

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

Ю.В. Петров, А.В. Шушарин, В.Ф. Божко

Представлены результаты экспериментальных исследований по изучению импульсов продольных волн, возбуждаемых в металле коротким лазерным импульсом. Исследовано влияние интенсивности излучения лазера, размера пятна облучения, угла излучения на амплитуду, форму и длительность импульса. Результаты обсуждены, исходя из модели термоакустического излучателя в виде нагретого лазерным импульсом тонкого диска металла, в котором вследствие действия термоупругого и гидродинамического механизмов генерации, возникает импульс радиальных и осевых механических напряжений.

Использование ОКГ для возбуждения ультразвука в металлах в сочетании с оптимальной регистрацией коротких ультразвуковых импульсов дает возможность создать контролируемую аппаратуру с повышенной разрешающей способностью и уменьшенной «мертвой» зоной. С этой целью в настоящей работе проведены экспериментальные исследования продольных ультразвуковых волн, возбуждаемых термооптическим излучателем.

Диаграмма направленности термооптического излучателя

Эффективная работа аппаратуры для лазерной генерации и бесконтактной регистрации ультразвука с целью контроля материалов и изделий достигаются в результате оптимизации их конструкции, основанной, как правило, на исследовании характеристик направленности термооптических излучателей. Исследования проводились на стенде, описанном в [1]. В качестве образца использовался полуцилиндр из сплава Д-16 радиусом 40 мм. Излучение лазера фокусировалось в центр грани в пятно нужного диаметра. Прием осуществлялся либо широкополосным электромагнитоакустическим преобразователем (ЭМАП) с высокочастотным индуктором в виде прямого проводника длиной 15 мм, расположенного параллельно образующей полуцилиндра, либо поверхностно возбуждаемым толстым пьезопреобразователем (ПВПТ) [2]. Результаты эксперимента приведены на рис. 1а.

При малой интенсивности лазерного излучения, когда гидродинамический механизм генерации ультразвука еще не достиг своего максимума, амплитуда акустического импульса с ростом угла наблюдения меняется слабо, незначительно возрастает и уходит в ноль при угле наблюдения 90° . При больших значениях интенсивности лазерного излучения в диапазоне действия гидродинамического и испарительного механизмов генерации, амплитуда с увеличением угла наблюдения сначала несколько уменьшается. Но затем она увеличивается, достигает максимума в районе 30° и потом монотонно спадает. В диапазоне $60-70^\circ$ спад амплитуды замедляется, она остается почти без изменений, после этого уменьшается до нуля при 90° .

Полученные диаграммы направленности можно качественно объяснить, если принять за модель термооптического излучателя нагретый лазерным импульсом диск на поверхности металла. Толщина диска меняется в зависимости от глубины распространения тепла в металл и составляет несколько микрон. Основание диска равно сечению лазерного луча и его диаметр измеряется несколькими миллиметрами. Дно диска можно принять за поршневой излучатель импульсов сжатия и растяжения. Боковая поверхность диска нагрева является источником радиальных напряжений сжатия. Акустический импульс, излучаемый боковой поверхностью, можно представить как сумму импульсов от ее ближней и дальней частей, причем импульс от дальней части запаздывает на акустическую разность хода и имеет противоположную полярность. В результате в точку приема от боковой поверхности диска приходит также импульс сжатия и растяжения. Таким образом, импульсы от дна и от боковой поверхности диска нагрева имеют одинаковую полярность и длительность, но форма у них будет несколько разная.

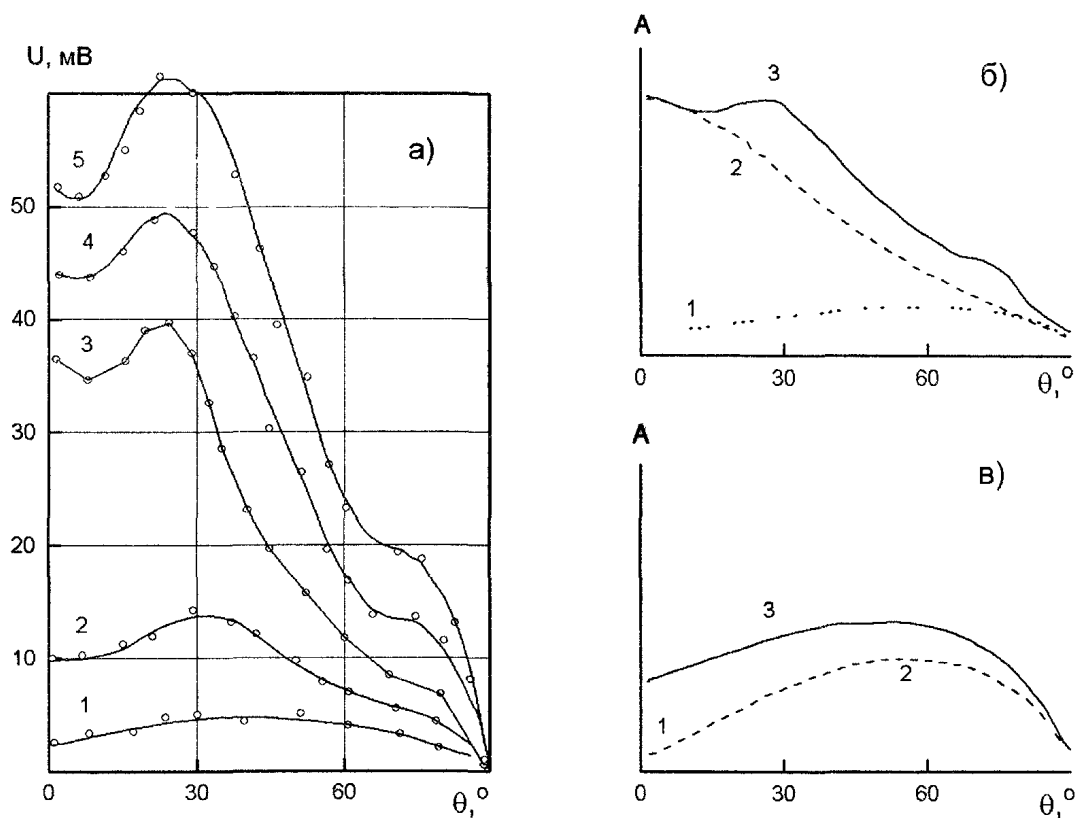


Рис. 1. а) экспериментальные диаграммы направленности термооптического излучателя диаметром 2 мм при разных интенсивностях лазерного излучения: 1 – 63, 2 – 120, 3 – 230, 4 – 300, 5 – 500 МВт/см²; б), в) качественное сложение диаграмм направленности от дна (2) и боковой поверхности (1) диска нагрева при интенсивности лазерного излучения соответственно больше и меньше 120 МВт/см²

Итак, диаграмму направленности термооптического излучателя можно представить как суперпозицию диаграмм направленности дна и боковой поверхности. При термоупругом механизме генерации ультразвука главную роль играет излучение от боковой поверхности диска нагрева. На оси термооптического излучателя амплитуда излучения небольшая, так как обусловлена излучением только от дна. С увеличением угла наблюдения амплитуда излучения от дна падает, но зато увеличивается амплитуда излучения от боковой поверхности диска. Результат сложения этих двух излучений и будет определять результирующую диаграмму направленности (рис. 1в). Она неплохо согласуется с экспериментальной диаграммой направленности при малой интенсивности лазерного излучения. Чем меньше интенсивность лазерного излучения, тем меньше влияние излучения от дна и тем ближе максимум диаграммы направленности будет располагаться к максимуму излучения от боковой поверхности (угол 65°).

При реализации гидродинамического и испарительного механизмов генерации ультразвука, определяющим является излучение от дна диска, поэтому результат сложения акустических импульсов от дна со сравнительно большой амплитудой и от боковой поверхности с малой амплитудой будет определять результирующую диаграмму направленности (рис. 1б). Она хорошо согласуется с экспериментальной диаграммой направленности для больших интенсивностей лазерного излучения. Медленный спад амплитуды в области 60–70° обусловлен максимумом излучения от боковой поверхности диска.

Были проведены исследования по влиянию размеров лазерного пятна на диаграмму направленности при постоянной интенсивности лазерного излучения. С этой целью лазерный луч перекрывался диафрагмой с отверстиями разного диаметра. На рис. 2а приведены результаты эксперимента. Видно, что чем больше диаметр пятна, тем больше амплитуда акустических импульсов. Качественно это можно объяснить также с помощью модели термооптического излучателя. В направлении оси диска нагрева излучает только дно, и амплитуда этого излучения пропорциональна площади дна диска (или квадрату диаметра пятна (рис. 2в). В направлении угла наблюдения 70° излучением от дна можно пренебречь по сравнению с излучением от боковой поверхности. Тогда амплитуда результирующего излучения должна быть пропорциональна площади бо-

ковой поверхности или диаметру пятна (рис. 2б). Таким образом, проведенный эксперимент подтверждает наличие двух излучающих ультразвук источников.

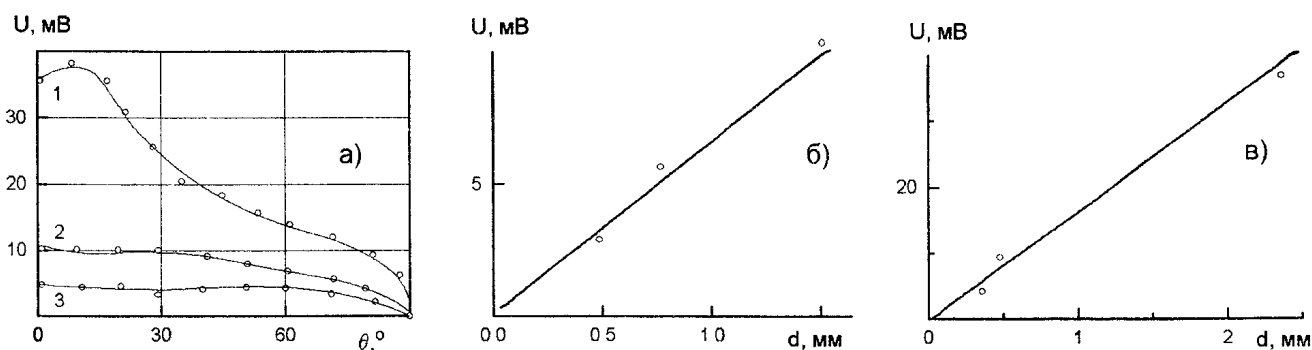


Рис. 2. а) диаграммы направленности термооптического излучателя диаметром 1 – 1.5 мм, 2 – 0.8 мм, 3 – 0.5 мм при интенсивности лазерного излучения 300 МВт/см²; б), в) зависимости амплитуды акустического импульса от диаметра и его квадрата светового пятна для $\theta = 70^\circ$ и $\theta = 0^\circ$

Длительность акустических импульсов, излучаемых термооптическим источником

Результаты эксперимента по выяснению зависимости длительности импульсов, излучаемых термооптическим источником ультразвука, от угла наблюдения приведены на рис. 3. Видно, что акустический импульс состоит из отрицательного полупериода длительностью примерно 50 нс и положительного полупериода, втрое большей длительности и в два раза меньше по амплитуде. Это хорошо согласуется с моделью термооптического излучателя, если считать, что акустические импульсы, излучаемые дном и боковой поверхностью диска нагрева являются импульсами сжатия–растяжения, незначительно отличающимися по форме. Накладываясь, они и дают результирующий импульс сжатия–растяжения. Длительность такого импульса равна сумме длительностей импульса напряжений τ_0 в диске нагрева и времени задержки импульса от дальней части диска нагрева относительно импульса от его ближней части, т.е.

$$\tau = \tau_0 + \frac{d \sin \theta}{V_l},$$

где d – диаметр светового пятна; θ – угол наблюдения; V_l – скорость продольных волн в образце.

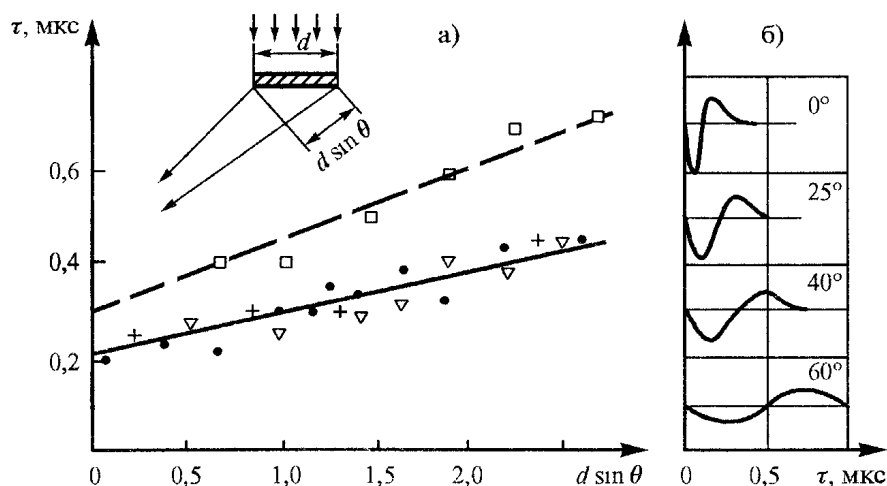


Рис. 3. Зависимость длительности акустического импульса: а) от акустической разности хода (интенсивность лазерного излучения 500 МВт/см², диаметр светового пятна 2 мм); б) от угла наблюдения (интенсивность лазерного излучения 250 МВт/см², диаметр светового пятна 2 мм);

Это значит, что длительность результирующего импульса с увеличением угла наблюдения должна линейно расти. Приведенные экспериментальные данные по зависимости длительности импульса от угла наблюдения (рис. 3б) и от акустической разности хода крайних лучей (рис. 3а)

подтверждают это. Несмотря на относительно большой разброс экспериментальных точек, угловой коэффициент по величине близок к обратной скорости продольных волн дюралюминия – 6,26 мм/мкс. График, построенный по данным, полученным с помощью ЭМАП с высокочастотным индуктором в виде проводника длиной $l = 15$ мм, располагается примерно на 150 нс выше графика для ПВТП. Это обусловлено тем, что акустические импульсы достигают края индуктора при акустическом пути $R = 40$ мм на время

$$\frac{l^2}{4RV_l} = 130 \text{ нс}$$

позже, чем до центра индуктора. Если учесть, что при диаметре ПВТП равном 8 мм также существует разность времени прихода акустических импульсов в центр и на край, равной 30 нс, то время существования импульса напряжений в диске нагрева будет

$$\tau_0 = 210 - 30 = 180 \text{ нс.}$$

Это примерно в три раза превышает длительность лазерного импульса.

Влияние размера светового пятна на амплитуду акустических импульсов от термооптического излучателя

Ультразвук возбуждался в дюралюминиевом бруске толщиной 26 мм. Размер светового пятна изменялся перемещением образца, относительно собирающей линзы с фокусным расстоянием 180 мм. Так как термооптический излучатель обладает осевой симметрией, то прием возбуждаемых им продольных волн удобно осуществлять с помощью ЭМАП с высокочастотным индуктором в виде проводящего витка. Размер витка обусловлен параметрами магнитной системы ЭМАП и равен 8 мм. В этом случае все элементы индуктора работают синфазно и обеспечивают оптимальный прием продольных волн, излученных под углом 12° . При таком малом угле излучение ультразвука от диаметрально противоположных элементов боковой поверхности диска нагрева практически компенсируются. Таким образом, регистрируемые акустические импульсы • обусловлены импульсами напряжений сжатие–растяжение у дна и повторяют их форму.

Результаты эксперимента, приведенные на рис. 4а можно объяснить, исходя из принятой модели термооптического излучателя. Основной вклад в результирующее излучение вносит дно диска нагрева. По мере удаления образца от линзы амплитуда акустического импульса должна уменьшаться, так как уменьшается диаметр светового пятна, а значит и площадь излучающей поверхности дна. Однако, при постоянной энергии лазерного излучения, его интенсивность (энергия на единицу площади) увеличивается. Таким образом, влияние интенсивности лазерного излучения оказывается более сильным и в результате амплитуда акустического импульса с уменьшением диаметра пятна увеличивается. Особенно сильный рост наблюдается при энергии лазерного излучения 0,26 Дж и диаметре пятна менее 2 мм. Поверхностная плотность тепловой мощности при этом достигает 100 МВт/см^2 . Учитывая результаты исследования, изложенные в предыдущем разделе, можно считать, что основной вклад в излучение акустических волн термооптическим источником, вносит гидродинамический механизм генерации напряжений.

Достигнув максимума при диаметре пятна 1,8 мм и плотности потока излучения 300 МВт/см^2 , амплитуда импульса несколько уменьшается вплоть до пятна минимального диаметра. Происходит это потому, что при росте плотности потока лазерного излучения более 300 МВт/см^2 , амплитуда акустического импульса возрастает, но более медленней, так как начинает проявляться влияние на излучение уменьшение площади поверхности пятна. При меньших энергиях лазерного импульса максимум амплитуды сдвигается в область меньших диаметров, вплоть до минимального.

Дальнейшее увеличение расстояния между линзой и образцом приводит к расфокусировке светового пятна и увеличения его диаметра. При этом амплитуда акустического импульса в зависимости от энергии лазерного излучения, либо сразу уменьшается, либо сначала увеличивается, достигая максимума, а затем уменьшается. Чем меньше энергия лазерного импульса, тем ближе максимум амплитуды к пятну наименьшего диаметра.

Из приведенных графиков видно, что при больших энергиях лазерного импульса при одном и том же диаметре светового пятна, амплитуда акустического импульса после фокуса линзы больше, чем до фокуса. Связано это, очевидно, с тем, что луч лазера несколько расходится, и его центральная (внутренняя) часть имеет большую, по сравнению с внешней, интенсивность. После

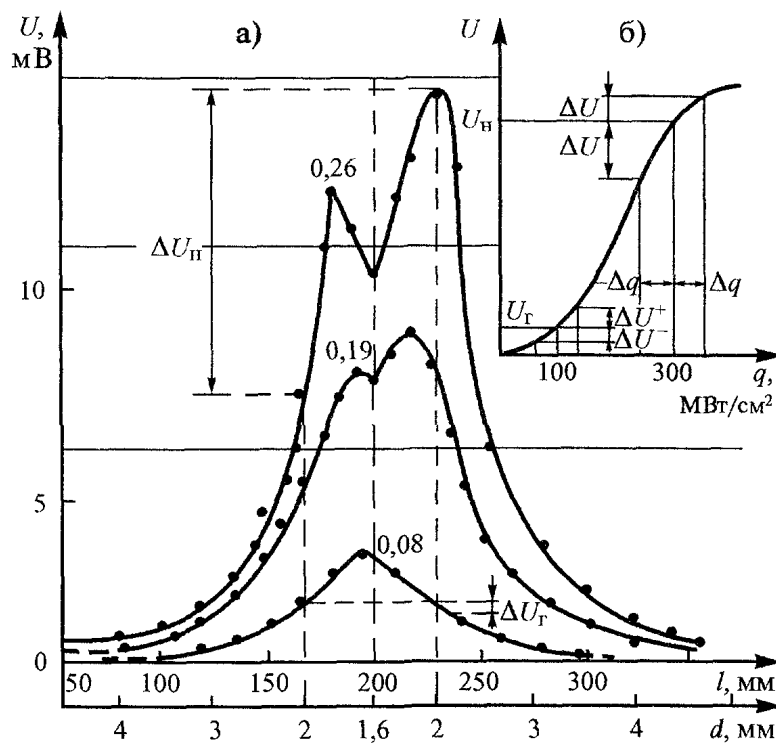


Рис. 4. Зависимость амплитуды акустических импульсов от диаметра пятна облучения или от расстояния между линзой и образцом

При небольших энергиях лазерного излучения близка к плотности потока насыщения $\langle q \rangle_{\text{нас}} = 300$ МВт/см и амплитуда акустического импульса от светового пятна диаметром 2 мм после фокуса равна $U_{\text{нас}}$. От пятна такого же диаметра, но до фокуса средняя плотность потока такая же, но в его центре она больше на величину Δq^+ , а по его поверхностным краям меньше на величину Δq^- . В результате, это приводит к небольшому росту амплитуды акустического импульса от центра диска нагрева на величину ΔU^+ и более сильному спаду амплитуды от его периферийной части ΔU^- , т.е. $|\Delta U^+| < |\Delta U^-|$. Таким образом, амплитуда акустического импульса от всего излучателя до фокуса меньше, чем после фокуса.

При небольших энергиях лазерного излучения (до 0,08 Дж) амплитуда акустических импульсов с уменьшением размера светового пятна, растет более медленно и достигает максимума при его минимальном диаметре. Но для пятен после фокуса линзы амплитуда несколько меньше, чем для пятен такого же диаметра после фокуса. Связано это с тем, что при поверхностной плотности потока излучения около 100 МВт/см² происходит резкое увеличение амплитуды акустических импульсов U_r (рис. 46). Поэтому увеличение излучения от центральной поверхности диска нагрева до фокуса линзы превышает спад излучения от его периферийной части $|\Delta U^+| > |\Delta U^-|$.

Влияние интенсивности лазерного излучения на амплитуду акустических волн

Интенсивность лазерного излучения регулировалась с помощью оптического аттенюатора. Результаты эксперимента приведены на рис. 5. Полученные зависимости можно качественно объяснить на основе принятой модели термооптического излучателя в виде диска нагрева. В точку приема приходят акустические импульсы под углом не более 12°. Так как в этом случае основной вклад в акустическое излучение вносит дно диска, то форма регистрируемого импульса колебательной скорости упругого смещения повторяет форму осевых напряжений у дна диска. В диапазоне действия термоупругого механизма генерации ультразвука амплитуда акустических импульсов растет прямо пропорционально интенсивности. Угловой коэффициент прямо пропорционален площади дна или квадрату диаметра светового пятна. При интенсивности лазерного излучения более 50 МВт/см² в световом пятне начинают наблюдаться яркие вспышки и амплитуда растет более быстро. Это значит, что в отдельных точках поверхности металла начинается процесс его плавления и вступает в действие более эффективный гидродинамический механизм генерации осевых напряжений. При интенсивности лазерного излучения до 300 МВт/см² ампли-

прохождения линзы внешняя часть луча, преломившись сильнее, сфокусируется несколько дальше за фокусом линзы, чем внутренняя, и окажется в центре луча. В результате интенсивность излучения по сечению луча выравнивается. Это хорошо подтверждается визуальными наблюдениями. Выравнивание интенсивности приводит к тому, что радиальные напряжения у боковой поверхности диска нагрева увеличиваются и, как следствие этого, увеличивается и амплитуда акустического импульса. Сказанное выше можно проиллюстрировать рис. 4б, где качественно показано изменение амплитуды акустического импульса при неравномерном и равномерном распределении интенсивности излучения.

Пусть средняя плотность

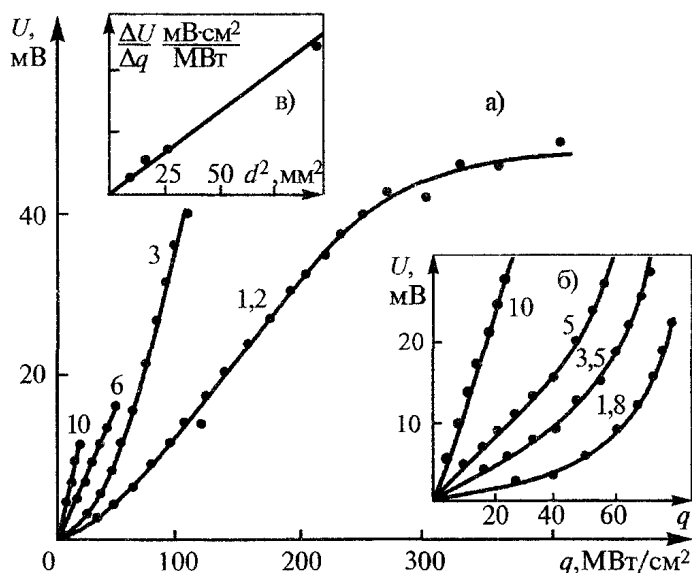


Рис. 5. Зависимости амплитуды акустических волн от интенсивности лазерного излучения, построенные в разных масштабах (а, б); зависимость амплитуды от квадрата диаметра пятна облучения (в)

туда акустического импульса быстро растет по линейному закону. При значениях интенсивности излучения лазера более 300 MW/cm² рост амплитуды замедляется. Это может быть связано с потерями энергии на испарение металла и экранированием светового пятна облаком образующейся плазмы.

Выводы

Проведено экспериментальное исследование диаграмм направленности термооптического излучателя продольных акустических волн при разных механизмах лазерной генерации упругих напряжений в металле. Найдены зависимости возбуждаемых акустических волн от угла наблюдения. Выяснено влияние размеров светового пятна на их амплитуду. Результаты экспериментов качественно объяснены с помощью принятой модели термооптического излучателя акустических волн в виде диска нагрева на поверхности металла.

Полученные результаты исследований могут успешно использоваться как в дальнейших теоретических исследованиях термоакустического преобразования в металлах с помощью лазеров, так и в прикладной лазерной ультразвуковой дефекто- и спектроскопии при конструировании и изготовлении средств неразрушающего контроля с улучшенными техническими характеристиками.

Литература

1. Волегов Ю.В., Петров Ю.В., Шушарин А.В. О механизмах возбуждения механических волн импульсами оптического квантового генератора // *Физические методы испытания материалов и веществ. Тематический сборник научных трудов*. – Челябинск. ЧГТУ, 1992. – С. 62–82.
2. Королев М.В., Карпельсон А.Е. Широкополосные ультразвуковые преобразователи. – М.: Машиностроение, 1982. – 157 с.