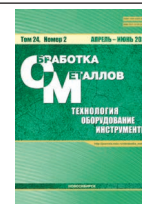




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)



Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Особенности наложения ультразвуковых колебаний в процессе сварки

Сергей Сундуков *

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский проспект, 64, г. Москва, 125319, Россия

 <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>,  sergey-lefmo@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 534-8 + 621.9.048.6 + 679.7.027.4

История статьи:

Поступила: 25 марта 2022
 Рецензирование: 13 мая 2022
 Принята к печати: 15 мая 2022
 Доступно онлайн: 15 июня 2022

Ключевые слова:

Ультразвук
 Сварка
 Колебания
 Кавитация
 Микроструктура
 Дендритная ликвация

Финансирование:

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00185, <https://rscf.ru/project/21-79-00185/>

Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Основной проблемой получения сварочных соединений является неравномерный нагрев зоны соединения, что приводит к различиям структуры и свойств между металлом шва и основным металлом. Одним из способов интенсификации процесса сварки является применение ультразвуковых колебаний. В результате анализа способов введения ультразвуковых колебаний в ванну расплава для проведения экспериментальных исследований выбран способ наложения колебаний на свариваемые элементы, так как данный способ позволяет оказывать воздействие на протяжении всего сварочного цикла от формирования ванны расплава до полной кристаллизации металла. **Методика исследований.** Проведение экспериментальных исследований осуществлялось на пластинах из углеродистой конструкционной стали Ст3 и алюминиевого деформируемого неупрочняемого сплава АМг4. В качестве источника колебаний применялась стержневая магнитострикционная колебательная система, торец которой жестко закреплялся на одной из свариваемых пластин. Для определения мест приложения источника колебаний и зоны сварки предложен метод расчета на основе равенства резонансных частот используемой колебательной системы и собственной частоты свариваемого элемента. Показано, что оптимальными местами для приложения колебаний и проведения сварки будут пучности колебаний, имеющие максимальную амплитуду. Получение швов осуществлялось методом полуавтоматической сварки в среде защитных газов. **Результаты и обсуждение.** Исследование микроструктуры полученных образцов показало значительное уменьшение доли дендритной ликвации. Изменения структуры являются следствием эффектов, возникающих в жидком расплаве, при введении ультразвуковых колебаний. Основными эффектами являются звуковое давление, кавитация и акустические течения. Возникающие эффекты оказывают влияние на кинетику процесса кристаллизации – увеличивается степень переохлаждения, увеличивается количество образуемых в единицу времени зародышей кристаллизации и уменьшается скорость их роста. Изменения структуры металла шва приводят к повышению качества сварного соединения, у которого снижаются сварочные деформации, увеличивается временное сопротивление и значительно повышается пластичность.

Для цитирования: Сундуков С.К. Особенности наложения ультразвуковых колебаний в процессе сварки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 50–66. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66.

Введение

Сварка является ключевым способом получения неразъемных соединений в различных отраслях машиностроения. Создание прочных связей между атомами или молекулами соединяемых поверхностей с использованием нагрева

или поверхностно-пластического деформирования обеспечивает получение качественного соединения как однородных и разнородных металлов и сплавов, так и их соединения с неметаллическими материалами [1].

Среди существующих видов сварки в настоящее время преобладает применение сварки плавлением. Основной проблемой при проведении данного вида сварки является неравномерный нагрев соединяемых деталей [2]. В результате сварной шов вследствие кристаллизации расплавленных и перемешанных основного и

*Адрес для переписки

Сундуков Сергей Константинович, к.т.н., доцент
 Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
 Ленинградский проспект, 64,
 125319, г. Москва, Россия
 Тел.: 8 (926) 369-19-70, e-mail: sergey-lefmo@yandex.ru

присадочного металла имеет литую структуру, вблизи границы сплавления находится зона частичного оплавления основного металла, далее следует зона термического влияния, которая характеризуется изменением структуры под влиянием температур, возникающих по мере удаления от зоны сварки [3]. Из-за различия структур переходы между рассмотренными зонами сопровождаются изменениями механических свойств, что особенно резко выражено при переходе через границу сплавления, которая в связи с этим является слабым местом сварного соединения.

Наряду с неравномерностью структуры проблемами сварки являются остаточные напряжения, сварочные деформации и возникновение пористости шва [4–7].

На данный момент для борьбы с рассмотренными недостатками применяются различные методы, которые можно классифицировать на применяющиеся в процессе проведения сварки и после нее. К методам, применяемым в процессе сварки, относятся уравнивание деформаций за счет рациональной последовательности наложения швов, создание обратных деформаций, жесткое закрепление свариваемых элементов. Методы, применяемые после сварки, это термообработка сварного шва, механическая правка конструкций, термическая правка, поверхностно-пластическое деформирование (ППД) [8].

Одним из эффективных способов минимизации последствий от указанных недостатков также является вибрационная обработка металла, находящегося в расплавленном состоянии [9, 10].

Данный способ воздействия, применительно к кристаллизующемуся металлу, был впервые предложен еще в 1950 году Д.К. Черновым для улучшения структуры слитков после литья. В результате вибраций повышается однородность слитков за счет диспергирования растущих дендритов [11, 12].

Для обеспечения эффективного воздействия на формирование структуры сварного шва, кристаллизация которого в разы быстрее, целесообразно применять высокочастотные вибрации ультразвуковой частоты, что позволит оказывать значительное воздействие за ограниченный временной интервал.

Существуют следующие способы применения ультразвуковых колебаний в процессе сварки:

- наложение колебаний на электрод [13];
- наложение колебаний на неплавящийся электрод [14];
- передача колебаний на корпус газовой горелки [15];
- сообщение колебаний свариваемым элементам конструкции [16];
- использование дуги как источника ультразвукового излучения [17].

Результаты исследований, проводимых по данным способам, фиксируют положительное влияние на процесс сварки и структуру шва. В частности, в зависимости от метода может увеличиваться глубина проплавления основного металла, снижаться пористость шва, улучшаться условия переноса капель расплавленного металла от электрода к детали, измельчаться микроструктура шва, снижаться доля дендритной ликвации в металле шва, повышение механических свойств [18–22]. Подробнее результаты можно найти в обзорных работах по данной тематике [23, 24].

Влияние ультразвуковой обработки на формирование структуры кристаллизующегося металла шва имеет явный положительный эффект.

Тем не менее данные технологии в настоящее время не нашли широкого применения в сварочных процессах по сравнению, например, с ультразвуковым ППД, который применяется для постобработки сварных швов [25–27]. Это можно объяснить рядом причин.

1. Необходимость использования дополнительного оборудования – ультразвукового генератора и колебательной системы.
2. Сложность организации процесса, связанная с согласованием режимов сварки и акустико-технологических параметров ультразвукового воздействия.
3. Предпочтительно использование более сложных и крупногабаритных магнитострикционных преобразователей, требующих принудительного охлаждения, так как пьезокерамические теряют эффективность при высоких температурах.
4. Повышение энергетических затрат на проведение сварочного процесса.

Несмотря на возникающие сложности, возможности применения ультразвуковых колеба-

ний обуславливают интерес к развитию данных технологий.

В данной работе приведены результаты исследований по наложению ультразвуковых колебаний на свариваемые элементы, выбору места приложения источника колебаний и зоны проведения сварки.

Методика исследований

Материалы

Для проведения исследований выбраны материалы, широко применяющиеся в сварочном производстве: углеродистая конструкционная сталь обыкновенного качества Ст3 и деформируемый термически неупрочняемый алюминиево-магниевый сплав АМг4.

Пластины для сварки вырезались из листовой заготовки толщиной 4 мм.

В качестве присадочного материала применялись сварочные проволоки, подходящие для сварки выбранных материалов: для Ст3 – про-

лока Св08Х2ГС, для АМг4 – проволока ER5356. Диаметр проволоки составлял 0,8 мм.

Химические составы материалов и проволоки приведены в табл. 1 и 2.

Экспериментальная схема и оборудование

Исследования проводились в два этапа по схеме, представленной на рис. 1.

Первый этап заключался в наплавке шва на пластины толщиной 4 мм и шириной 30 мм и последующем определении изменений в структуре зоны сварки. На втором этапе производилась сварка двух пластин и проводились испытания соединения на растяжение. Длина пластин определялась на основе распределения по ним колебаний (рассмотрено ниже).

Для возбуждения колебаний в зоне сварки к пластине 1 через резьбовое соединение 4 присоединялась ультразвуковая стержневая колебательная система, состоящая из магнитострикционного преобразователя 6 и волновода 5, выполненного из титанового сплава. Диаметр

Таблица 1

Table 1

Химический состав сплава АМг4 и проволоки ER5356, масс. %

Chemical composition of AMg4 alloy and ER5356 wire, mass. %

Сплав АМг4									
Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Be	Mg	Zn	Al
<0,4	<0,4	0,5...0,8	0,05...0,25	0,02...0,1	<0,05	0,0002...0,005	3,8...4,8	<0,2	Остальное
Сварочная проволока ER5356									
<0,1	<0,25	0,55	0,12	0,12	–	–	5,0	–	Остальное

Таблица 2

Table 2

Химический состав стали Ст3 и проволоки Св08Х2ГС, масс. %

Chemical composition of steel St3 and wire Sv08Kh2GS, mass. %

Сталь Ст3									
C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	S	P	As	Fe
0,14...0,22	0,15...0,3	0,4...0,65	<0,3	<0,3	<0,3	<0,05	<0,04	<0,08	Остальное
Сварочная проволока Св08Х2ГС									
<0,1	0,6...0,85	1,4...1,7	<0,025	1,8...2,2	<0,025	<0,015	<0,013	–	Остальное

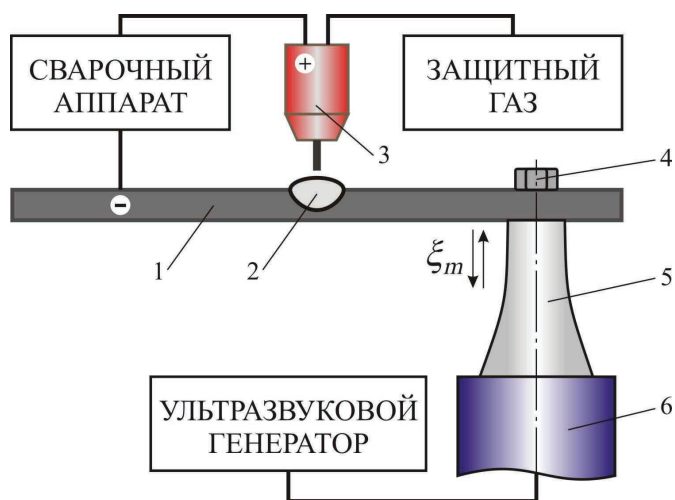


Рис. 1. Схема проведения эксперимента:

1 – пластина; 2 – сварной шов; 3 – газовая горелка; 4 – болт; 5 – волновод; 6 – магнитострикционный преобразователь

Fig. 1. Design of experiment:

1 – plate; 2 – weld; 3 – welding torch; 4 – bolt; 5 – waveguide; 6 – magnetostrictive transducer

волновода соответствует ширине пластины и составляет 30 мм.

Для питания колебательной системы использовался ультразвуковой генератор УЗГ 2,0/22 с функциями автоматической подстройки частоты и амплитуды. Данные функции позволяют поддерживать стабильный режим колебаний в условиях повышения температуры и изменения объема пластины, возникающих при сварке.

Перед началом сварки поверхность пластины обрабатывалась дисковой металлической щеткой и обезжиривалась. Далее включался ультразвук и производилась сварка. Выключение ультразвука осуществлялось при остывании сварного соединения до 100 °С, чтобы все фазовые превращения происходили под действием колебаний.

Получение сварного шва производилось методом полуавтоматической сварки в среде защитных газов. В табл. 3 приведены оборудование и режимы сварки для Ст3 и АМг4.

Одним из самых важных моментов при проведении сварки с наложением колебаний является определение места их приложения к пластине и места сварки, в котором должно обеспечиваться стабильное ультразвуковое воздействие.

Методика определения места приложения колебаний и наложения шва на примере АМг4

В применяемой схеме наложения ультразвуковых колебаний при нормально ориентированном расположении колебательной системы к свариваемой пластине она является излучателем изгибных колебаний.

С точки зрения технологического применения оптимальным местом приложения колебаний будет являться одна из пучностей собственных колебаний пластины. Тогда задача сводится к согласованию резонансных частот колебательной системы и пластины.

Таблица 3

Table 3

Оборудование и режимы сварки Equipment and welding modes

Параметры сварки	Материал	
	Ст3	АМг4
Тип сварочного аппарата	MIG 235	MIG 215AL PULSE
Сила сварочного тока, $I_{св}$, А	60	125
Полярность	Обратная	Обратная
Напряжение, $U_{св}$, В	28	22
Скорость подачи проволоки, $V_{пр}$, м/мин	1,9	15,2
Защитный газ	Углекислый газ	Аргон
Расход защитного газа, л/мин	8	17,5
Время наплавки, с	12	2

Так как при проведении исследований используется серийная ультразвуковая колебательная система, имеющая определенную резонансную частоту f , то расчет произведем исходя из необходимости обеспечения равной резонансной частоты пластины f_{π} .

Амплитудно-частотная характеристика колебательной системы (рис. 2) снималась на торце волновода индикатором часового типа. Резонансная частота составляет $f = 21\,800$ Гц.

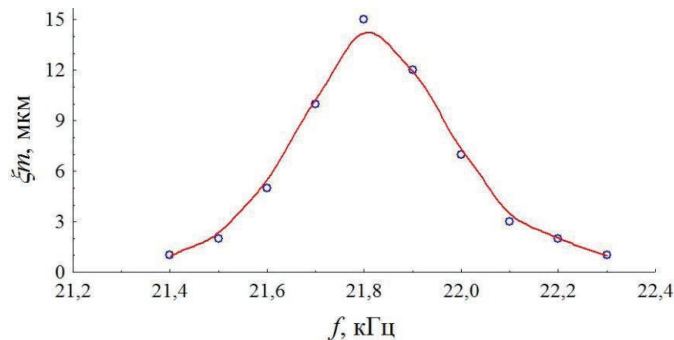


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика ПМС-2,0-22

Fig. 2. Amplitude-frequency characteristic PMS-2.0-22

Дифференциальное уравнение изгибных колебаний пластины имеет вид [28]

$$\frac{d^4 \xi_m}{dx^4} - \frac{\omega_0^2}{c\chi^2} \xi_m + \frac{\omega_0^2}{c^2} \frac{d^2 \xi_m}{dx^2} = 0,$$

где ξ_m – амплитуда колебаний; ω_0 – круговая частота собственных колебаний; x – координата пластины в продольном направлении; c – скорость распространения продольных колебаний; χ – радиус инерции поперечного сечения,

$$\chi = \sqrt{I / S},$$

где I – момент инерции относительно оси, перпендикулярной плоскости колебаний; S – площадь поперечного сечения.

Для используемой пластины прямоугольного сечения (30×4 мм):

$$\chi = \sqrt{\frac{bh^3}{12}} / bh = 0,0012.$$

При соблюдении условия $\frac{\chi^2}{l^2} \leq 0,05$ (для рассматриваемого случая 0,0006) можно пренебречь

инерцией вращения, тогда уравнение установившихся колебаний принимает следующий вид:

$$\frac{d^4 \xi_m}{dx^4} - \frac{\omega_0^2}{c\chi^2} \xi_m = 0.$$

Решение данного уравнения получено А.Н. Крыловым (1936 г.):

$$\xi_m = C_1 A_x + C_2 B_x + C_3 C_x + C_4 D_x,$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий:

$$A_x = (\operatorname{ch}(kx) + \cos(kx)) / 2;$$

$$B_x = (\operatorname{sh}(kx) + \sin(kx)) / 2;$$

$$C_x = (\operatorname{ch}(kx) - \cos(kx)) / 2;$$

$$D_x = (\operatorname{sh}(kx) - \sin(kx)) / 2.$$

Для определения постоянных необходимо использовать выражения для производных:

$$\xi'_m = k(C_1 D_x + C_2 A_x + C_3 B_x + C_4 C_x),$$

$$\xi''_m = k^2(C_1 C_x + C_2 D_x + C_3 A_x + C_4 B_x),$$

$$\xi'''_m = k^3(C_1 B_x + C_2 C_x + C_3 D_x + C_4 A_x).$$

Здесь коэффициент k – волновой множитель, зависящий от свойств материала и частоты колебаний:

$$k = 4 \sqrt{\frac{m\omega^2}{EI}}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга материала волновода (для АМг4 $E = 71$ ГПа); m – масса волновода на единицу длины (для рассматриваемого случая $m = bhl\rho = 0,03 \cdot 0,004 \cdot 1 \cdot 2670 = 0,320$ кг/м), круговая частота $\omega = 2\pi f_{\pi}$, где f_{π} – резонансная частота собственных колебаний пластины.

Для определения характера распространения колебаний в зависимости от условий закрепления пластины воспользуемся алгоритмом, описанным Б.В. Булгаковым (1954 г.). По данному алгоритму граничные условия записываются в развернутом виде, что приводит к однородным уравнениям относительно постоянных. Для того чтобы постоянные не равнялись нулю, нужно, чтобы определитель, составленный из коэффициентов системы уравнений, был равен нулю.

Расчетная схема показана на рис. 3.

Необходимо выбрать место приложения ультразвуковых колебаний x , чтобы в зоне сварки $l_{\text{св}}$

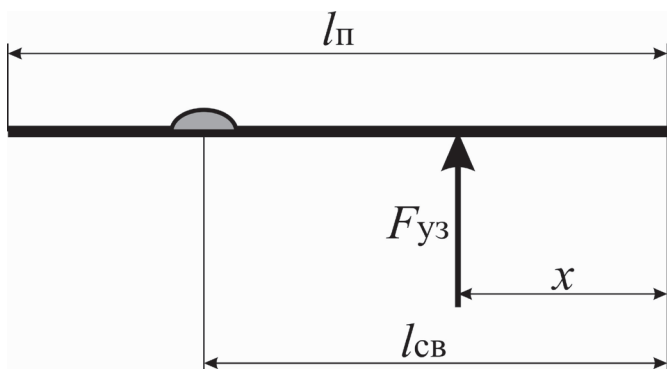


Рис. 3. Схема расчета изгибных колебаний:

l_{Π} – длина пластины; x – место приложения ультразвуковых колебаний; $l_{\text{св}}$ – место наложения шва

Fig. 3. Scheme for calculating bending vibrations:

l_{Π} is the length of the plate; x is the place of ultrasonic vibrations application; l_{weld} is the place where the weld is applied

был максимум амплитуды колебаний. Для данных условий закрепления (свободные концы пластины с двух сторон): для $l_{\text{уз}} = 0$ и для $l_{\text{уз}} = l_{\Pi}$: $\xi_m'' = 0$ и $\xi_m''' = 0$, постоянные $C_3 = 0$ и $C_4 = 0$. Подставляя данные значения в решение уравнения колебаний, получим частотное уравнение:

$$\text{ch}(kl_{\Pi}) \cos(kl_{\Pi}) = 1.$$

Корни данного уравнения:

$$kl_{\Pi} = \pi n + \pi / 2, \quad (2)$$

где $n = 1, 2, 3 \dots$

Выразим из уравнения (2) коэффициент k и приравняем к уравнению (1):

$$\frac{\pi n + \pi / 2}{l_{\Pi}} = \sqrt[4]{\frac{m\omega^2}{EI}}.$$

С учетом того, что $\omega = 2\pi f_{\Pi}$, получим выражение для определения длины пластины в зависимости от частоты колебаний:

$$l_{\Pi} = \frac{\pi n + \pi / 2}{\sqrt[4]{\frac{m(2\pi f_{\Pi})^2}{EI}}}. \quad (3)$$

Произведем расчет из условия $f_{\Pi} \approx 21\,800$ Гц при различном значении n . Расчетные значения занесем в табл. 4.

Таким образом, размер пластины, обеспечивающий колебания на резонансной частоте 21 800 Гц, соответствует 7-й моде колебаний и составляет 155 мм (данный размер выбран для проведения исследований).

Таблица 4

Table 4

Зависимость резонансной длины пластины от n при частоте 21 800 Гц
Dependence of the resonant length of the plate on n at frequency of 21 800 Hz

n	1	2	3	4	5	6	7	8
l_{Π}	0,031	0,052	0,072	0,093	0,114	0,134	0,155	0,176
k	151,6							

Коэффициент k позволяет связать частоту и скорость распространения изгибных колебаний c_{Π} :

$$k = \frac{\omega}{c_{\Pi}},$$

где

$$c_{\Pi} = \sqrt{2\pi f \chi c} = 904,5 \text{ м/с},$$

$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – стержневая скорость продольных колебаний (для АМг4 5157 м/с).

Зная скорость и частоту, можно найти длину изгибной волны:

$$\lambda_{\Pi} = \frac{c_{\Pi}}{f_{\Pi}} = 41,3 \text{ мм}. \quad (4)$$

Таким образом, при сообщении ультразвуковых колебаний в длину пластины укладывается $l_{\Pi} / l_{\Pi} = 3,75$ изгибных волны. Учитывая, что края пластины свободны и на них не может быть нуля колебаний, построим график распределения колебаний по пластине (рис. 4).

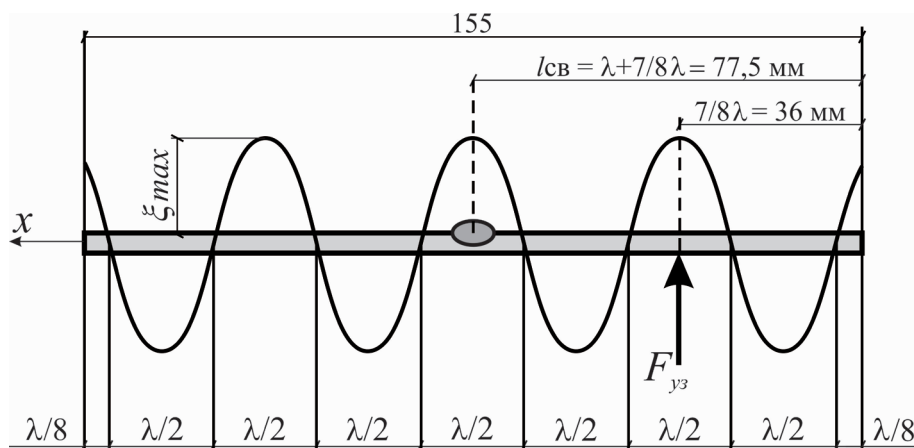


Рис. 4. Распределение колебаний по свариваемой пластине

Fig. 4. Distribution of vibrations over the welded plate

Узлы колебаний, где амплитуда равна нулю, располагаются на расстоянии длины полуволны со смещением на одну восьмую длины волны $x_1 = (\lambda_{и}/2)i + \lambda_{и}/8$ ($i = 0, 1, 2, \dots$), а пучности колебаний с максимальной амплитудой на расстоянии четверти волны от узлов $x_2 = (\lambda_{и}/2)i + \lambda_{и}/8 - \lambda_{и}/4$. Места расположения сварочного шва и приложения ультразвуковых колебаний должны выбираться в соответствии с расстоянием x_2 .

Таким образом, для проведения экспериментальных исследований торец колебательной системы закреплялся на расстоянии $7/8\lambda_{и}$, что соответствует 36 мм, а место наложения шва $15/8\lambda_{и}$, что соответствует 77,5 мм, и находится посередине пластины.

В результате аналогичных расчетов для стали Ст3 выбрана длина пластины 130 мм, место закрепления колебательной системы 30 мм, место наложения шва 65 мм.

При проведении второй стадии исследований – сварки двух пластин и определении механических свойств соединения использовались такие же размеры. Пластина разрезалась посередине, далее части пластины подваривались по краям таким образом, что между пластинами оставалось расстояние 0,5 мм, разделка кромок не осуществлялась. При такой подготовке образцов передача колебаний ко второй пластине осуществляется через сварочные точки по краям и характер распределения колебаний при этом не изменяется. Время сварки составляло: для АМг4 – 3,5 с, для Ст3 – 16 с.

Определение структуры и свойств

После проведения наплавки из пластин вырезались образцы для дальнейшего исследования поверхности. Выборка образцов осуществлялась так, что исследуемой поверхностью являлось поперечное сечение, находящееся в середине шва. У полученных образцов исследовались микро- и субмикроструктура.

Подготовка образцов для анализа заключалась в заливке их протакрилом, после остывания которого подготавливались шлифы.

Микроструктура изучалась на металлографическом микроскопе МЕТАМ РВ-22 (АО «ЛОМО», Санкт-Петербург).

После сварки двух пластин у полученных соединений измерялся прогиб, вызванный усадкой металла. Далее соединения, соответствующие по размеру образцам типа XII в соответствии с ГОСТ 6996–66, испытывались на растяжение.

Для измерения прогиба использовался контурграф модели 220 (АО «Протон», Зеленоград), предназначенный для измерения геометрических параметров изделий различной формы. Действие прибора основано на принципе ощупывания неровностей измеряемой поверхности щупом с индуктивным датчиком путем перемещения щупа по измеряемой поверхности и последующего преобразования возникающих при этом механических колебаний щупа в цифровой сигнал. Далее необходимые измерения осуществляются в программе обработки профиля поверхности.

Испытания образцов на растяжение проводились на разрывной машине УТС-110М-50-0У, предназначенной для измерения нормированного значения меры силы при проведении механических испытаний в режиме растяжения или сжатия образцов конструкционных материалов.

Результаты и их обсуждение

Влияние параметров ультразвука на характер колебаний

Для оценки характера колебаний, возникающих при реализации выбранной схемы эксперимента, производилась визуализация распределения колебаний по пластине путем нанесения на ее поверхность порошка гидрокарбоната натрия (рис. 5).

При включении ультразвука порошок распределяется по пластине в соответствии с амплитудой колебаний: вытесняется из зоны пучностей и скапливается в узлах.

Резонансная частота составила $f = 21\ 100$ Гц, что на 700 Гц меньше расчетной (погрешность 3,2 %). Это объясняется механическими потерями при преобразовании продольных колебаний

источника в изгибные колебания излучателя (пластины) и тем, что расчет производился при точечном приложении колебаний, а в исследованиях площадь контакта поверхностей равна площади торца волновода, имеющего диаметр 30 мм.

Так как частота постоянна, режимы обработки определялись изменением амплитуды колебаний.

Сравнивались три режима ультразвуковых колебаний: низкоамплитудный ($\xi_m = 3 \dots 4$ мкм); промежуточный ($\xi_m = 9 \dots 10$ мкм) и высокоамплитудный ($\xi_m = 13 \dots 15$ мкм).

Анализ характера распределения колебаний показывает, что зоны максимумов и минимумов амплитуды неоднородны по форме, что связано со сложным характером колебаний пластины – помимо изгибных колебаний в продольном направлении (для которых производился расчет) присутствуют поперечные изгибные колебания, которые приводят к некоторому закруглению узлов колебаний, что особенно хорошо заметно в наиболее удаленных от крепления узлах на низкоамплитудном и промежуточном режимах. Также присутствуют продольные колебания, передающиеся от волновода, доля которых

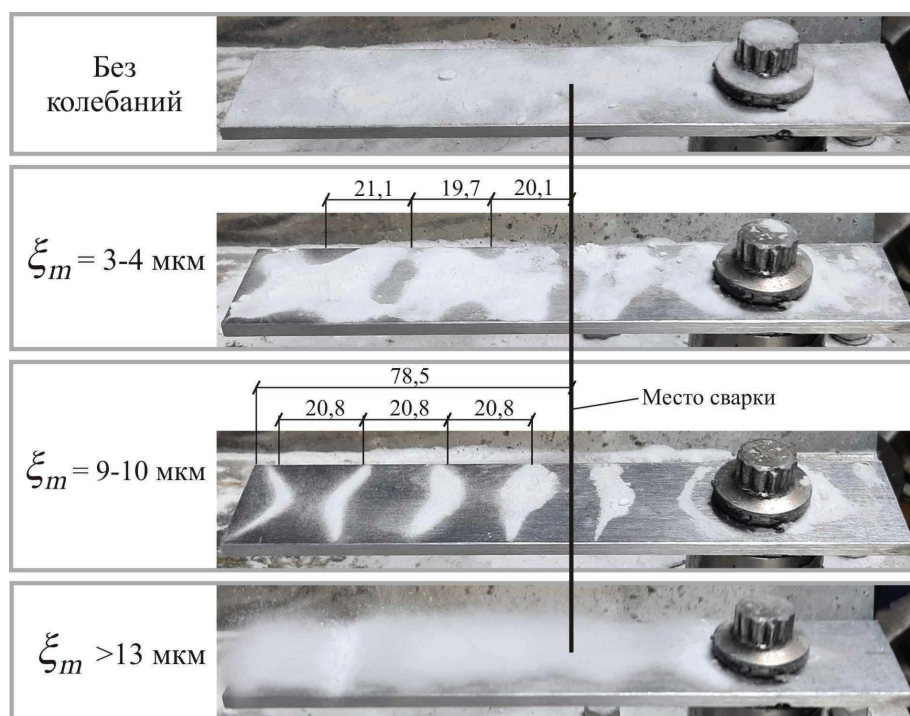


Рис. 5. Визуализация распределения колебаний по пластине АМг4

Fig. 5. Visualization of oscillation propagation along a plate made of AMg4 alloy

увеличивается при повышении мощности. Так, на высокоамплитудном режиме продольные колебания преобладают над остальными, что в совокупности с большой амплитудой приводит к полному ссыпанию порошка с пластины (на рис. 6 представлены первые мгновения данного процесса).

При мощностях 200 и 350 Вт преобладают изгибные колебания и на пластинах хорошо определяются зоны пучности и узлов колебаний.

На низкоамплитудном режиме они менее выражены, так как вследствие низких амплитуд порошок меньше вытесняется из зоны колебаний и соответственно ширина узлов значительно больше. Поэтому при измерении полутолщины ее длина колеблется от 19,7 до 21,1 мм, при этом колебания неравномерны по ширине пластины, например на участке, где отмечена полутолщина 19,7 мм, с одной стороны пучность располагается в центральной зоне, а с другой по краям.

На промежуточном режиме полученная картина в значительной степени соответствует расчетным показателям. Зоны колебаний ярко выражены, расстояние между узлами колебаний практически одинаково по длине пластины и составляет 20,8 мм. Если произвести расчет по формуле (4) для частоты 21 100 Гц, то длина полутолщины составит $\lambda_n/2 = 21$ мм, погрешность в этом случае 1 %. Полученная разница в 200 Гц не играет существенной роли при выборе места сварки, так как на данном режиме ширина зоны пучности больше узлов и смещение на 0,2 мм не повлияет на характер колебаний в зоне сварки.

На высокоамплитудном режиме вследствие преобладания радиальной составляющей колебания происходят по всей длине пластины. При этом наблюдаются зоны максимума и минимума колебаний, которые по расположению коррелируют с другими режимами. На фотографии пластины (рис. 5) на ближнем торце видно, что порошок ссыпается с зоны максимума амплитуды быстрее, чем с зоны минимума.

Оптимальным местом сварки (на рис. 5 показано жирной линией) для низкоамплитудного и промежуточного режима является расстояние 78,5 мм от левого края пластины, что на 1 мм больше расчетной длины $l_{св} = 77,5$ мм. На высокоамплитудном режиме сварку можно проводить в любом месте.

Дальнейшие исследования проводились на промежуточном режиме, так как по сравнению с другими он позволяет получить стабильное распределение колебаний по пластине. Результаты предварительных экспериментов показали также лучшее воздействие на структуру шва. При низкоамплитудном режиме эффекта практически не наблюдается, а на высокоамплитудном возможно сильное разбрызгивание капель жидкого металла (ультразвуковое распыление) и появление значительного количества пор.

Изменения микроструктуры

В результате наложения ультразвуковых колебаний в процессе сварки приводят к изменениям микроструктуры сварного шва (рис. 6 и 7).

Для Ст3 эффект от действия колебаний состоит в значительном уменьшении доли дендритной ликвации, а для АМг4 в уменьшении высоты зоны дендритов. Разный характер воздействия обусловлен более длительным временем кристаллизации стали по сравнению с алюминием, что позволяет колебаниям осуществить большее воздействие.

Изменения микроструктур являются следствием действия эффектов, возникающих в расплавленном металле, при введении в него ультразвуковых колебаний. К явлениям, которые оказывают значительное влияние на кинетику процесса кристаллизации, относятся звуковое давление, кавитация и акустические течения.

Введение в систему колебаний увеличивает свободную энергию системы, которая характеризует переход компонентов расплава из жидкой фазы в твердую [28]. Общее изменение энергии Гиббса $\Delta G_{общ}$ в этом случае:

$$\Delta G_{общ} = S\sigma - V\Delta G + E_{уз},$$

где S – суммарная площадь поверхности кристаллов; σ – поверхностное натяжение между жидким металлом и кристаллом; V – объем зародыша; ΔG – разность энергий Гиббса металла в жидком и твердом состоянии; $E_{уз}$ – энергия введенных ультразвуковых колебаний.

Под $E_{уз}$ следует понимать кинетическую энергию, сообщаемую образуемым зародышам кристаллизации:

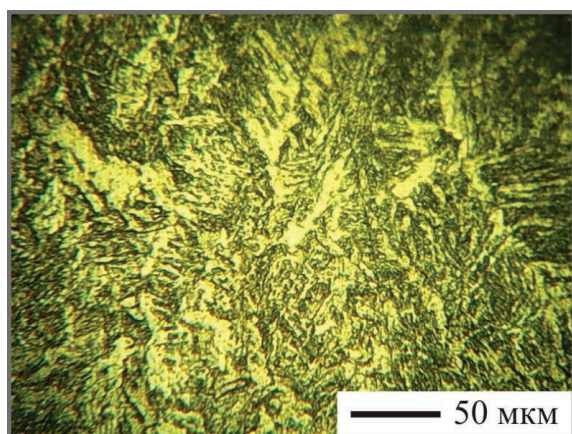
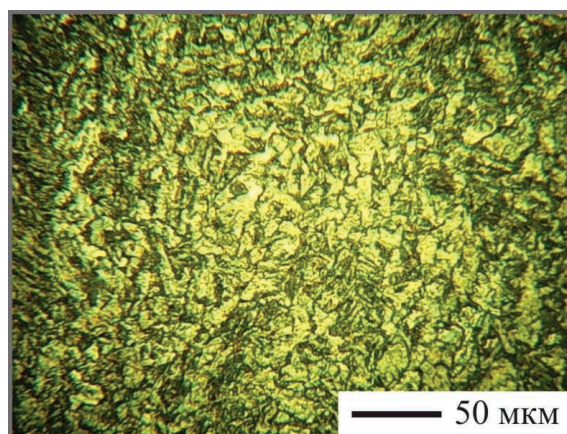
*a**б*

Рис. 6. Микроструктура металла шва стали Ст3, полученного:

a – без колебаний; *б* – с колебаниями

Fig. 6. Microstructures of the weld metal of steel St3:

a – without vibrations applied; *б* – with vibrations applied

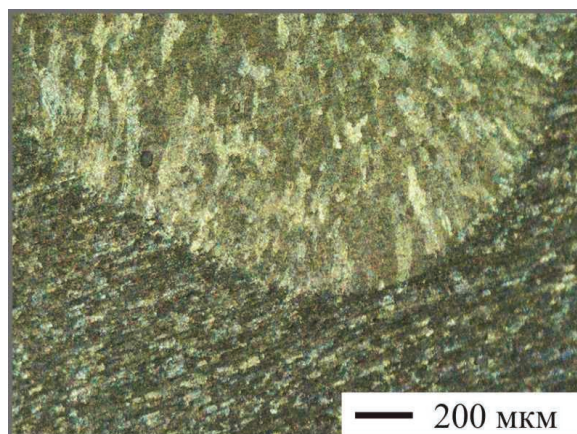
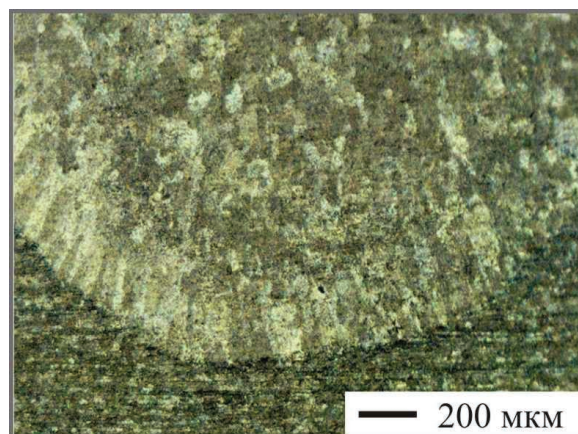
*a**б*

Рис. 7. Микроструктура зоны сплавления сплава АМг4, полученной:

a – без колебаний; *б* – с колебаниями

Fig. 7. Microstructures of the fusion zone of the AMg4 alloy:

a – without vibrations applied; *б* – with vibrations applied

$$E_{yz} = \frac{m(2\pi f)^2 \xi_m^2}{2},$$

где m – масса зародыша; f – частота колебаний; ξ_m – амплитуда колебаний.

В результате изменения энергетического баланса увеличивается работа, требуемая для образования устойчивого зародыша, что приводит к уменьшению температуры начала кристаллизации.

Наибольший эффект в формировании структуры при наложении колебаний имеет кавита-

ция, заключающаяся в образовании, росте и последующем схлопывании пузырьков, что сопровождается повышением давлений и температур, мгновенные значения которых могут достигать нескольких сотен мегапаскалей (МПа) и нескольких тысяч градусов [29–37].

Возникающие при этом ударные волны и кумулятивные струи осуществляют диспергирование образованных зародышей. В первую очередь осуществляется дробление дендритов, так как они начинают расти первыми, и их рост происходит от границы сплавления, которая в данном

случае является поверхностью, излучающей колебания. Диспергированные части дендритов будут являться новыми зародышами кристаллизации, которые будут расти и затем дробиться под действием кавитации.

Акустические течения, возникающие в обрабатываемом расплаве, улучшают тепло- и массоперенос в расплаве до начала процесса кристаллизации. После дробления дендритов течения осуществляют распределение новых зародышей по ванне расплава, часть из которых попадет в зону активной кавитации и диспергируется еще раз.

За счет того, что все компоненты расплава, находящиеся как в жидкой, так и в твердой фазе, находятся в состоянии движения под действием вибраций, акустических течений, ударных волн и кумулятивных струй, создаются более сложные условия для присоединения атомов жидкой фазы к зародышам.

Схематично процесс кристаллизации сварного шва при наложении колебаний можно представить в виде, представленном на рис. 8.

Зона I: при охлаждении металла, кристаллизующегося без колебаний, до температуры ликвидуса $T_{лик}$ начинают расти первые дендриты. При наложении колебаний вследствие увеличения энергии Гиббса образование зародышей еще не началось. Действие кавитации и акустических потоков способствует равномерному перемешиванию компонентов расплава, находящихся в жидкой фазе.

Зона II: при дальнейшем охлаждении без колебаний продолжается рост дендритов и происходит образование новых. С колебаниями начинают образовываться дендриты. Вследствие особенностей распределения кавитационных пузырьков по озвучиваемому объему они в основном скапливаются в местах наибольших неровностей, которыми здесь является зона дендритов.

Зона III: без колебаний продолжается рост дендритов и начинается образование зародышей в остальном объеме ванны расплава. Схлопывание кавитационных пузырьков приводит к диспергированию дендритов, обломки которых переносятся акустическими течениями в глубь шва. Данные обломки являются зародышами кристаллизации и одновременно областями, притягивающими кавитационные пузырьки.

Зона IV: без колебаний продолжается рост дендритов, при этом растут не дендритные зародыши, и образуются новые. С ультразвуком вследствие охлаждения и связанного с ним увеличения вязкости расплава происходит снижение кавитационной активности, уменьшается количество пузырьков. Начиная расти дендриты, их обломки и образуются новые зародыши. При этом схлопывание пузырьков продолжает оказывать диспергирующее действие.

Далее: при продолжении роста дендритов и остальных зародышей без колебаний формируется окончательная структура шва. Действие

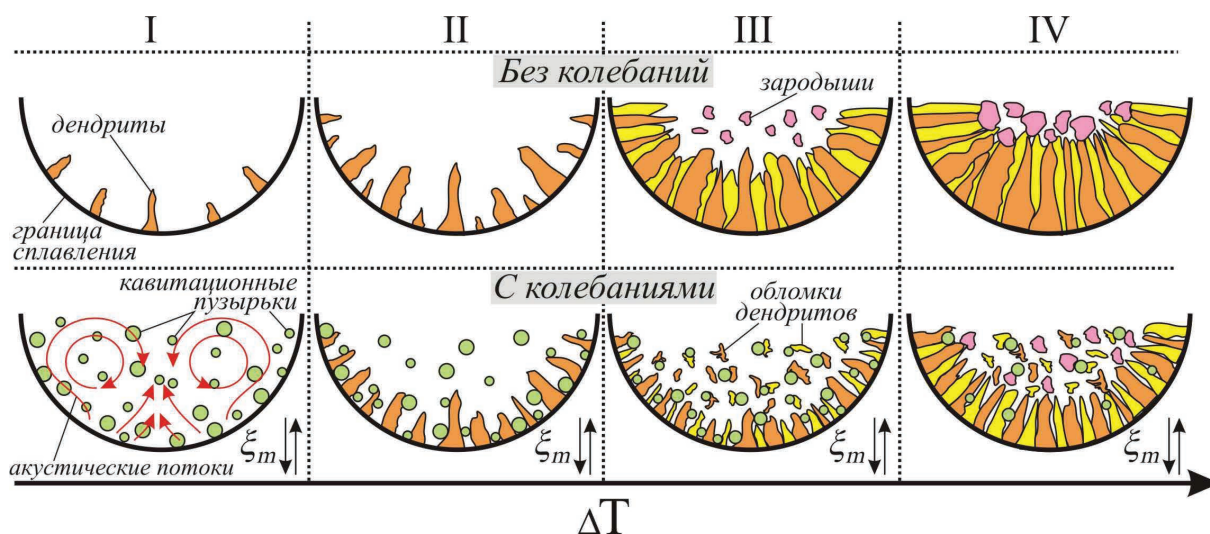
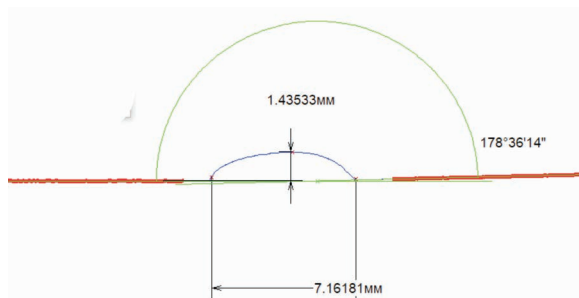


Рис. 8. Схема кристаллизации сварного шва

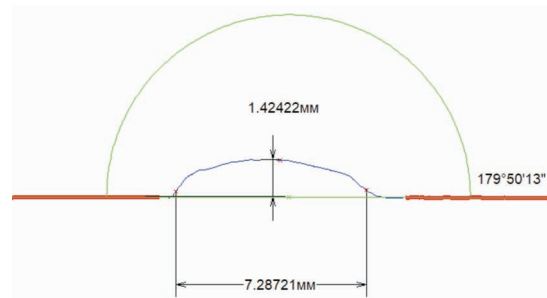
Fig. 8. Crystallization scheme of the weld

ультразвуковых эффектов при достижении расплавом высокой вязкости прекращается, образованные к этому моменту дендриты и зародыши растут до полного затвердевания.

Таким образом, введение ультразвуковых колебаний снижает температуру начала кристаллизации, увеличивает количество образующихся зародышей и уменьшает скорость их роста. В результате образуется мелкозернистая структура со значительным снижением доли дендритной ликвации.



a



б

Рис. 9. Геометрические параметры сварного соединения АМг4:

a – без колебаний; б – с колебаниями

Fig. 9. Geometrical parameters of a welded joint made of AMg4 alloy:

a – without vibrations applied; б – with vibrations applied

При идентичных геометрических параметрах валика шва угол, образованный между пластинами в результате усадки, снизился для соединения Ст3 $1^{\circ}45'$ до $21'$ и для АМг4 с $1^{\circ}24'$ до $10'$. Таким образом, свариваемые с колебаниями элементы сохраняют параллельность, а без колебаний наклон одной пластины относительно другой будет составлять $\approx 2,5$ мм на 100 мм длины, что особенно критично для протяженных сварных конструкций.

Испытания соединений на разрыв (рис. 10) также показывают повышение характеристик.

Наложение колебаний приводит к увеличению временного сопротивления на 5...10 %. Больше влияние ультразвук оказывает на пластичность металла шва, удлинение которого увеличивается на 13...22 %.

Выводы

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

Определение свойств сварного соединения

Полученные изменения микроструктуры приводят к повышению качества сварного соединения.

Так, сварной шов, полученный с наложением колебаний и обладающий равномерной структурой с уменьшением дендритной ликвации, имеет меньшую усадку в процессе остывания, что снижает сварочные деформации. Это выражается в уменьшении прогиба соединения (рис. 9).

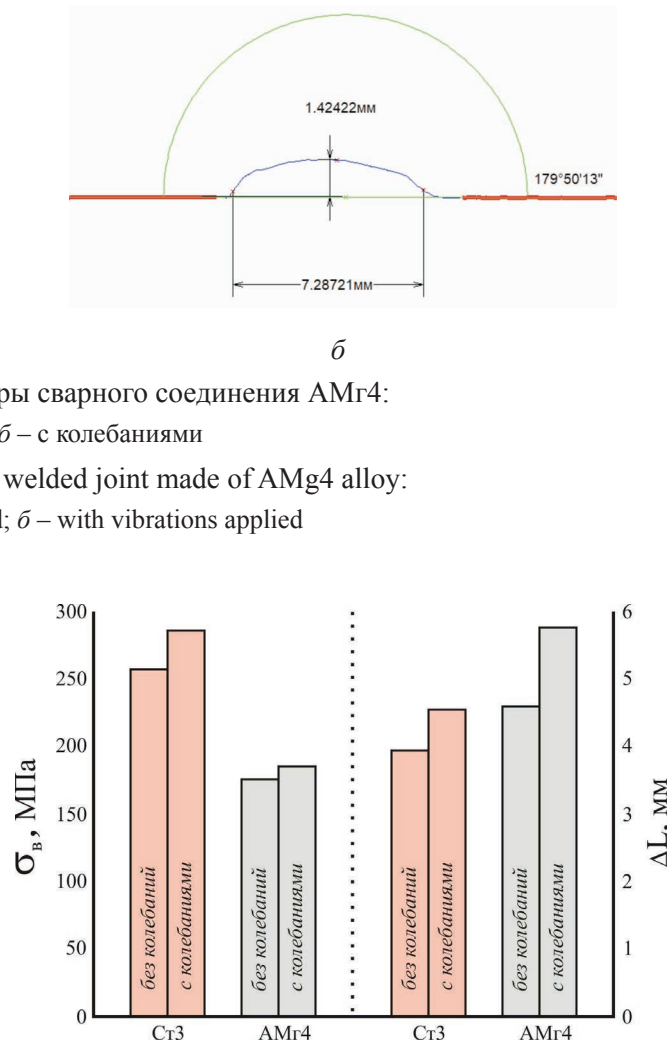


Рис. 10. Изменения временного сопротивления

и удлинения образцов при испытании на растяжение

Fig. 10. Changes in tensile strength and elongation of specimens during the tensile testing

1. Оптимальным местом приложения ультразвуковых колебаний и наложения шва является один из максимумов амплитуды собственных изгибных колебаний свариваемой пластины. При этом длина сварного соединения выбирается исходя из условия равенства резонансной частоты

собственных колебаний частоте источника колебаний.

2. Характер колебаний пластины зависит от режима обработки, определяемого амплитудой колебаний. Наибольшая доля изгибных колебаний достигается при промежуточном режиме колебаний.

3. Наложение ультразвуковых колебаний приводит к изменению микроструктуры металла шва, что выражается в значительном снижении доли дендритной ликвации.

4. Введение ультразвуковых колебаний снижает температуру начала кристаллизации, увеличивает количество образуемых зародышей и уменьшает скорость их роста.

5. Механизм изменения микроструктуры заключается в диспергировании дендритов и зародышей кристаллизации при схлопывании кавитационных пузырьков. Обломки дендритов будут являться новыми зародышами кристаллизации, которые распространяются по обрабатываемому объему под действием акустических потоков. Далее процесс повторяется.

6. У сварного соединения, полученного при наложении ультразвуковых колебаний, уменьшаются сварочные деформации, повышается временное сопротивление и пластичность.

Список литературы

1. Wang H., Cen S. Research on microstructure and mechanical properties of CMT and MIG welded joints of A6N01 aluminum alloy // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – Vol. 2185, iss. 1. – P. 012051. – DOI: 10.1088/1742-6596/2185/1/012051.
2. Sundukov S.K., Nigmatzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Structure of the weld formed during the application of ultrasonic vibrations // *Russian Metallurgy (Metallurgy)*. – 2021. – Vol. 13. – P. 1667–1672. – DOI: 10.1134/S0036029521130309.
3. Improvement of operational properties of parts permanent joints with ultrasound technologies use / V. Prikhodko, M. Karelina, S. Sundukov, A. Sukhodolya, V. Moiseev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1353, iss. 1. – P. 012081. – DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012081.
4. Повышение эксплуатационных свойств сварных швов ультразвуковыми методами / Н.В. Бабченко, О.В. Селиверстова, С.К. Сундуков, Д.С. Фатюхин // *Вестник московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. – 2014. – № 1 (36). – С. 44–49.
5. Bhadeshia H.K.D.H. Problems in the welding of automotive alloys // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2015. – Vol. 20, iss. 6. – P. 451–453. – DOI: 10.1179/15Z.000000000379.
6. Рабкин Д.М., Лозовская А.В., Склабинская И.Е. *Металловедение сварки алюминия и его сплавов*. – Киев: Наукова думка, 1992. – 158 с. – ISBN 5-12-002022-4.
7. Xiao R., Zhang X. Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2014. – Vol. 16, iss. 2. – P. 166–175. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.10.005.
8. Statnikov E.S., Muktepavel V.O. Technology of ultrasound impact treatment as a means of improving the reliability and endurance of welded metal structures // *Welding International*. – 2003. – Vol. 17, iss. 9. – P. 741–744. – DOI: 10.1533/wint.2003.3192.
9. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / под общ. ред. В.О. Абрамова и В.М. Приходько. – М.: Янус-К, 2006. – 688 с. – ISBN 5-8037-0314-1.
10. Influence of ultrasound on submicrostructure of weld seam / S.K. Sundukov, R.I. Nigmatzyanov, V.M. Prikhod'ko, A.V. Sukhov, D.S. Fatyukhin // *Russian Engineering Research*. – 2021. – Vol. 41, iss. 6. – P. 570–573. – DOI: 10.3103/S1068798X21060228.
11. Influence of high-intensity ultrasound on grain refining performance of Al–5Ti–1B master alloy on aluminium / Y. Han, K. Li, J. Wang, D. Shu, B. Sun // *Materials Science and Engineering: A*. – 2005. – Vol. 405, iss. 1–2. – P. 306–312. – DOI: 10.1016/j.msea.2005.06.024.
12. Thermal melt processing of metallic alloys / U. Dahlborg, M. Calvo-Dahlborg, D.G. Eskin, P.S. Poppel // *Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields*. – Cham: Springer, 2018. – P. 277–315. – DOI: 10.1007/978-3-319-94842-3_8.
13. Патент № 515608 СССР. Способ ручной электродуговой сварки / Статников Е.Ш., Шевцов Е.М., Меркель М.С., Казанцев В.Ф. – № 2022257/27; заявл. 13.05.1974; опубл. 30.05.1976, Бюл. № 20.
14. Investigation of formation and microstructure of Ti-6Al-4V weld bead during pulse ultrasound assisted TIG welding / C. Chen, C. Fan, X. Cai, S. Lin, Z. Liu, Q. Fan, C. Yang // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2019. – Vol. 46. – P. 241–247. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.09.014.
15. Process stability of ultrasonic-wave-assisted gas metal arc welding / C. Fan, W. Xie, C. Yang, S. Lin, Y. Fan // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2017. – Vol. 48, iss. 10. – P. 4615–4621. – DOI: 10.1007/s11661-017-4226-3.
16. Cui Y., Xu C., Han Q. Microstructure Improvement in weld metal under the ultrasonic application //



Advanced Engineering Materials. – 2007. – Vol. 9, iss. 3. – P. 161–163 – DOI: 10.1002/adem.200600228.

17. Effect of acoustic field parameters on arc acoustic binding during ultrasonic wave-assisted arc welding / W. Xie, C. Fan, C. Yang, S. Lin // Ultrasonics Sonochemistry. – 2016. – Vol. 29. – P. 476–484. – DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.11.001.

18. Eskin G.I. Broad prospects for commercial application of the ultrasonic (cavitation) melt treatment of light alloys // Ultrasonics Sonochemistry. – 2001. – Vol. 8, iss. 3. – P. 319–325. – DOI: 10.1016/S1350-4177(00)00074-2.

19. Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel / H. Dong, L. Yang, C. Dong, S. Kou // Materials Science and Engineering: A. – 2012. – Vol. 534. – P. 424–435. – DOI: 10.1016/j.msea.2011.11.090.

20. Characteristics of periodic ultrasonic assisted TIG welding for 2219 aluminum alloys / X. Cai, S. Lin, X. Wang, C. Yang, C. Fan // Materials. – 2019. – Vol. 12, iss. 24. – P. 4081. – DOI: 10.3390/ma12244081.

21. Microstructure evolutions and properties of Al–Cu alloy joint in the pulsed power ultrasonic-assisted GMAW / C. Chen, C. Fan, Z. Liu, X. Cai, S. Lin, Y. Zhuo // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). – 2020. – Vol. 33, iss. 10. – P. 1397–1406. – DOI: 10.1007/s40195-020-01066-4.

22. Effect of ultrasound on heterogeneous nucleation in TIG welding of Al–Li alloy / Q.-H. Chen, S.-B. Lin, C.-L. Yang, C.-L. Fan, H.-L. Ge // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). – 2016. – Vol. 29, iss. 12. – P. 1081–1088. – DOI: 10.1007/s40195-016-0483-1.

23. Cunha T.V. da, Bohórquez C.E.N. Ultrasound in arc welding: a review // Ultrasonics. – 2015. – Vol. 56. – P. 201–209. – DOI: 10.1016/j.ultras.2014.10.007.

24. Сундуков С.К., Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С. Ультразвуковые технологии при получении неразъемных соединений. Обзор. Ч. 2 // Технология металлов. – 2021. – № 9. – С. 2–8. – DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-9-2-8.

25. Rusinko A. Analytical description of ultrasonic hardening and softening // Ultrasonics. – 2011. – Vol. 51, iss. 6. – P. 709–714. – DOI: 10.1016/j.ultras.2011.02.003.

26. Выбор и оптимизация режимов ультразвукового поверхностного деформирования / В.Ф. Казанцев, Ю.М. Лужнов, Р.И. Нигметзянов, С.К. Сундуков, Д.С. Фатюхин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – № 4. – С. 26–32.

27. Stress relaxation due to ultrasonic impact treatment on multi-pass welds / H. Gao, R.K. Dutta, R.M. Huizenga, M. Amirthalingam, M.J.M. Hermans, T. Buslaps, I.M. Richardson // Science and Technology of Welding and Joining. – 2014. – Vol. 19, iss. 6. – P. 505–513. – DOI: 10.1179/1362171814Y.0000000219.

28. Теория сварочных процессов / под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с. – ISBN 5-06-001473-8.

29. Розенберг Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии. – М.: Наука, 1970. – 689 с.

30. Rozenberg L.D. On the physics of ultrasonic cleaning // Ultrasonic News. – 1960. – Vol. 4, iss. 4. – P. 16–20.

31. Mason T.J. Ultrasonic cleaning: An historical perspective // Ultrasonics Sonochemistry. – 2016. – Vol. 29. – P. 519–523. – DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.05.004.

32. Nikitenko S.I., Pflieger R. Toward a new paradigm for sonochemistry: short review on nonequilibrium plasma observations by means of MBSL spectroscopy in aqueous solutions // Ultrasonics Sonochemistry. – 2017. – Vol. 35. – P. 623–630. – DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.02.003.

33. Comparative study on the cavitation erosion and sliding wear of cold-sprayed Al/Al₂O₃ and Cu/Al₂O₃ coatings, and stainless steel, aluminium alloy, copper and brass / M. Szala, M. Walczak, L. Latka, M. Winnicki // Metals. – 2020. – Vol. 10, iss. 7. – P. 856. – DOI: 10.3390/met10070856.

34. Nolting B.E., Neppiras E.A. Cavitation produced by ultrasonics // Proceedings of the Physical Society. Section B. – 1950. – Vol. 63, iss. 9. – P. 674.

35. A comparison of the effects of ultrasonic cavitation on the surfaces of 45 and 40Kh steels / D.S. Fatyukhin, R.I. Nigmatzyanov, V.M. Prihodko, A.V. Sukhov, S.K. Sundukov // Metals. – 2022. – Vol. 12, iss. 1. – P. 138. – DOI: 10.3390/met12010138.

36. Modelling of cavitation erosion in the area of surfaces of smooth contact / V.M. Prihodko, A.P. Buslaev, S.B. Norkin, M.V. Yashina // Ultrasonics Sonochemistry. – 2001. – Vol. 8, iss. 1. – P. 59–67. – DOI: 10.1016/S1350-4177(99)00048-6.

37. Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders / H. Lais, P.S. Lowe, T.-H. Gan, L.C. Wrobel // Ultrasonics Sonochemistry. – 2018. – Vol. 45. – P. 7–16. – DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.02.045.

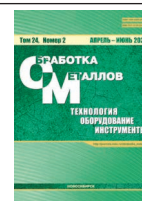
Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Features of the superposition of ultrasonic vibrations in the welding process

Sergey Sundukov *

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation

<https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>, sergey-lefmo@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 25 March 2022

Revised: 13 May 2022

Accepted: 15 May 2022

Available online: 15 June 2022

Keywords:

Ultrasonic

Welding

Vibrations

Cavitation

Microstructure

Dendritic segregation

Funding

This research was funded by the Russian Science Foundation, grant number No. 21-79-00185, <https://rscf.ru/project/21-79-00185/>

Acknowledgements

Research was partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials"

ABSTRACT

Introduction. The main problem in obtaining welded joints is the nonuniform heating of the joint zone, which leads to differences in the structure and properties of the weld metal and the base metal. One of the ways to intensify the welding process is the use of ultrasonic vibrations. As a result of the analysis of methods for introducing ultrasonic vibrations into the melting zone, a method of superimposing vibrations on the elements to be welded was chosen for experimental studies. This method makes it possible to influence the welded elements throughout the entire welding cycle from the melt bath to complete crystallization of the metal. **Methods.** Experimental studies were carried out on plates made of carbon structural steel St3 (ASTM A568M, AISI 1017, DIN 17100) and aluminum deformable non-hardened alloy AMg4 (EN AW-5086, AW-AL Mg4, 5086). As a source of oscillations, a rod magnetostrictive oscillatory system was used, the end of which was rigidly fixed on one of the welded plates. To determine the places of application of the oscillation source and the welding zone, a calculation method is proposed based on the equality of the resonant frequencies of the used oscillatory system and the natural frequency of bending vibrations of the welding component. It is shown that the optimal places for the application of vibrations and welding will be the antinodes of oscillations, which have the maximum amplitude. Welds were obtained by the method of semi-automatic gas metal arc welding. **Results and Discussion.** Microstructural study of obtained samples showed a significant decrease in the proportion of dendritic segregation. The changes in the structure are the result of the effects that occur in the liquid melt when ultrasonic vibrations are introduced. The main effects are sound pressure, cavitation and acoustical streaming. The structure change mechanism consists in the dispersion of growing dendrites and crystallization nuclei under the action of shock waves and cumulative jets that occur when cavitation bubbles collapse. The formed fragments of dendrites are new crystallization nuclei that propagate through the melt pool under the action of acoustic currents. Then the process is repeated. The resulting effects affect the kinetics of the crystallization process – the degree of supercooling increases, the number of crystallization nuclei formed per unit time increases, and the rate of its growth decreases. Changes in the structure of the weld metal lead to an increase in the quality of the welded joint, which reduces welding deformations, increases the tensile strength and significantly increases ductility.

For citation: Sundukov S.K. Features of the superposition of ultrasonic vibrations in the welding process. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 50–66. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66. (In Russian).

References

1. Wang H., Cen S. Research on microstructure and mechanical properties of CMT and MIG welded joints of A6N01 aluminum alloy. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2185, iss. 1, p. 012051. DOI: 10.1088/1742-6596/2185/1/012051.
2. Sundukov S.K., Nigmatzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Structure of the weld formed during the application of ultrasonic vibrations. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021, vol. 13, pp. 1667–1672. DOI: 10.1134/S0036029521130309.

* Corresponding author

Sundukov Sergey K., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Moscow Automobile and Road Construction State
Technical University (MADI)
64 Leningradsky prospect,
125319, Moscow, Russian Federation
Tel.: 8 (926) 369-19-70, e-mail: sergey-lefmo@yandex.ru



3. Prikhodko V.M., Karelina M., Sundukov S., Sukhodolya A., Moiseev V. Improvement of operational properties of parts permanent joints with ultrasound technologies use. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1353, iss. 1, p. 012081. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012081.
4. Babchenko N.V., Seliverstova O.V., Sundukov S.K., Fatyuhin D.S. Povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv svarykh shvov ul'trazvukovymi metodami [Improving operational properties weld the ultrasonic method]. *Vestnik moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2014, no. 1 (36), pp. 44–49. (In Russian).
5. Bhadeshia H.K.D.H. Problems in the welding of automotive alloys. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, vol. 20, iss. 6, pp. 451–453. DOI: 10.1179/15Z.000000000379.
6. Rabkin D.M., Lozovskaya A.V., Sklabinskaya I.E. *Metallovedenie svarki alyuminiya i ego splavov* [Metallurgy of aluminum and its alloys welding]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1992. 158 p. ISBN 5-12-002022-4.
7. Xiao R., Zhang X. Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, vol. 16, iss. 2, pp. 166–175. DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.10.005.
8. Statnikov E.Sh., Mukte Pavel V.O. Technology of ultrasound impact treatment as a means of improving the reliability and endurance of welded metal structures. *Welding International*, 2003, vol. 17, iss. 9, pp. 741–744. DOI: 10.1533/wint.2003.3192.
9. Abramov V.O., Prikhod'ko V.M., eds. *Moshchnyi ul'trazvuk v metallurgii i mashinostroenii* [Powerful ultrasound in metallurgy and mechanical engineering]. Moscow, Yanus-K Publ., 2006. 688 p. ISBN 5-8037-0314-1.
10. Sundukov S.K., Nigmatzyanov R.I., Prikhod'ko V.M., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S. Influence of ultrasound on submicrostructure of weld seam. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, iss. 6, pp. 570–573. DOI: 10.3103/S1068798X21060228.
11. Han Y., Li K., Wang J., Shu D., Sun B. Influence of high-intensity ultrasound on grain refining performance of Al–5Ti–1B master alloy on aluminium. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, vol. 405, iss. 1–2, pp. 306–312. DOI: 10.1016/j.msea.2005.06.024.
12. Dahlborg U., Calvo-Dahlborg M., Eskin D.G., Popel P.S. Thermal melt processing of metallic alloys. *Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields*. Cham, Springer, 2018, pp. 277–315. DOI: 10.1007/978-3-319-94842-3_8.
13. Statnikov E.Sh., Shevtsov E.M., Merkel M.S., Kazantsev V.F. *Sposob ruchnoi elektrodugovoi svarki* [Method of manual electric arc welding]. Patent USSR, no. 515608, 1976.
14. Chen C., Fan C., Cai X., Lin S., Liu Z., Fan Q., Yang C. Investigation of formation and microstructure of Ti–6Al–4V weld bead during pulse ultrasound assisted TIG welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 46, pp. 241–247. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.09.014.
15. Fan C., Xie W., Yang C., Lin S., Fan Y. Process stability of ultrasonic-wave-assisted gas metal arc welding. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, vol. 48, iss. 10, pp. 4615–4621. DOI: 10.1007/s11661-017-4226-3.
16. Cui Y., Xu C., Han Q. Microstructure improvement in weld metal under the ultrasonic application. *Advanced Engineering Materials*, 2007, vol. 9, iss. 3, pp. 161–163. DOI: 10.1002/adem.200600228.
17. Xie W., Fan C., Yang C., Lin S. Effect of acoustic field parameters on arc acoustic binding during ultrasonic wave-assisted arc welding. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, vol. 29, pp. 476–484. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.11.001.
18. Eskin G.I. Broad prospects for commercial application of the ultrasonic (cavitation) melt treatment of light alloys. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2001, vol. 8, iss. 3, pp. 319–325. DOI: 10.1016/S1350-4177(00)00074-2.
19. Dong H., Yang L., Dong C., Kou S. Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, vol. 534, pp. 424–435. DOI: 10.1016/j.msea.2011.11.090.
20. Cai X., Lin S., Wang X., Yang C., Fan C. Characteristics of periodic ultrasonic assisted TIG welding for 2219 aluminum alloys. *Materials*, 2019, vol. 12, iss. 24, p. 4081. DOI: 10.3390/ma12244081.
21. Chen C., Fan C., Liu Z., Cai X., Lin S., Zhuo Y. Microstructure evolutions and properties of Al–Cu alloy joint in the pulsed power ultrasonic-assisted GMAW. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, vol. 33, iss. 10, pp. 1397–1406. DOI: 10.1007/s40195-020-01066-4.
22. Chen Q.-H., Lin S.-B., Yang C.-L., Fan C.-L., Ge H.-L. Effect of ultrasound on heterogeneous nucleation in TIG welding of Al–Li alloy. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2016, vol. 29, iss. 12, pp. 1081–1088. DOI: 10.1007/s40195-016-0483-1.
23. Cunha T.V. da, Bohórquez C.E.N. Ultrasound in arc welding: a review. *Ultrasonics*, 2015, vol. 56, pp. 201–209. DOI: 10.1016/j.ultras.2014.10.007.

24. Sundukov S.K., Nigmatzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Ul'trazvukovye tekhnologii pri poluchenii neraz'emnykh soedinenii. Obzor. Ch. 2 [Ultrasonic technologies in the production of permanent joints. Review. Pt. 2]. *Tekhnologiya metallov = Metall Technology*, 2021, vol. 9, pp. 2–8. DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-9-2-8.
25. Rusinko A. Analytical description of ultrasonic hardening and softening. *Ultrasonics*, 2011, vol. 51, iss. 6, pp. 709–714. DOI: 10.1016/j.ultras.2011.02.003.
26. Kazantsev V.F., Luzhnov Yu.M., Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Vybór i optimizatsiya rezhimov ul'trazvukovogo poverkhnostnogo deformirovaniya [Selection and optimization of ultrasonic surface deformation]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2016, no. 4, pp. 26–32. (In Russian).
27. Gao H., Dutta R.K., Huizenga R.M., Amirthalingam M., Hermans M.J.M., Buslaps T., Richardson I.M. Stress relaxation due to ultrasonic impact treatment on multi-pass welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, vol. 19, iss. 6, pp. 505–513. DOI: 10.1179/1362171814Y.0000000219.
28. Frolov V.V., ed. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 559 p. ISBN 5-06-001473-8.
29. Rosenberg L.D. *Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka*. T. 3. *Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoi tekhnologii* [Physics and technology of powerful ultrasound. Vol. 3. Physical foundations of ultrasonic technology]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 689 p.
30. Rozenberg L.D. On the physics of ultrasonic cleaning. *Ultrasonic News*, 1960, vol. 4, iss. 4, pp. 16–20.
31. Mason T.J. Ultrasonic cleaning: An historical perspective. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, vol. 29, pp. 519–523. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.05.004.
32. Nikitenko S.I., Pflieger R.. Toward a new paradigm for sonochemistry: short review on nonequilibrium plasma observations by means of MBSL spectroscopy in aqueous solutions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 35, pp. 623–630. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.02.003.
33. Szala M., Walczak M., Latka L., Winnicki M. Comparative study on the cavitation erosion and sliding wear of cold-sprayed Al/Al₂O₃ and Cu/Al₂O₃ coatings, and stainless steel, aluminium alloy, copper and brass. *Metals*, 2020, vol. 10, iss. 7, p. 856. DOI: 10.3390/met10070856.
34. Nolting B.E., Neppiras E.A. Cavitation produced by ultrasonics. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1950, vol. 63, iss. 9, p. 674.
35. Fatyukhin D.S., Nigmatzyanov R.I., Prihodko V.M., Sukhov A.V., Sundukov S.K. A comparison of the effects of ultrasonic cavitation on the surfaces of 45 and 40Kh steels. *Metals*, 2022, vol. 12, iss. 1, p. 138. DOI: 10.3390/met12010138.
36. Prihodko V.M., Buslaev A.P., Norkin S.B., Yashina M.V. Modelling of cavitation erosion in the area of surfaces of smooth contact. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2001, vol. 8, iss. 1, pp. 59–67. DOI: 10.1016/S1350-4177(99)00048-6.
37. Lais H., Lowe P.S., Gan T.-H., Wrobel L.C. Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, vol. 45, pp. 7–16. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.02.045.

Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2022 The Author. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).