, промышленный неразрушающий контроль, подводную акустику и т.д. [2].

Существует несколько типов ультразвуковых волноводов, каждый из которых обладает уникальными свойствами и своей областью применения. Одним из типов является акустическая линза, которая используется в медицинской ультразвуковой визуализации для фокусировки ультразвукового луча и улучшения разрешения изображения. Акустические линзы обычно изготавливаются из полимеров или стекол с высокой акустической скоростью и имеют форму, позволяющую сходиться или расходиться ультразвуковому лучу [3].

Другим типом ультразвукового волновода является акустическая волноводная трубка, которая используется в промышленном неразрушающем контроле для направления ультразвуковых волн через образец для обнаружения дефектов. Волноводные трубки обычно изготавливаются из нержавеющей стали, титана или алюминия и предназначены для минимизации затухания волн и максимального отношения сигнал/шум.

Третьим типом ультразвукового волновода является волоконно-оптический акустический датчик, который использует оптические волокна для обнаружения ультразвуковых волн. Эти датчики обычно используются в системах мониторинга состояния конструкций, где они могут быть встроены в конструкции для обнаружения повреждений или дефектности [2].

В дополнение к этим типам ультразвуковых волноводов существует также несколько специализированных устройств, которые используют принципы построения волноводов для манипулирования ультразвуковыми волнами и управления ими. К ним относятся преобразователи, которые мы будем использовать в нашей работе.

Из всех известных концентраторов, ампульно-ступенчатый (рис. 1) обеспечивает высокое значение коэффициента усиления и равномерное распределение напряжений по длине [2, 4].

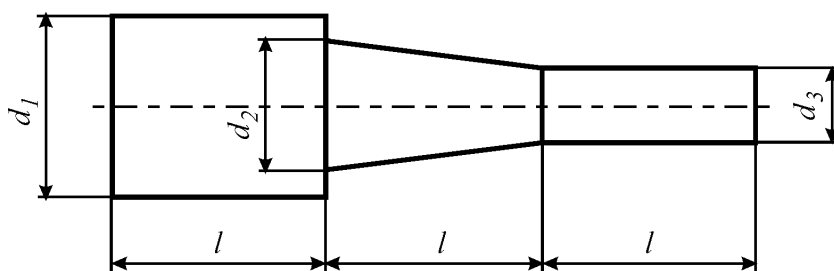


Рис. 1. Схема ампульно-ступенчатого концентратора

Длина участков такого концентратора определяется уравнениями:

$$l_1 = \lambda / 4; \quad l_2 = \lambda / \pi (\ln(D_2 / D_3))^{0,5}; \quad l_3 = 2\pi \cdot \text{arccctg}(\omega l_2 / c). \quad (1)$$

Коэффициент усиления концентратора:

$$K = K_1 K_2; \quad K_1 = (D_1 / D_2)^2; \quad K_2 = (1 + 4 \ln(D_2 / D_3))^{0,5}. \quad (2)$$

Текущие диаметры ампульного участка определяются по зависимости

$$D_x = D_2 \exp(-0,25(kx)^2), \quad (3)$$

где x – расстояние от начала ампульного участка.

При расчете крутильных концентраторов используют вместо площади сечения концентратора ($S = \pi D^2 / 4$) полярный момент инерции в этом сечении $J_p = \pi D^4 / 32$; вместо модуля упругости E – модуль упругости на кручение G ; вместо продольной скорости звука C – скорость волны кручения $C_{кр} = (G / \rho)^{0,5}$ [2].

В последние годы ультразвуковая технология привлекла значительное внимание как многообещающий метод обработки жидкостей и расплавов металлов. Современная идея процесса ультразвукового воздействия на жидкость или расплав металла предполагает использование высокочастотных звуковых волн для усиления перемешивания, улучшения кинетики реакции и контроля свойств материала.

Формообразование рабочих поверхностей в процессе кристаллизации расплава с помощью ультразвуковых волн – это процесс, который включает в себя использование высокочастотных звуковых волн для придания формы поверхности кристаллизующегося расплава металла [1]. Ультразвуковая технология обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами формования, включая повышенную эффективность, сокращение времени обработки и улучшение качества продукции.

Процесс ультразвукового формирования включает в себя использование преобразователя, который излучает высокочастотные звуковые волны, обычно с частотой от 20 до 100 кГц – в зависимости от области применения. Преобразователь находится над поверхностью расплавленного металла, и звуковые волны воздействуют на его поверхность. Ультразвуковая энергия может передаваться в расплавленный металл различными способами, включая прямое погружение и соноотрод над поверхностью [5]. В случае воздействия соноотрода над поверхностью различают следующие типы взаимодействия:

- 1) образование «лунки»;
- 2) выплески жидкости (расплава);
- 3) «всасывание» жидкости;
- 4) статичные явления.

Экспериментальные исследования

Измерение диаметра лунок воды под воздействием УЗК

Для проведения эксперимента использовалась холодная вода в сосуде с открытой поверхностью, $H_k = 12$ мм, относительно которой и производился замер высоты концентратора (H) на штангенциркуле. Метод измерения диаметра лунок – визуально относительно известного размера концентратора.

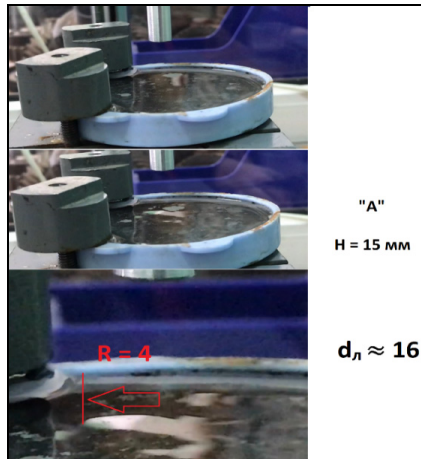
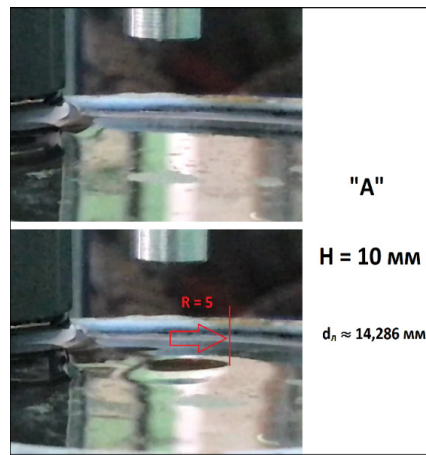
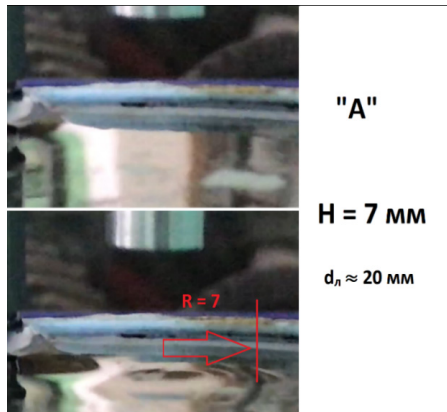
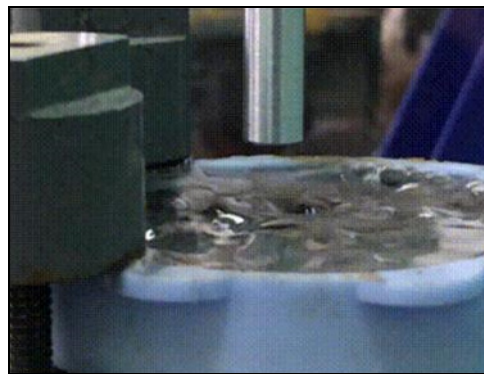
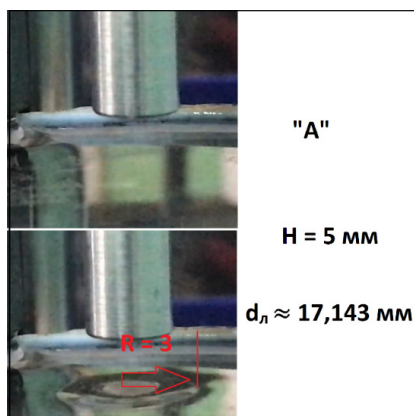
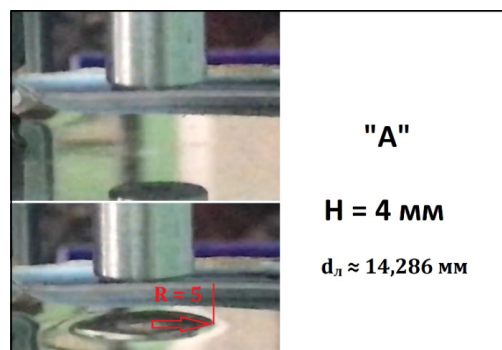
Геометрические размеры излучающих поверхностей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Диаметр излучающей поверхности, мм	Концентратор «А»	Концентратор «Б»	Концентратор «В»	Концентратор «Г»
	10	5	15	27 (стержень – 5 мм)

УЗК-концентратор «А»

Испытание проводилось на экспериментальной установке $f = 21,4$ кГц. Результаты измерений представлены на рис. 2–9 и в табл. 2.

Рис. 2. УЗК-концентратор «А», $H = 15$ ммРис. 3. УЗК-концентратор «А», $H = 10$ ммРис. 4. УЗК-концентратор «А», $H = 7$ ммРис. 5. УЗК-концентратор «А», $H = 6$ ммРис. 6. УЗК-концентратор «А», $H = 5$ ммРис. 7. УЗК-концентратор «А», $H = 4$ мм

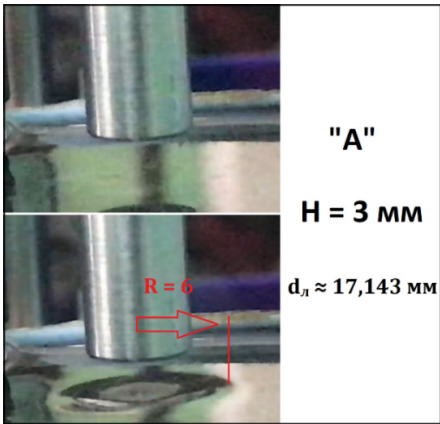


Рис. 8. УЗК-концентратор «А»,
 $H = 3$ мм



Рис. 9. УЗК-концентратор «А»,
 $H = 2$ мм, $H = 1$ мм

Таблица 2

H , мм	15	10	7	6	5	4	3	2	1
d_n , мм	16	14,286	20	–	17,143	14,286	17,143	–	–

Наглядно продемонстрировано, что стабильное воздействие на поверхность воды с образованием лунки происходит на высоте $H = 5\text{--}3$ мм. На расстоянии $H = 1\text{--}2$ мм происходит «всасывание» жидкости к поверхности УЗК-концентратора, что недопустимо при реальной наплавке материала в условиях высоких температур.

Примечание. Размер R указан относительно оптических измерений и не является реальной единицей измерения на рисунках.

УЗК-концентратор «Б»

Частота $f = 22,8$ кГц. Результаты измерений представлены на рис. 10–14 и в табл. 3.

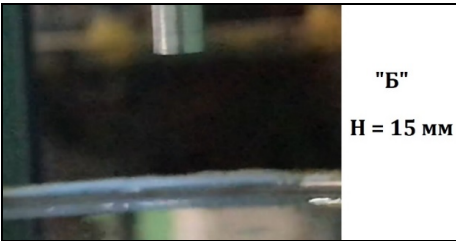


Рис. 10. УЗК-концентратор «Б»,
 $H = 15$ мм

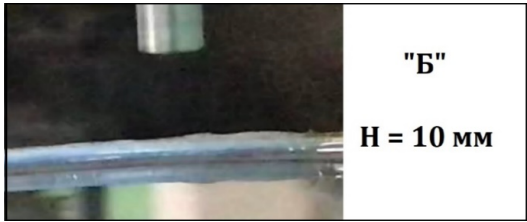


Рис. 11. УЗК-концентратор «Б»,
 $H = 10$ мм

Таблица 3

H , мм	15	10	5	3	2	1
d_n , мм	0	0	8,333	12	12,5	–

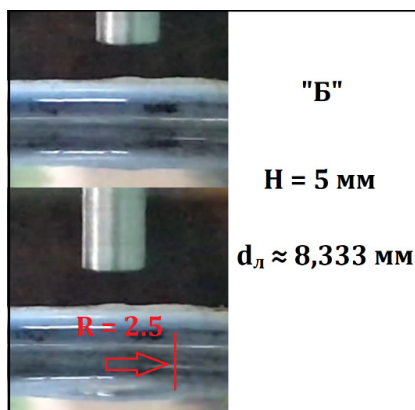


Рис. 12. УЗК-концентратор «Б»,
 $H = 5$ мм

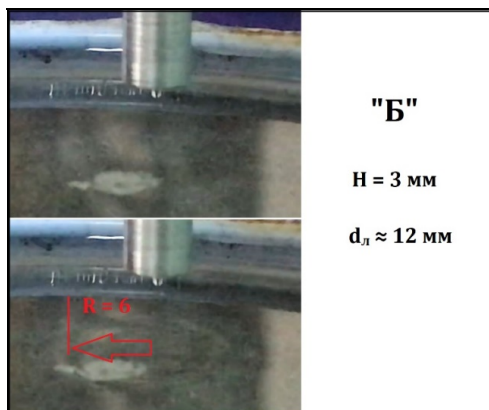


Рис. 13. УЗК-концентратор «Б»,
 $H = 3$ мм

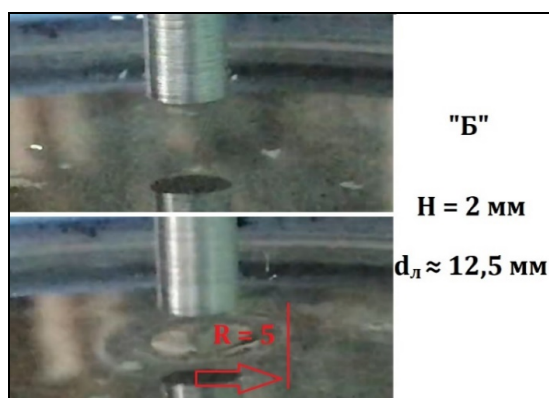


Рис. 14. УЗК-концентратор «Б», $H = 2$ мм

Воздействие на поверхность воды с образованием лунки происходит при $H = 5, 3$ и 2 мм. При воздействии на расстоянии $H = 1$ мм происходит «всасывание» жидкости, как представлено на рис. 9.

УЗК-концентратор «В» и «Г»

При воздействии на поверхность воды зафиксировать появление лунки не удалось.

Методология

Методика расчета: для расчета воздействия ультразвуковых колебаний на поверхность воды необходимо учитывать различные параметры и их взаимодействие. Испытания влияния УЗК на поверхность жидкости проводились при комнатной температуре 24 °С и стандартным атмосферным давлением. В качестве жидкости выбрана вода, поскольку ее жидкотекучесть сопоставима с аналогичным показателем для расплава стали.

Исходные данные:

- Материал преобразователя: дюралюминий.
- Амплитуда: 30 мкм.

- Частота УЗК: 21400 Гц.
- Площадь излучающей поверхности: 78,5 мм².
- Расстояние между излучателем и поверхностью воды: по результатам практических измерений, наиболее эффективный – УЗК-концентратор «А» с расстоянием до поверхности ≈ 3 мм.

• Вода: дистиллированная H₂O с незначительным количеством неорганических примесей (Mg, Ca, K).

1. Расчет акустического импеданса (акустический импеданс – комплексное акустическое сопротивление среды, представляющее собой отношение комплексных амплитуд звукового давления к колебательной объемной скорости) материала преобразователя (дюралюминий) [6, 7]:

$$Z = \rho \cdot c, \quad (4)$$

где ρ – плотность материала; c – скорость звука в материале.

Плотность дюралюминия примерно 2700 кг/м³, а скорость звука в дюралюминии примерно 6420 м/с.

Таким образом, получаем

$$Z = 2700 \cdot 6420 = 17,334 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}. \quad (5)$$

2. Расчет акустического импеданса воздуха:

$$Z_g = \rho_g \cdot c_g, \quad (6)$$

где Z_g – акустический импеданс воздуха; c_g – скорость звука в воздухе при 24 °C (343,21 м/с); ρ_g – плотность воздуха при 24 °C (1,223 кг/м³);

$$Z_g = \rho_g \cdot c_g = 1,223 \text{ кг/м}^3 \cdot 343,21 \text{ м/с} \approx 420 \text{ Па} \cdot \text{с/м}. \quad (7)$$

3. Расчет акустического импеданса воды:

$$Z_l = \rho_l \cdot c_l = 1,48 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}, \quad (8)$$

где c_l – скорость звука в воде при комнатной температуре (1481 м/с); ρ_l – плотность воды (1000 кг/м³).

4. Расчет длины волны. Длина волны – это расстояние между двумя последовательными точками, которые находятся в фазе друг с другом. В ультразвуковых волнах длина волны является важным параметром, влияющим на то, как волны распространяются в среде и взаимодействуют с материалами. Длина ультразвуковой волны определяется ее частотой и скоростью звука в среде, через которую она распространяется. В данном случае мы рассматриваем воду при комнатной температуре, которая является обычной средой для ультразвуковых испытаний. В данных условиях скорость звука в воде $c_l = 1497$ м/с. Данное значение можно найти в справочниках или онлайн-базах.

Формула расчета:

$$\lambda = \frac{c_l}{f}, \quad (9)$$

где f – частота ультразвука (в нашем случае 21,4 кГц);

$$\lambda = \frac{1497}{21400} = 0,07 \text{ м} = 70 \text{ мм}, \quad (10)$$

5. Амплитуда ультразвуковых колебаний представляет собой максимальное смещение материала из его исходного положения и обычно измеряется в микрометрах (мкм). Амплитуду ультразвуковых колебаний можно рассчитать по следующей формуле:

$$A = V_{\max} / 2\pi f, \quad (11)$$

где $V_{\max}$ – максимальное напряжение, подаваемое на ультразвуковой преобразователь; f – частота ультразвуковых колебаний;

$$V_{\max} = 2 \cdot 3,14 \cdot 21400 \cdot 0,00003 = 4,031. \quad (12)$$

6. Расчет давления амплитуды УЗК [9]:

$$P_0 = 2\pi \cdot \rho_g \cdot c_g \cdot A, \quad (13)$$

где ρ_g – плотность воздуха при 24 °С (1,223 кг/м³); c_g – скорость звука в воздухе при 24 °С (343 м/с);

$$P_0 = 2 \cdot 3,14 \cdot 343 \cdot 1,224 \cdot 0,00003 \cdot 21400 = 1666 \text{ Па}, \quad (14)$$

7. Интенсивность ультразвука:

$$I_0 = 2\pi^2 \cdot f^2 \cdot A^2 \cdot c \cdot \rho, \quad (15)$$

где c_g – скорость звука в воздухе (343 м/с); ρ_g – плотность воздуха при 24 °С (1,223 кг/м³);

$$I_0 = 2 \cdot 3,14^2 \cdot 21400^2 \cdot 0,00003^2 \cdot 343 \cdot 1,223 \approx 0,3409 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}. \quad (16)$$

8. Мощность акустического излучателя:

$$N = I_0 \cdot S, \quad (17)$$

I_0 – плотность ультразвука; S – площадь излучаемой поверхности (78,5 мм² = 0,785 см² = 0,0000785 м²);

$$N = 3409 \cdot 0,0000785 = 0,268 \text{ Вт}. \quad (18)$$

9. Интенсивность ультразвука на поверхности жидкости:

$$I_n = I_0 \cdot e^{-2\delta x}, \quad (19)$$

где I_0 – интенсивность ультразвука; δ – коэффициент затухания звука в среде (0,180 Дб/см) [6–8]; x – расстояние от поверхности излучателя до поверхности воздействия.

$$I_n = 0,3409 \cdot e^{-2 \cdot (0,180) \cdot 0,3} = 0,3409 \cdot 0,8976 = 0,306 \text{ Вт/см}^2. \quad (20)$$

10. Интенсивность ультразвука в жидкости на расстоянии l :

– при $l = 1$ мм:

$$I_l = I_n \cdot e^{-2\delta l}, \quad (21)$$

где δ – коэффициент затухания звука в среде (0,0024 Дб/см) [4–6];

$$I_{l_1} = 0,306 \cdot e^{-2 \cdot (0,0024) \cdot 0,1} = 0,3058 \text{ Вт/см}^2; \quad (22)$$

– при $l = 2$ мм:

$$I_{l_2} = 0,306 \cdot e^{-2 \cdot (0,0024) \cdot 0,2} = 0,3057 \text{ Вт/см}^2; \quad (23)$$

– при $l = 3$ мм:

$$I_{l_3} = 0,306 \cdot e^{-2 \cdot (0,0024) \cdot 0,3} = 0,3055 \text{ Вт/см}^2; \quad (24)$$

– при $l = 4$ мм:

$$I_{l_4} = 0,306 \cdot e^{-2 \cdot (0,0024) \cdot 0,4} = 0,3054 \text{ Вт/см}^2; \quad (25)$$

– при $l = 5$ мм:

$$I_{l_5} = 0,306 \cdot e^{-2 \cdot (0,0024) \cdot 0,5} = 0,3052 \text{ Вт/см}^2; \quad (26)$$

– при $l = 10$ мм:

$$I_{l_6} = 0,306 \cdot e^{-2 \cdot (0,0024) \cdot 1} = 0,3045 \text{ Вт/см}^2; \quad (27)$$

– при $l = 20$ мм:

$$I_{l_7} = 0,306 \cdot e^{-2 \cdot (0,0024) \cdot 2} = 0,3030 \text{ Вт/см}^2; \quad (28)$$

– при $l = 30$ мм:

$$I_{l_8} = 0,306 \cdot e^{-2 \cdot (0,0024) \cdot 3} = 0,3016 \text{ Вт/см}^2; \quad (29)$$

– при $l = 40$ мм:

$$I_{l_9} = 0,306 \cdot e^{-2 \cdot (0,0024) \cdot 4} = 0,3001 \text{ Вт/см}^2; \quad (30)$$

– при $l = 50$ мм:

$$I_{l_{10}} = 0,306 \cdot e^{-2 \cdot (0,0024) \cdot 5} = 0,2987 \text{ Вт/см}^2. \quad (31)$$

Для приближенного расчета глубины лунки необходимо выразить P_r – радиационное давление (давление звука) из формулы давления в жидкости на расстоянии от поверхности:

$$P_r = \rho gh. \quad (32)$$

Расчет величины радиационного давления на границах двух сред описан в исследовании [10].

Результаты для нашей системы приведены в табл. 4 и на рис. 15, 16.

Таблица 4

Среда	Амплитуда колебаний, A	P [Па]	H (м)
Вода–воздух	30 мкм	31,024	$2182 \cdot 10^{-6}$

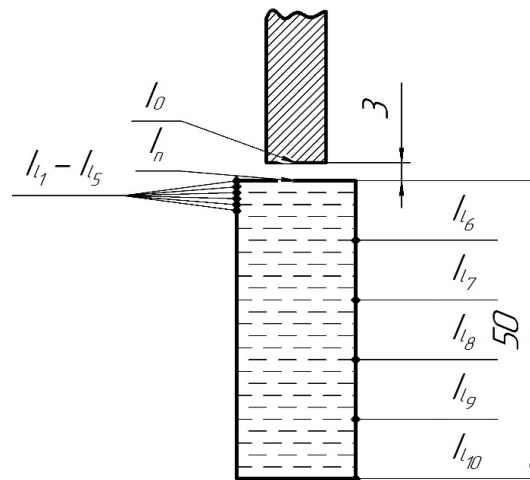


Рис. 15. Схема уровней интенсивностей ультразвука

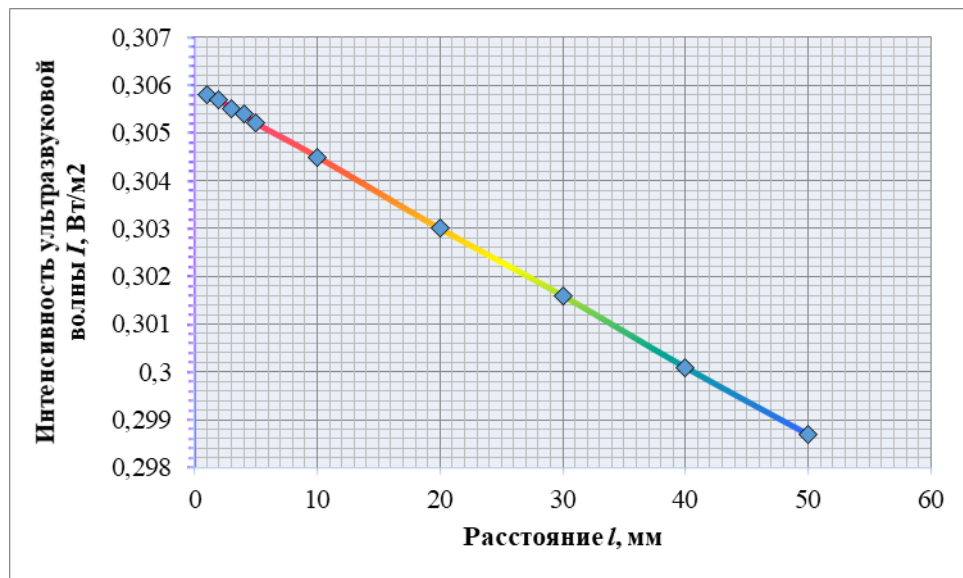


Рис. 16. График зависимости интенсивности ультразвука в воде

Теперь мы можем определить примерную площадь поверхности воздействия:

$$S = \pi R l \approx 238 \text{ мм}^2. \quad (33)$$

Отметим, что при измерении интенсивности волны через среднее по времени давление возможны ошибки, обусловленные динамическим давлением акустических потоков [11].

Заключение

Применение ультразвуковой технологии в жидкостях произвело революцию в различных отраслях промышленности, и ее потенциал для дальнейшего развития огромен. Использование ультразвука дает ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами обработки, включая повышение эффективности, сокращение времени обработки и улучшение качества продукта. Однако его применение требует тщательного контроля и специальных знаний, чтобы избежать нежелательного воздействия на материал или преобразователь.

УЗК-формообразование расплава в процессе кристаллизации в условиях наплавки обеспечит изменение геометрии шва и снижение припуска под механическую обработку.

Данная работа показала реальную картину воздействия УЗК на жидкость. По результатам исследования можно с уверенностью предполагать, что при использовании данной методики в условиях наплавки металлов процесс формообразования расплава металла при его кристаллизации будет обладать схожими результатами.

Список литературы

1. Патент 2490101 Российская Федерация. Способ дуговой сварки или наплавки / Казинский А. А., Казинский Н. А., Ещенко Р. Ю. Оpubл. 20.08.2013, Бюл. № 23. 8 с.
2. Бекренев Н. В., Дударева О. А., Лясникова А. В., Приходько С. В. Ультразвуковые процессы и аппараты в биологии и медицине. Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2005. 121 с.
3. Патент 2599404 Российская Федерация. Ультразвуковой датчик с акустической линзой / Кункель Г. А., Крикшанк Ч. К. Оpubл. 10.10.2016, Бюл. № 28.
4. Szabo T. L. Diagnostic ultrasound imaging: inside out // Academic Press Series in biomedical engineering. 2004. 549 p.
5. Вероман В. Ю., Аренков А. Б. Ультразвуковая обработка материалов. Л. : Машиностроение, 1971. 168 с.
6. Richmond C. H., Berggren M. J. Ultrasonic attenuation in air and water // Journal of the acoustical Society of America. 1953. Vol. 25, № 1. P. 35–40.
7. Thurston R. N., Mason W. P. The attenuation of ultrasonic waves in water and other liquids // Journal of the acoustical Society of America. 1950. Vol. 22, № 3. P. 320–325.
8. Landau L. D., Lifshitz E. M. Propagation of acoustic waves in gases and liquids // Course of Theoretical Physics. 1959. Vol. 6. P. 1–44.
9. Резников И. И., Федорова В. Н., Фаустов Е. В., Зубарев А. Р., Демидова А. К. Физические основы использования ультразвука в медицине. М. : РНИМУ имени Н. П. Пирогова, 2015. 97 с.
10. Казинский А. А. Кристаллизация расплава при сварке и наплавке в условиях управления теплоотводом, составом шва и формообразованием давлением ультразвукового поля. Саратов : СГТУ имени Ю. А. Гагарина, 2018. 204 с.
11. Красильков В. А., Крылов В. В. Введение в физическую акустику. М. : Наука, 1984. 403 с.

References

1. Patent 2490101 Russian Federation. *Sposob dugovoy svarki ili naplavki = Arc welding or surfacing method*. Kazinskiy A.A., Kazinskiy N.A., Eshchenko R.Yu. Publ. 20.08.2013, Bull. № 23. 8 p. (In Russ.)

2. Bekrenev N.V., Dudareva O.A., Lyasnikova A.V., Prikhod'ko S.V. *Ul'trazvukovye protsessy i apparaty v biologii i meditsine* = *Ultrasonic processes and devices in biology and medicine*. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2005:121. (In Russ.)
3. Patent 2599404 Russian Federation. *Ul'trazvukovoy datchik s akusticheskoy linzoy* = *Ultrasonic sensor with acoustic lens*. Kunkel' G.A., Krikshank Ch.K. Publ. 10.10.2016, Bull № 28. (In Russ.)
4. Szabo T.L. Diagnostic ultrasound imaging: inside out. *Academic Press Series in biomedical engineering*. 2004:549. (In Russ.)
5. Veroman V.Yu., Arenkov A.B. *Ul'trazvukovaya obrabotka materialov* = *Ultrasonic processing of materials*. Leningrad: Mashinostroenie, 1971:168. (In Russ.)
6. Richmond C.H., Berggren M.J. Ultrasonic attenuation in air and water. *Journal of the acoustical Society of America*. 1953;25(1):35–40.
7. Thurston R.N., Mason W.P. The attenuation of ultrasonic waves in water and other liquids. *Journal of the acoustical Society of America*. 1950;22(3):320–325.
8. Landau L.D., Lifshitz E.M. Propagation of acoustic waves in gases and liquids. *Course of Theoretical Physics*. 1959;6:1–44.
9. Reznikov I.I., Fedorova V.N., Faustov E.V., Zubarev A.R., Demidova A.K. *Fizicheskie osnovy ispol'zovaniya ul'trazvuka v meditsine* = *Physical basis of the use of ultrasound in medicine*. Moscow: RNIMU imeni N.P. Pirogova, 2015:97. (In Russ.)
10. Kazinskiy A.A. *Kristallizatsiya rasplava pri svarke i naplavke v usloviyakh upravleniya teplootvodom, sostavom shva i formoobrazovaniem davleniem ul'trazvukovogo polya* = *Crystallization of the melt during welding and surfacing under conditions of controlling heat removal, weld composition and shaping by ultrasonic field pressure*. Saratov: SGTU imeni Yu.A. Gagarina, 2018:204. (In Russ.)
11. Krasil'kov V.A., Krylov V.V. *Vvedenie v fizicheskuyu akustiku* = *Introduction to physical acoustics*. Moscow: Nauka, 1984:403. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Алексеевич Казинский

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой технической
механики и мехатроники, Саратовский
государственный университет имени
Гагарина Ю. А. (Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: aak@sstu.ru

Aleksey A. Kazinskiy

Candidate of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of technical mechanics and mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov (77 Politehnicheskaya street,
Saratov, Russia)

Дмитрий Владиславович Бабакаев

аспирант, Саратовский государственный
университет имени Гагарина Ю. А.
(Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: demonmat11@mail.ru

Dmitriy V. Babakaev

Postgraduate student, Yuri Gagarin State
Technical University of Saratov
(77 Politehnicheskaya street,
Saratov, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 14.06.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 11.10.2023

Принята к публикации / Accepted 19.01.2024