

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ ВВОДА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ КОНЕЧНЫХ АМПЛИТУД В РАСПЛАВЛЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Н.Ф. ЛУГАКОВ, Н.И. БОХАН, И.С. КРУК, А.В. КОСТЮЧЕНКО

Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Разработана методика инженерного расчета гарантированных условий ввода ультразвука в расплавленный металл расходуемым волноводом и получения материалов на металлической основе с возможностью регулирования их состава и свойств. Предложено аналитическое выражение для определения интервала скоростей подачи расходуемого присадочного волновода, в области которых можно легко производить точную экспериментальную доводку и существенно облегчить нахождение условий гарантированного ввода ультразвука в расплав, обеспечивающих качественные технологические режимы подготовки материалов к затвердеванию. Получены аналитические выражения для вычисления скорости подачи расходуемого присадочного волновода.

The technique of engineering calculation of the guaranteed conditions of input of ultrasound in the fused metal by a spent wave guide and receptions of materials on a metal basis with an opportunity of regulation of their structure and properties is developed. Analytical expression for definition of an interval of speeds of submission spent waveguide a wave guide in the field of which it is possible to make easily exact experimental operational development is offered and essentially facilitates a finding of conditions of the guaranteed input of ultrasound in the fused material, providing qualitative technological modes of preparation of materials to hardening. Analytical expressions for calculation of speed of submission of a wave guide spent an additive are received.

Введение

Одной из центральных проблем в разработке технологии нанесения покрытий из композиционных и синтетических материалов является проблема стойкости ультразвуковых волноводов-излучателей при обработке расплавов присадочных материалов. Дело в том, что вследствие эффектов второго порядка, имеющих место в расплавленном присадочном материале в ультразвуковом поле, высокой температуры, стойкость волновода-излучателя, находящегося в контакте с расплавленным присадочным порошковым материалом, чрезвычайно мала. Под воздействием кавитации, мелкомасштабных акустических потоков, температуры, волновода-излучатель разрушается и выходит из резонансного режима работы, и эффективность ультразвуковой обработки расплава падает. Поэтому, если не будут приняты специальные меры по сохранению длины, а следовательно, и массы волновода-излучателя, то процесс ультразвуковой обработки через несколько минут прекращается. Конечно, такой способ ввода ультразвука не может иметь перспективы.

Из анализа состояния вопроса вытекало, что задача ввода ультразвука в расплавы металлов во многом еще не решена. Это объясняется сложностью проблемы. Отсутствие эффективных, надежных и долговечных способов ввода ультразвука в расплавы металлов сдерживало применение ультразвука в обработке расплавленных металлов. Поэтому многократно на протяжении многих лет в литературе и решениях конференций, посвященных теории и практике применения ультразвуковых методов для обработки расплавов металлов и сплавов, неоднократно указывалось на актуальность разработки стабильных способов ввода ультразвуковых колебаний в расплавы.

Основная часть

В плане настоящей работы вопросы способов ввода ультразвуковых колебаний в гетерогенные расплавы имели ключевое значение. Существуют различные подходы к решению проблемы ввода ультразвука в расплавы: способы, основанные на использовании тугоплавких и охлаждаемых волноводов [1, 2], бесконтактные способы [3], способы с расходуемым волноводом [4, 5, 6]. Каж-

дая из перечисленных разработок имеет свои достоинства и особенности. Однако общим недостатком всех является то, что проведенные до сих пор исследования преимущественно носят характер испытаний различного рода конструкций излучателей без теоретического их обоснования. Отсутствие теории количественной и качественной оценки и расчета способов ввода ультразвука в расплавы металлов сдерживает разработку рациональных конструкций колебательных систем и устройств автоматического управления оптимальными режимами ультразвуковой обработки расплавов.

Учитывая обнаруженную потребность, нами были предприняты поиски рациональных методов ввода ультразвука в расплавы применительно к процессу обработки расплавов при наплавке покрытий, сварке, пайке, удовлетворяющему условиям эффективности, надежности, долговечности и экономичности требуемых устройств.

Рассмотрим теоретические обоснования новых схемных решений, предлагаемых нами способов ввода ультразвуковых колебаний в расплавы.

1. Способ ввода ультразвука в расплавы, не расходуемые волноводом-излучателем, работающим в стационарном тепловом режиме

Анализируя условия работы ультразвукового волновода-излучателя, мы пришли к выводу о рациональности разработки способа и устройства ввода ультразвука в расплавы на основах принципа восстановления стационарного режима работы ультразвуковой колебательной системы в процессе обработки расплава [7].

Впервые идея и реализация регулирования стационарного режима работы ультразвуковой колебательной системы описана в источниках [8, 9]. Суть этого способа состоит в следующем. Водоохлаждаемый излучатель при включенных колебаниях доводился до соприкосновения с зеркалом расплава, при этом сразу же начиналось его некоторое оплавление. Излучатель с помощью кулачкового механизма опускался в расплав. Причем размеры волновода-излучателя при оплавлении соответствовали резонансному режиму. После оплавления излучателя на 2...3 мм, не нарушая акустического контакта между расплавом и излучателем и не прерывая процесса ультразвуковой обработки, производился подъем волновода-излучателя и восстановление его размеров за

счет намораживания. После этого процесс повторялся циклически неоднократно.

Недостатком этого способа является изменение амплитуды колебаний в процессе ультразвуковой обработки расплава за счет уменьшения размеров волновода-излучателя.

Одним из путей совершенствования способа ввода ультразвука в расплавы, в части обеспечения постоянного акустического режима обработки расплавов металлов и сплавов, является расчет и создание стационарного теплового режима работы ультразвуковой водоохлаждаемой колебательной системы, чтобы автоматически контролировался и сохранялся резонансный размер волновода-излучателя.

С теплофизической точки зрения процесс обеспечения стационарного акустического режима работы ультразвуковой колебательной системы заключается в сохранении резонансных размеров волновода-излучателя. Это реализуется путем создания условий баланса теплообмена между расплавом.

2. Способ ввода ультразвука в расплавы расходуемым волноводом-излучателем

Исследования электродуговой наплавки в ультразвуковом поле показали, что качество металла и производительность процесса зависят от условий ввода ультразвука в расплав, которые в свою очередь определяются скоростью подачи волноводной присадочной проволокой.

Для определения гарантированных условий ввода ультразвука в расплавленный металл расходуемым присадочным волноводом, обеспечивающих качественные технологические режимы подготовки материалов к затвердеванию, рассмотрим теплофизические условия в системе «присадочная волноводная проволока – обрабатываемый расплав металла» и определим скорость подачи волноводной проволоки в зону расплава, при которой будет обеспечен непрерывный режим обработки. Эта скорость зависит от температуры расплавленного металла в той области, в которую вводится присадочная проволока, начальной температуры и удельной теплоты плавления материала проволоки, ее теплофизических свойств, диаметра проволоки, условий теплообмена с окружающей средой и может быть найдена путем решения соответствующей тепловой задачи. Нас интересует скорость, при которой имеет место установившийся режим работы системы: в этом случае по ее длине будет стационарное распределение температуры. За начало координат примем торец проволоки, находящийся в контакте с расплавом. Дифференциальное уравнение стационарной теплопроводности для движущейся с постоянной скоростью проволоки имеет вид:

$$a \frac{d^2 T}{dx^2} = V \frac{dT}{dx} = f(x), \quad (1)$$

где a – температуропроводность материала проволоки;

V – скорость ее ввода в расплав;

$f(x)$ – функция, учитывающая выделение тепла в проволоке за счет поглощения ею ультразвука, а также утечку тепла в окружающее пространство через ее поверхность. При этом температура по сечению проволоки считается постоянной вследствие достаточно высокой теплопроводности материала проволоки.

На торце проволоки происходит ее плавление, поэтому при $X = 0$ должно выполняться условие

$$T_0 = T_{пл}. \quad (2)$$

Кроме того, на границе $X = 0$ должно выполняться

условие баланса тепла (разность между потоком тепла, подводимым из расплава к торцу проволоки, и потоком тепла, отводимым в проволоку путем теплопроводности, должна быть равна количеству тепла, ежесекундно расходуемому на плавление проволоки):

$$a (T_p - T_{пл}) = \lambda \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = Q \chi V, \quad (3)$$

где T_p – температура расплава;

$T_{пл}$ – температура плавления проволоки;

a – коэффициент теплообмена между расплавом и проволокой;

λ , χ и Q – удельные теплопроводности, теплота плавления и плотность материала проволоки.

На границе $X = \infty$ (проволока считается бесконечно длинной) примем условие

$$T \Big|_{X \rightarrow \infty} = T_0, \quad (4)$$

где T_0 – начальная температура проволоки.

Система уравнений (1)–(4) является замкнутой, т.е. позволяет определить как стационарное температурное поле в движущейся, плавящейся с торца проволоке, так и скорость ее движения. Задачу можно решить различными путями. Можно, например, температурное поле искать путем решения системы (1)–(3); скорость в этом случае найдется путем использования условия (4). Можно температурное поле искать путем решения системы (1), (2), (4), тогда скорость V найдется из уравнения (3). Окончательный результат в обоих случаях будет одинаков.

Решим сначала систему (1), (2), (4). Уравнение (1) является обыкновенным неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами (a и V). Общее решение его, как известно [10], представляет собой сумму общего решения соответствующего однородного уравнения

$$a \frac{d^2 T}{dx^2} = V \frac{dT}{dx} = 0, \quad (5)$$

и частного решения исходного уравнения (1). Легко показать, что уравнению (5) удовлетворяет функция (т.е. является его общим решением)

$$T = C_1 + C_2 \ell^{\frac{-V}{a}}, \quad (6)$$

где C_1 и C_2 – произвольные постоянные.

Общее решение уравнения (6) находим методом вариации произвольных постоянных [11], для чего полагаем

$$T = C_1(x) + C_2(x) \ell^{\frac{-V}{a} x}.$$

Функции $C_1(x)$ и $C_2(x)$ и при этом находятся путем решения следующей системы:

$$\frac{dC_1(x)}{dx} + \frac{dC_2(x)}{dx} \ell \frac{-V}{a} x. \quad (7)$$

$$\frac{dC_2(x)}{dx} \left(-\frac{V}{a} \right) \ell \frac{-V}{a} x = \frac{f(x)}{a}.$$

Из второго уравнения системы (7) получаем

$$\frac{dC_2(x)}{dx} - \frac{1}{V} f(x) \ell \frac{-V}{a} x.$$

Откуда

$$C_2(x) = -\frac{1}{V} \int f(x) \ell \frac{V}{a} x dx = k_2. \quad (8)$$

Подставляя полученное выражение для $\frac{dC_2}{dx}$ в первое уравнение системы (7), находим

$$\frac{dC_1(x)}{dx} - \frac{1}{V} f(x) = 0.$$

Откуда

$$C_1(x) = \frac{1}{V} \int f(x) dx + k_1, \quad (9)$$

где K_1 и K_2 – постоянные, которые необходимо найти из граничных условий (2), (4).

Подставляя (8) и (9) в формулу (6), получим общее решение исходного уравнения (1):

$$T(x) = \frac{1}{V} \left[\int f(x) dx - e^{-\frac{V}{a} x} \int f(x) e^{\frac{V}{a} x} dx \right] + k_1 = k_2 e^{-\frac{V}{a} x}. \quad (10)$$

Подставляя последнее выражение в условия (2) и (4), получим систему алгебраических уравнений, из которых найдем K_1 и K_2 :

$$K_1 = T_0 - \frac{A}{V}, \quad (11)$$

$$K_2 = T_{\text{пл}} - T_0 + \frac{A}{V}, \quad (12)$$

где A – значение интеграла $\int f(x) dx$ при $X = \infty$.

Таким образом, окончательное решение задачи (1), (2), (4) имеет вид:

$$T(x) = \frac{1}{V} \left[\int f(x) dx - e^{-\frac{V}{a} x} \int f(x) e^{\frac{V}{a} x} dx \right] + \left(T_{\text{пл}} - T_0 + \frac{A}{V} \right) e^{-\frac{V}{a} x} + T_0 - \frac{A}{V}. \quad (13)$$

Необходимая скорость введения волноводной проволоки теперь находится из условия теплового баланса (3), в котором величина

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{X=0} = K,$$

определяется из выражения (13). Найдем производную $\frac{dT}{dx}$:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{1}{a} e^{-\frac{V}{a} x} \int f(x) e^{\frac{V}{a} x} dx - \frac{V}{a} \left(T_{\text{пл}} - T_0 + \frac{A}{V} \right) e^{-\frac{V}{a} x}. \quad (14)$$

При $X = 0$ из (14) получим

$$K = \frac{B}{a} - \frac{A}{a} - \frac{V}{a} (T_{\text{пл}} - T_0), \quad (15)$$

где B – значение интеграла $\int f(x) e^{-\frac{V}{a} x} dx$ при $X = 0$.

Подставляя теперь полученное выражение для K вместо $\left. \frac{dT}{dx} \right|_{X=0}$ в уравнение (3) и решая его относительно

V , получим формулу для расчета скорости ввода волноводной проволоки в расплав:

$$V = \frac{\alpha (T_p - T_{\text{пл}}) + \frac{\lambda}{a} (B - A)}{Q \chi + \frac{\lambda}{a} (T_{\text{пл}} - T_0)}. \quad (16)$$

Выражение (16) получено в общем виде. В него входят постоянные величины B и A , значения которых определяются видом функции $f(x)$. Как показали экспериментальные исследования, скорость ввода волноводной проволоки в расплав, обеспечивающая стабильную работу в условиях эксперимента, составляла 10–30 мм/с. Это достаточно большая скорость, и в первом приближении можно считать, что уходящее в проволоку тепло за счет теплопроводности не успевает сколько-нибудь заметно отводиться в окружающий воздух, а в основном идет на нагрев проволоки. Учитывая, кроме того, что коэффициент поглощения ультразвука в материале волноводной проволоки для используемой частоты мал, можно пренебречь также теплом, выделяемым в волноводной проволоке за счет поглощения ультразвука. Поэтому в первом приближении можно положить

$$f(x) = 0, \quad (17)$$

тогда

$$A = B = 0, \quad (18)$$

в этом случае

$$K = \frac{V}{a} (T_{\text{пл}} - T_0), \quad (19)$$

и из формулы (16) получаем

$$V = \frac{\alpha (T_p - T_{\text{пл}})}{Q \chi + Q C (T_{\text{пл}} - T_0)}, \quad (20)$$

где учтено, что $\alpha = \frac{\lambda}{QC}$;

C – удельная теплоемкость материала звуковвода. Формула (20) получена из решения тепловой задачи в предположении, что оплавление конца ее происходит постоянно на поверхности зеркала расплава. Таким образом, вычисленная по формуле (20) скорость является минимальной скоростью, при которой будет обеспечен непрерывный режим работы системы. Если скорость подачи проволоки несколько увеличить, то конец ее будет заглубляться в расплав, что вызовет плавление не только с торца, но и с боковой поверхности заглубленного участка проволоки. При дальнейшем увеличении скорости подачи проволоки может наступить ситуация, при которой проволока, не успев расплавиться, упрется в дно области расплава, и непрерывный режим работы нарушится. Из этого анализа следует, что непрерывный режим работы обеспечивается в некотором диапазоне скоростей подачи волноводной проволоки, начиная с минимального ее значения, определяемого формулой (20), и до некоторого максимального значения, зависящего от глубины зоны расплава.

В формулу (20) входит, кроме известных (табличных) величин Q , χ , C и экспериментально определяемых T_p и T_0 , значение коэффициента теплообмена α между расплавом и проволокой. Величина его зависит от теплофизических свойств расплава, относительной скорости движения проволоки, ее геометрии. В литературе практически отсутствуют данные по численным значениям α для случая расплавления металлов вообще, и для условий, близких к рассматриваемым, в частности. Правда, значение α можно определить на основании соотношения (20), найдя экспериментально минимальную скорость, обеспечивающую непрерывный режим ввода проволоки.

Однако для инженерной практики желательно разрешить эту задачу. Поэтому воспользуемся приближенным выражением для мощности теплового потока, подводимого от зеркала расплавленного металла к торцу волноводной проволоки, приведенным в работах [11,12]:

$$Q = 4\lambda_p r (T_p - T_0) \quad (21)$$

где λ_p – удельная теплопроводность расплава;
 r – радиус волноводной проволоки.

Для плотности теплового потока вместо (21) получим

$$q = \frac{Q}{\Pi r^2} = \frac{4\lambda_p}{\Pi r} (T_p - T_0) \quad (22)$$

Подставляя это выражение вместо $\alpha(T_p - T_{пл})$ в формулу (20), получим

$$V = \frac{4\lambda_p (T_p - T_0)}{\Pi r Q \chi + \Pi r Q C (T_{пл} - T_0)} \quad (23)$$

С целью получения численных значений скоростей подачи волноводной присадочной проволоки, в зависимости от различных значений величин, входящих в формулу (23), она была подвергнута числовой обработке.

Составлена программа, с помощью которой на ЭВМ получены численные значения скорости подачи V при различных заданных значениях физико-химических, теплофизических свойств температур: расплава металла, плавления волноводной присадочной проволоки. Расчет проведен для волноводных присадочных проволок, изготовленных из стали.

Рассмотрим случай, когда ультразвуковая обработка расплава, легирование металла, получение биметаллических систем и композиционных материалов осуществляется не с поверхности расплавленного металла, а при некотором заглублении волноводной проволоки в расплавленный металл, проходящего расплавленный флюс. Именно такой режим наиболее соответствует практике, как уже показали эксперименты.

Связь скорости V_h в случае заглубления с величиной заглубления присадочной проволоки h и скоростью V , рассчитанной по формуле (23), можно найти следующим образом. Конец волноводы, погруженный на глубину, оплавляется по всей боковой поверхности S_b , без заглубления – только в площади сечения S_0 . Поэтому при заглублении скорость равна

$$V_h = V \frac{S_b}{S_0} \quad (24)$$

Рассмотрим два возможных состояния:

- волноводная присадочная проволока расплавляется равномерно с нижней части, но сохраняет цилиндрическую форму, тогда

$$V_h = V \frac{2\Pi r h}{\Pi r^2} = V \frac{2h}{r} \quad (25)$$

- толщина волноводной присадочной проволоки по мере заглубления уменьшается, и в результате оплавления волновод приобретает форму, близкую к конусу, тогда

$$V_h = V \frac{\Pi r L_k}{\Pi r^2} = V \sqrt{\frac{r^2 + h^2}{r^2}} = V \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r}\right)^2} \quad (26)$$

где L_k – образующая конуса;

r и h – соответственно радиус проволоки и глубина ее погружения в расплав.

Плавно регулируя скорость подачи волноводной проволоки, можно установить режим скорости ввода, при которой расплавление проволоки наступает на заданной глубине ванны расплава, вплоть до максимальной скорости подачи, когда проволока расплавляется у самого дна ванны. Если глубина погружения известна, то формула (23) для расчета скорости подачи волноводной присадочной проволоки с учетом (25) и (26) будет иметь следующий вид:

$$V_h = A \frac{4\lambda_p (T_p - T_0)}{\Pi r Q \chi + \Pi r Q C (T_{пл} - T_0)} \quad (27)$$

$$\text{где } V = \frac{2h}{r} \text{ и } A = \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r}\right)^2}$$

коэффициенты увеличения скорости при расплавлении волновода на заданной глубине соответственно в случае цилиндрического и конического волновода (табл. 1).

Рассчитанные значения скоростей подачи волноводной присадочной проволоки по формуле (27)

близки к экспериментальным, полученным в процессе электродуговой наплавки с использованием стальной проволоки СВ08ГА диаметр 2,5 мм. Проведенный расчет достаточно полно отражает суть происходящих явлений в системе «волноводная присадочная проволока – расплавленный металл» и дает возможность, не прибегая к трудоемким экспериментальным исследованиям, получить значение скорости подачи волноводной присадочной проволоки, близкое к номинальному.

Таблица 1. Рассчитанные значения коэффициентов увеличения скорости подачи волноводной присадочной проволоки при заданной глубине и заданной форме оплаваемого волновода

Диаметр проволоки, мм	Величина заглабления, мм	Коэффициенты (цилиндр)	Коэффициенты (конус)
1,2	1	2,33	1,94
	2	6,66	3,48
	3	10,0	5,09
	4	13,3	6,74
	5	16,6	8,39
1,4	1	2,9	1,7
	2	5,7	4,3
	3	8,6	4,4
	4	11,4	5,8
	5	14,2	7,2
1,6	1	2,5	1,6
	2	5	1,7
	3	7,5	3,9
	4	10	5,1
	5	12,5	6,3
1,8	1	2,2	1,5
	2	4,4	2,4
	3	6,7	3,5
	4	8,9	4,6
	5	11,1	5,6
2,0	1	2	1,4
	2	4	2,24
	3	6	3,16
	4	8	4,12
	5	10	5,09
3,0	1	1,33	1,2
	2	2,66	1,7
	3	4,0	2,2
	4	5,3	2,8
	5	6,7	3,5

Заключение

Результаты проведенной работы [13, 14, 15] позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана методика инженерного расчета гарантированных условий ввода ультразвука в расплавленный металл расходуемым волноводом и получения материалов на металлической основе с возможностью регулирования их состава и свойств.

2. Анализ результатов расчета на ЭВМ скорости

подачи волноводной присадочной проволоки и сопоставление их с результатами эксперимента показывают, что скорость плавления волновода весьма критична к параметрам, определяющим процесс ультразвуковой обработки материалов перед затвердеванием.

3. Предложенное аналитическое выражение позволяет определить интервал скоростей подачи расходуемого присадочного волновода, в области которых

можно легко производить точную экспериментальную доводку и, таким образом, существенно облегчает нахождение условий гарантированного ввода ультразвука в расплав, обеспечивающих качественные технологические режимы подготовки материалов к затвердеванию.

4. Полученные аналитические выражения для

вычисления скорости подачи расходуемого присадочного волновода могут явиться базовыми для расчета технологических процессов получения новых материалов: ультразвукового легирования, получения биметаллических систем и композиционных материалов с помощью расходуемого присадочного волновода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шияев А.С., Дробязко Г.А. и др. А.с. 187601 СССР. Устройство для лужения керамических изделий.
2. Залесский А.М., Кукеков Г.А. Тепловые расчеты электрических аппаратов. – М.: Энергия, 1967. – 430 с.
3. Шияев А.С., Ивинский В.И., Стукин С.А. и др. Теплофизические условия гарантированного ввода ультразвука в расплавленные металлы и сплавы / В сб. «Динамические эффекты мощного ультразвука». – Ижевск, 1998. – С. 49–57.
4. Шияев А.С., Ивинский В.И., Шарин Ю.Е. и др. А.с. №1016912 СССР. Способ износостойкой наплавки.
5. Шелег В.К., Шияев А.С., Стукин С.А., Стукин А.С. Способ стабилизации резонансного режима работы ультразвуковой колебательной системы. Положительное решение от 3 августа 1991 на выдачу патента по заявке №4922602/02/124832.
6. Акулович Л.М., Шияев А.С. и др. Пат. РБ 3906. Способ наплавки.
7. Старк Б.В., Миркин И.Л., Романский А.Н. Сб. трудов Московского ин-та стали. Вып.7, 1935.
8. Шияев А.С., Ивинский В.И., Шарин Ю.Е. и др. А.с. №290523 СССР. Устройство ввода ультразвуковых колебаний в жидкую среду.
9. Бергман Л.Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Пер. с нем. под общ. ред. В.С.Григорьева. – М.: Ил. – 1957. – 725 с.
10. Шияев А.С., Седлов Л.М., Упшинский Е.А. Улучшение свойств стали путем обработки расплава ультразвуком. – Производственно-технический бюллетень: ГКОТ, № 11, 1964. – С.18–21.
11. Лыков А.В. Теплообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1978. – 211 с.
12. Казинцев В.Г., Карташов В.В. и др. Пат. 8117931 СССР. Способ автоподстройки частоты источника питания резонансной колебательной системы.
13. Шияев А.С., Седлов Л.М., Упшинский Е.А. Улучшение свойств стали путем обработки расплава ультразвуком. – Производственно-технический бюллетень: ГКОТ, № 11, 1964. – С.18–21.
14. Физика и техника мощного ультразвука. Источники ультразвука / Под общ. ред. проф. Розенберга. – М.: Наука, 1967. – Т. 1. – 378 с.
15. Шияев А.С., Кажуро Л.М., Лугаков Н.Ф. и др. Состояние и пути совершенствования электромагнитной наплавки: материалы, технология и инструмент. Т. 3, № 2, 1998. – С. 72.