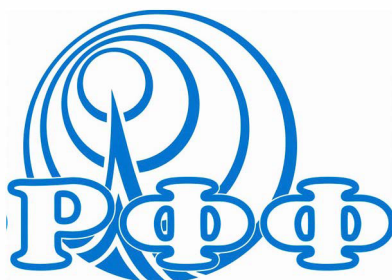




Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**



**Радиофизический
факультет**



8-я Международная научно-практическая конференция

**Актуальные проблемы радиофизики
АПР 2019**

Сборник трудов конференции



**РОССИЙСКИЙ ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**1-4 октября 2019 года
г. Томск**

УДК 537.86; 621.38.01:53; 621.396.67; 621.372.8;
621.3.029.6; 621.396.91/.96; 535.14;
535.33:621.373.8 А 43
А 43

А 43 Актуальные проблемы радиофизики : VIII
Международная научно-практическая конференция, г.
Томск, 1–4 октября 2019 г. Сборник трудов. – Томск :
Издательский дом ТГУ, 2019. – 490 с.

В сборнике представлены доклады участников VIII Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы радиофизики 2019", проходившей в Томском государственном университете 1-4 октября 2019 г. на базе радиофизического факультета. Доклады отобраны Программным комитетом конференции.

Сборник представляет интерес для специалистов в области радиофизики, радиоэлектроники, оптики, твердотельной электроники и электромагнитной совместимости.

**УДК 537.86; 621.38.01:53; 621.396.67; 621.372.8;
621.3.029.6; 621.396.91/.96; 535.14;
535.33:621.373.8**

Редакционная коллегия:

Войцеховский А.В.

Гермогенов В.П.

Дунаевский Г.Е.

Колесник С.А.

Соловьев А.В.

Самохвалов И.В.

Завьялова К.В.

Шипилов С.Э.

Якубов В.П.

Возбуждение акустических сигналов при формировании поверхностных сплавов интенсивными импульсными электронными пучками

Соловьев Андрей Вениаминович

Марков Алексей Борисович

Максимов Олег Юрьевич

Яковлев Евгений Витальевич

Томский научный центр СО РАН

E-mail: andrio1974@gmail.com

Растущие требования современных технологий формирования новых материалов и покрытий требуют постоянного развития научных методов, средств контроля характеристик и свойств материалов во время их модификации. Воздействие на вещество интенсивными импульсными электронными пучками является универсальным способом модификации материала и формирования поверхностных сплавов различного состава. При импульсном воздействии электронным пучком в материале или формируемом покрытии возникают термоупругие напряжения, которые становятся источником акустических волн. Акустические волны, распространяющиеся из области взаимодействия, несут в себе информацию как об энергетических свойствах и пространственном распределении потока частиц, так и о термодинамических процессах при формировании поверхностных сплавов. Этот акустический эффект может стать основой нового метода исследования свойств новых материалов и процессов при их формировании.

В настоящее время особый интерес представляют алюминидные интерметаллические соединения, такие как NiAl и Ni₃Al. Перспективность их использования заключается в необходимости создания следующего поколения высокотемпературных и высокопрочных конструкционных материалов. Выбор алюминидных интерметаллических соединений обоснован высокими температурами плавления, относительно низкими плотностями, хорошей прочностью и стойкостью к окислению. Данные интерметаллические материалы имеют большой потенциал применения в автомобильных двигателях, самолетах, а также в оборудовании для производства и преобразования энергии.

При воздействии импульсного электронного пучка на твердое тело в нем формируются акустические волны, амплитуда которых пропорциональна плотности мощности излучения. Для измерения распределения энергии импульсного электронного пучка в поперечном сечении предлагается использовать радиационно-акустическую диагностику [1]. Радиационно-акустическая диагностика основана на регистрации возникающих в мишени акустических волн при диссипации энергии импульсного электронного пучка. Это, так называемый, радиационно-акустический эффект.

Общий вид установки РИТМ-СП приведен на рисунке 1 [2]. Основной частью источника низкоэнергетического сильнотоочного электронного пучка является электронная пушка со взрывоэмиссионным катодом и плазменным анодом на основе сильнотоочного отражательного разряда. Корпус электронной пушки представляет собой трубу внутреннего диаметра 156 × 320 мм из нержавеющей стали. Пушка пристыкована к вакуумной рабочей камере диаметром 251 × 226 мм. Эмиттером электронов служит многопроволочный медный катод, изготовленный из оплетки радиочастотного кабеля. Свернутая в рулон оплетка помещается в чашеобразную обойму из нержавеющей стали. Диаметр эмитирующей части катода составляет 62 мм.

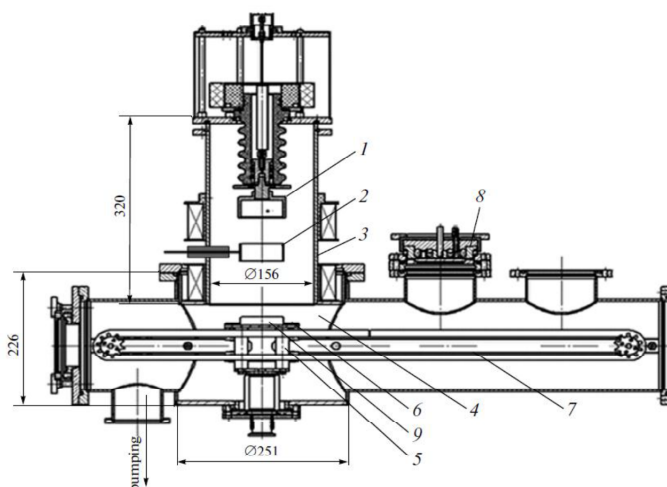


Рис.1. Общий вид установки РИТМ-СП. 1 – взрывоэмиссионный катод; 2 – анод; 3 – корпус пушки; 4 – вакуумная камера; 5 – медный стержень; 6 – рабочий стол; 7 – цепная передача; 8 – магнетрон; 9 – образец.

Плазменный анод формируется с помощью сильноточного (200–250 А) отражательного разряда в аргоне при давлении 0.03–0.07 Па. Разряд зажигается при подаче на анод импульса напряжения положительной полярности амплитудой 5 кВ. Анод представляет собой тонкостенное кольцо с внутренним диаметром 62×30 мм из нержавеющей стали. Для откачки вакуумной камеры используется вакуумный пост HiCube Eco (“Pfeiffer Vacuum”, Австрия–Германия), в состав которого входят турбомолекулярный насос со скоростью откачки 67 л/с и форвакуумный диафрагменный насос (0.25 л/с).

Для радиационно-акустической диагностики физико-химических процессов, происходящих при формировании поверхностных сплавов Ni-Al интенсивными электронными пучками, предложена схема трехкомпонентной регистрации акустических волн Рис.3.

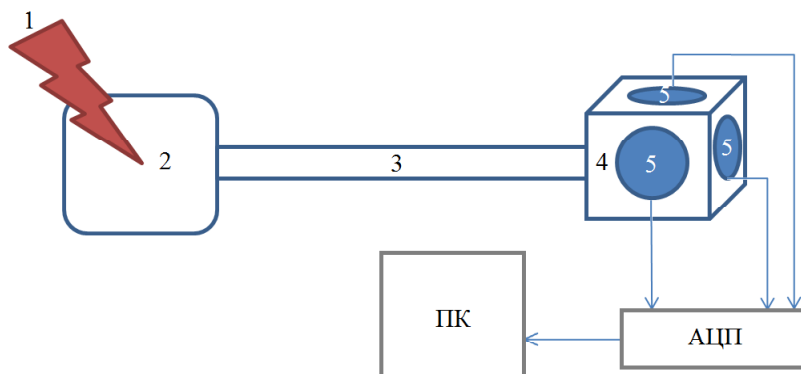


Рис.2. Схема регистрации акустических волн, формируемых МИП. 1 – интенсивный электронный пучок, 2 – мишень из низкоуглеродистой стали, 3 – медный проводник, 4 – металлический куб, 5 – пьезодатчики.

Мишень (2) располагается перпендикулярно интенсивному электронному пучку (1). Мишень жестко соединена с медным проводником (3) прямоугольного сечения 1×5 мм и длиной 3 м. На другом конце проводник жестко закреплен с тремя перпендикулярно расположенными пьезоэлектрическими преобразователями (5) на металлическом кубе (4). Электрические аналоговые сигналы от каждого пьезоэлектрического преобразователя после предварительного усиления поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и далее уже в цифровом виде поступают в базу данных на персональном компьютере (ПК).

Так как скорость звука в меди равна 3790 м/с, то задержка акустической волны при распространении в проводнике длиной 3 м будет составлять 0.88 мс. Это позволяет регистрировать акустические сигналы после электромагнитных помех, возникающих при формировании низкоэнергетического сильноточного электронного пучка.

Поскольку период ударной акустической волны от интенсивного электронного пучка составляет порядка 25 мкс, а частоты акустических сигналов при формировании поверхностного сплава составляют порядка 11–22 кГц, то частота Найквиста для регистрируемых акустических сигналов будет порядка 80 кГц, что нужно учитывать при выборе частоты преобразования АЦП. На рисунках 3 и 4 показаны характерные формы сигналов с пьезодатчиков [3, 4].

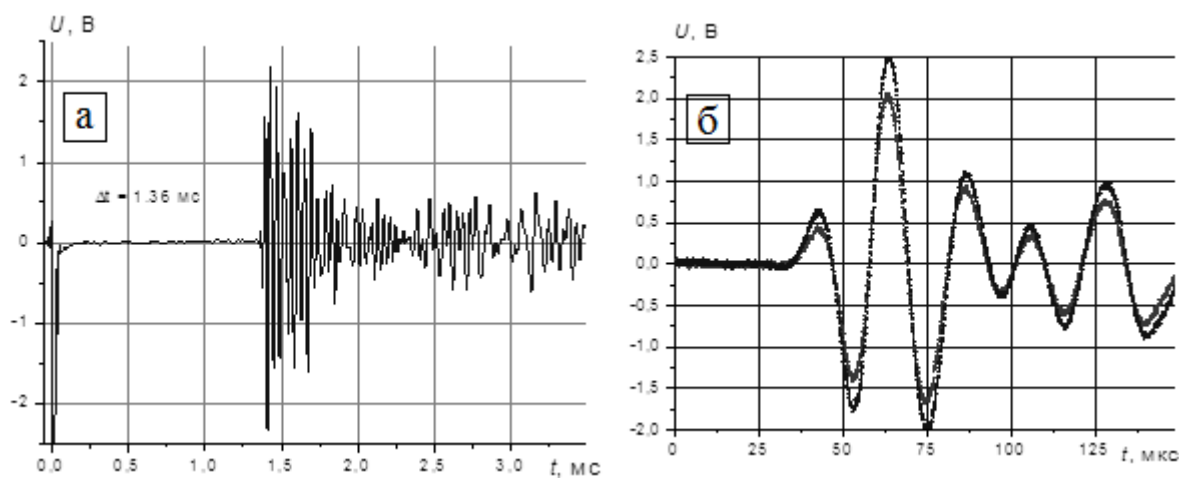


Рис.3. Осциллограммы сигнала с пьезодатчика с низким (а) и высоким (б) временным разрешением, 2 импульса.

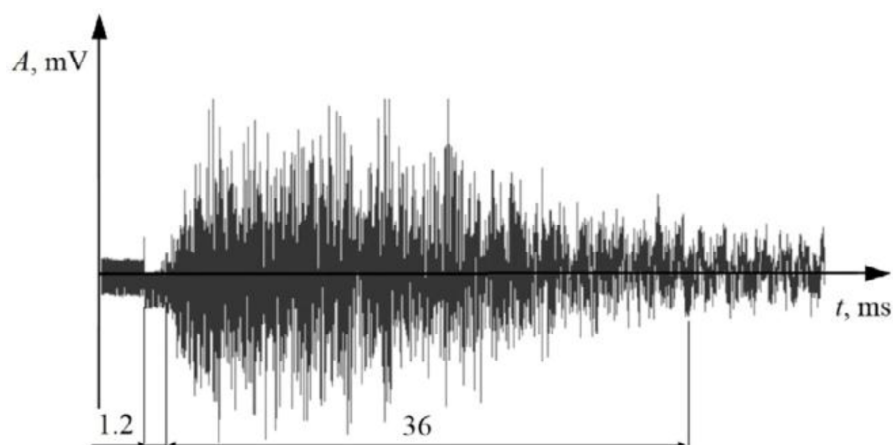


Рис.4. Пример записи виброакустического сигнала после импульса: 1,2 мс - время от момента возникновения электромагнитных помех до начала записи сигнала; 36 мс - время нахождения основной энергии вибрационного сигнала.

Для расчета давления в области генерации акустических волн по амплитуде сигнала, поступающего с пьезодатчика, необходимо знать чувствительность датчика. Для калибровки мы использовали метод падающей массы. Количественно пьезоэффект характеризуют пьезомодулем d :

$$d = \frac{q}{F} = \frac{C \cdot U(t)}{F(t)} \quad (1)$$

где q — возникающий заряд, F — модуль деформирующей силы, C — емкость пьезодатчика, $U(t)$ — регистрируемая разность потенциалов на электродах пьезодатчика.

Тогда сила, действующая на пьезодатчик, связана с регистрируемым напряжением соотношением:

$$F(t) = \frac{C \cdot U(t)}{d} = kU(t), \quad (2)$$

где k — коэффициент чувствительности пьезодатчика, Ньютон/В.

Коэффициент чувствительности пьезодатчика равен:

$$k = \frac{F(t)}{U(t)} = \frac{a \cdot m}{U(t)} = \frac{m \cdot \Delta v}{U(t) \cdot \Delta t} \quad (3)$$

где a — ускорение, m — масса груза, Δv — изменение скорости груза за время Δt .

При калибровке пьезодатчика подвешенный на нити груз падает с высоты h , ударяясь о плоскость торца датчика. Скорость груза при этом меняется от максимальной до нуля и изменение скорости в соотношении (3) равно скорости груза в нижней точке. Ее можно определить из закона сохранения энергии. Тогда из соотношения (3) получим (при отсутствии отскока):

$$k = \frac{m \cdot \sqrt{2gh}}{U(t) \cdot \Delta t} \quad (4)$$

В общем случае, при изменении силы, действующей на пьезодатчик (и соответственно регистрируемого напряжения):

$$k = \frac{m \cdot \sqrt{2gh}}{\int U(t) dt}; \quad [k] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{В} \cdot \text{сек}^2} = \frac{\text{ньютон}}{\text{В}} \quad (5)$$

На рисунке 5 показан характерный сигнал с пьезодатчика, полученный при калибровке методом падающей массы.

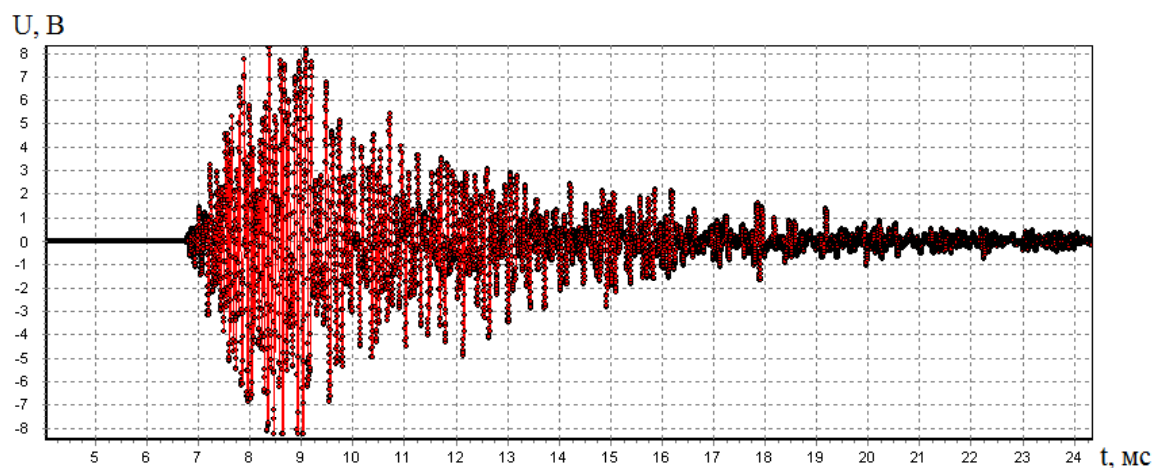


Рис.5. Пример записи виброакустического сигнала при калибровке методом падающей массы.

На следующем этапе была проведена серия экспериментов по регистрации акустических сигналов при воздействии на медный проводник интенсивным импульсным электронным пучком. Длительность импульсного воздействия составляла 1 мкс, энергия пучка – 22 кВт, что соответствует энергии формирования сплава NiAl. На рисунке 6 представлены характерные формы акустических сигналов при воздействии на проводник интенсивным импульсным электронным пучком для трех отдельных импульсов (выделены цветами). Обращает на себя внимание достаточно хорошее качественное и количественное соответствие временной формы акустических сигналов, что говорит о повторяемости и воспроизводимости результатов.

Акустический сигнал с пьезодатчика регистрировался через 0.87 мс после прохождения электромагнитных помех не связанных с акустической эмиссией в проводник, но которые можно использовать в качестве маркера для временной привязки начала процесса формирования акустического сигнала. Анализ временной формы акустических сигналов при воздействии интенсивным импульсным электронным пучком одинаковой мощности показал достаточно хорошее совпадение не только амплитудных, но и фазово-частотных характеристик акустических сигналов, что хорошо видно при сравнении трех отдельно зарегистрированных сигналов представленных на рисунке 7.

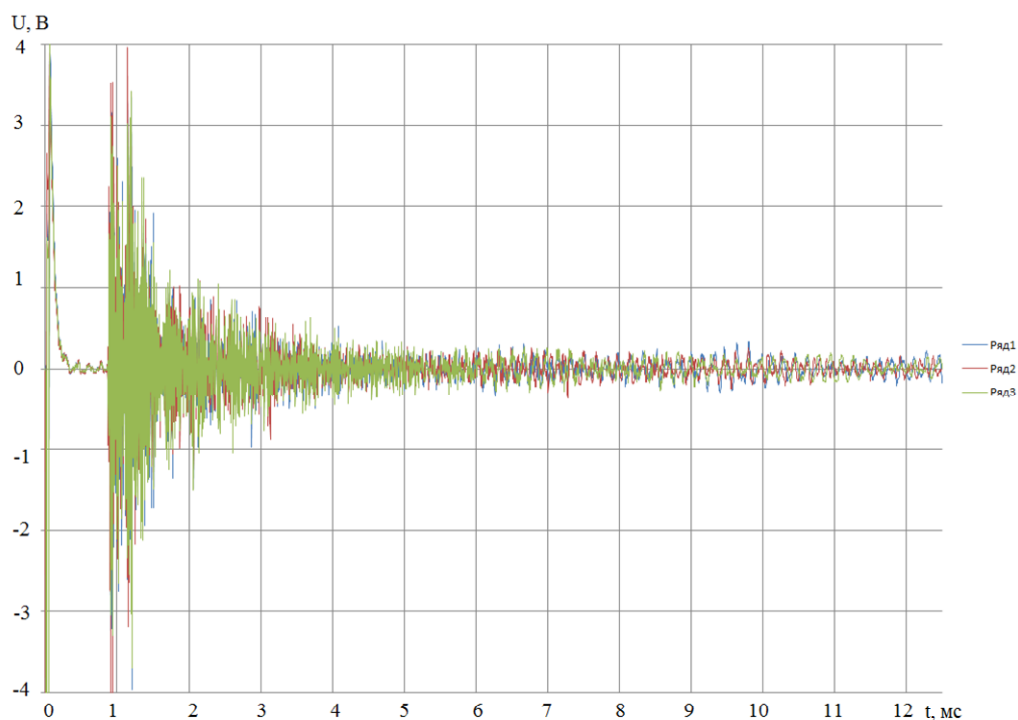


Рис.6. Акустические сигналы при воздействии на проводник интенсивным импульсным электронным пучком.

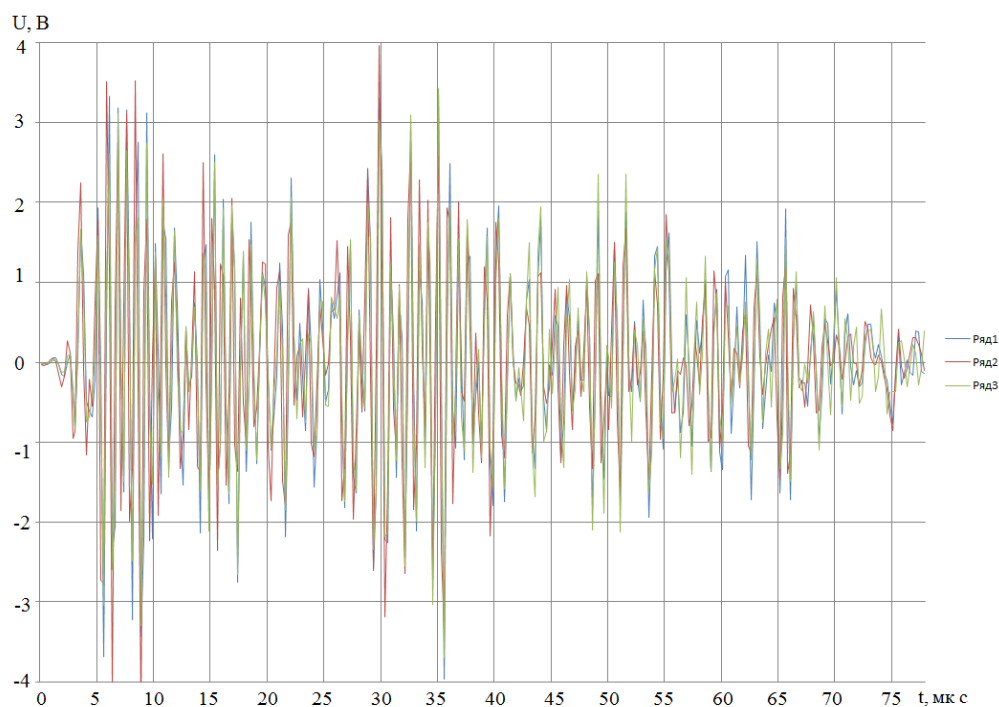


Рис. 7. Сравнение трех акустических сигналов при воздействии на проводник интенсивным импульсным электронным пучком.

Отслеживание изменений эффективного значения акустического сигнала в дальнейшем позволит выбирать оптимальные режимы облучения интенсивными электронными пучками. Кроме того, контроль виброакустического сигнала позволяет наблюдать ход превращений, происходящих при поверхностном электронно-лучевом легировании, включая оценку достаточности мощности подаваемых импульсов электронного излучения.

Список публикаций:

- [1] White R.M. // *J. Appl. Phys.* 1963. V. 34. P. 3559 – 3567.
- [2] Марков А.Б., Миков А.В., Озур Г.Е. Падей А.Г. // *ПТЭ*. 2011. № 6. С. 122-126.
- [3] Хайлов И.П. // *НИ ТПУ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук*. 2015. 115 с.
- [4] Sergey V. Fedorov, Mikhail P. Kozochkin, and Mikhail M. // *Mechanics & Industry*. 2018. V. 19. N. 7. AN. 702. P. 1-14.