



**Диссертация на соискание академической степени БАКАЛАВРА  
по направлению 15.03.03 «Прикладная механика»**

Расчетно-экспериментальное исследование и конечно-элементное  
моделирование скорости прохождения ультразвукового сигнала в  
пластически деформируемых образцах

**Выполнил студент группы 43602/2**

**Третьяков Д.А.**

**Руководитель, ассистент**

**Модестов В. С.**

Санкт-Петербург  
2016 год



## Содержание

1. Неразрушающий контроль
2. Акустоупругий эффект и метод акустоупругости
3. Параметры метода акустоупругости
4. Испытания на растяжение и разрыв алюминиевых образцов
5. Конечно-элементное моделирование прохождения продольной волны в изотропной среде
6. Выводы

## Неразрушающий контроль

- анализ надежности и основных рабочих характеристик всего объекта или его элементов, не связанный с выведением объекта из работы либо его демонтажем



Неверная оценка НДС конструкции приводит к аварийным ситуациям на производстве



# Акустоупругий эффект

Открыт Р.В. Бенсоном и В.Дж. Рилсоном в 1959 году

$$1D: \quad \boxed{v_{t\parallel} - v_{t\perp} \sim \sigma} \quad [1]$$

Акустическая анизотропия поперечных волн  $\mathbf{a}$  :

$$\boxed{a = \frac{t_{\perp} - t_{\parallel}}{(t_{\parallel} + t_{\perp})/2}}$$

## Метод акустоупругости

$V$  волн зависят от:

- $T$
- $\Delta h$



Безразмерный параметр  $\mathbf{a}$

Главное преимущество:

Исключаем их влияние  
из рассмотрения

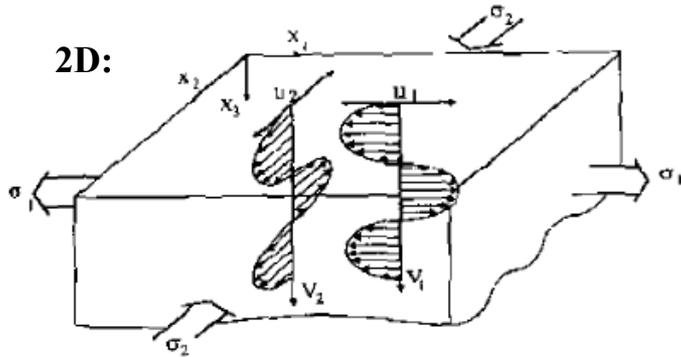
- Структуры
- $\sigma$



- исследуем

## Параметры метода акустоупругости

2D:



$$\begin{cases} \sigma_1 = K_1 \Delta_1 - K_2 \Delta_2 \\ \sigma_2 = K_1 \Delta_2 - K_2 \Delta_1 \end{cases} ,$$

где  $K_1, K_2$  - коэффициенты упруго-акустической связи (КУАС)

$$\begin{cases} K_1 = (k_1 - k_3) / ((k_1 - k_3)^2 - (k_2 - k_3)^2) \\ K_2 = (k_2 - k_3) / ((k_1 - k_3)^2 - (k_2 - k_3)^2) \end{cases} ,$$

где  $k_1, k_2, k_3$  - коэффициенты акустоупругой связи (КАУС)

$$\begin{cases} \Delta_1 = ((t_3 t_{01}) / (t_1 t_{03}) - 1) \\ \Delta_2 = ((t_3 t_{02}) / (t_2 t_{03}) - 1) \end{cases} , \quad \text{где } \Delta_1, \Delta_2 \text{ - акустические параметры}$$

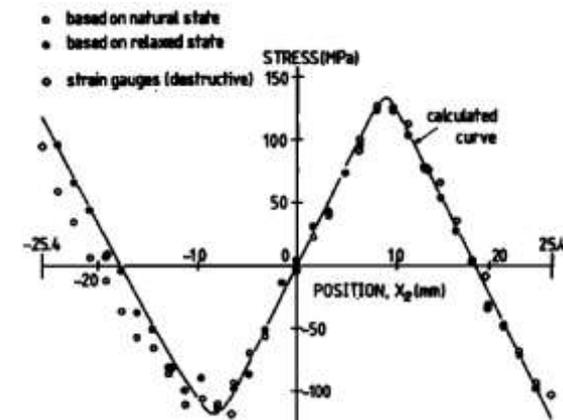
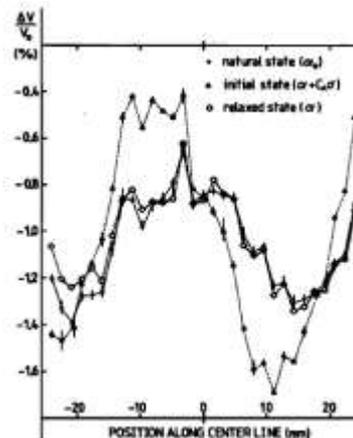
1D:

$$\sigma = D(a - a_0)$$

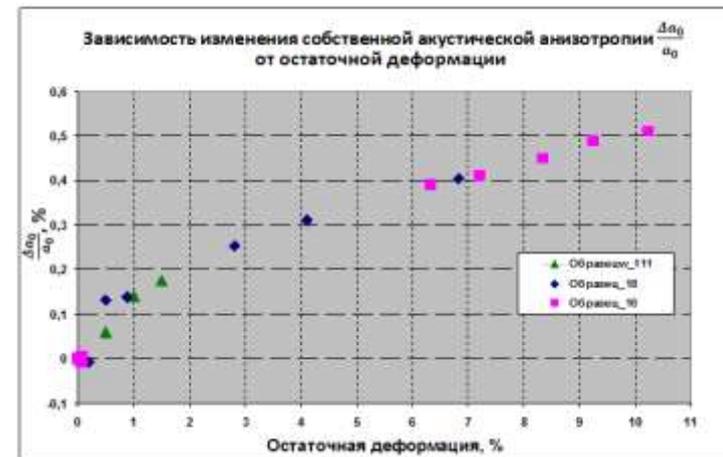
$$\begin{cases} D = 1 / (k_1 - k_2) \\ a_0 = (t_{20} - t_{10}) / t_{20} \\ a = (t_2 - t_1) / t_2 \end{cases} , \quad \text{где } D, a_0, a \text{ - параметры акустической анизотропии до и после возникновения искомого напряжения.}$$

## Современное состояние метода

*M. Hirao, Y. H. Pao.* Dependence of acoustoelastic birefringence on plastic strains in a beam,  
J. Acoust. Soc. Am. **1985**.

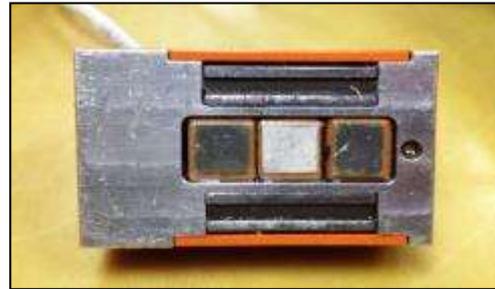


*Камышев А.В., Пасманик Л.А., Смирнов В.А.,  
Модестов В.С., Пивков А.В.*  
Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. **2015**.



*Н.Е.Никитина.* Акустоупругость. Опыт практического применения.  
Н.Новгород: ТАЛАН, 2005.208с.

# Испытания на растяжение и разрыв алюминиевых образцов



Ультразвуковой прибор ИН-5101А Пьезоэлектродатчики

Монотонное жесткое нагружение, последовательное приложение деформаций (шаг - 5 мм, 20 этапов нагружения) при постоянной скорости деформаций



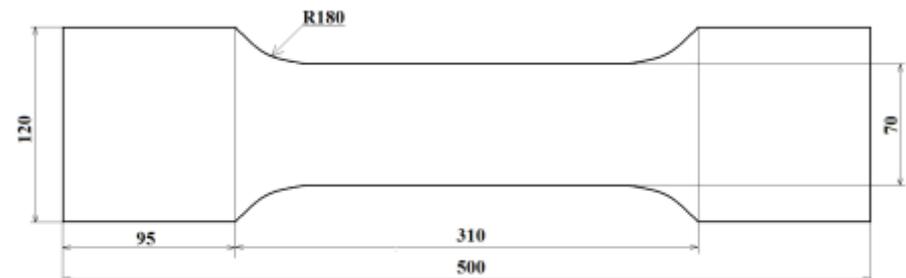
Гидравлическая разрывная машина Instron 8808



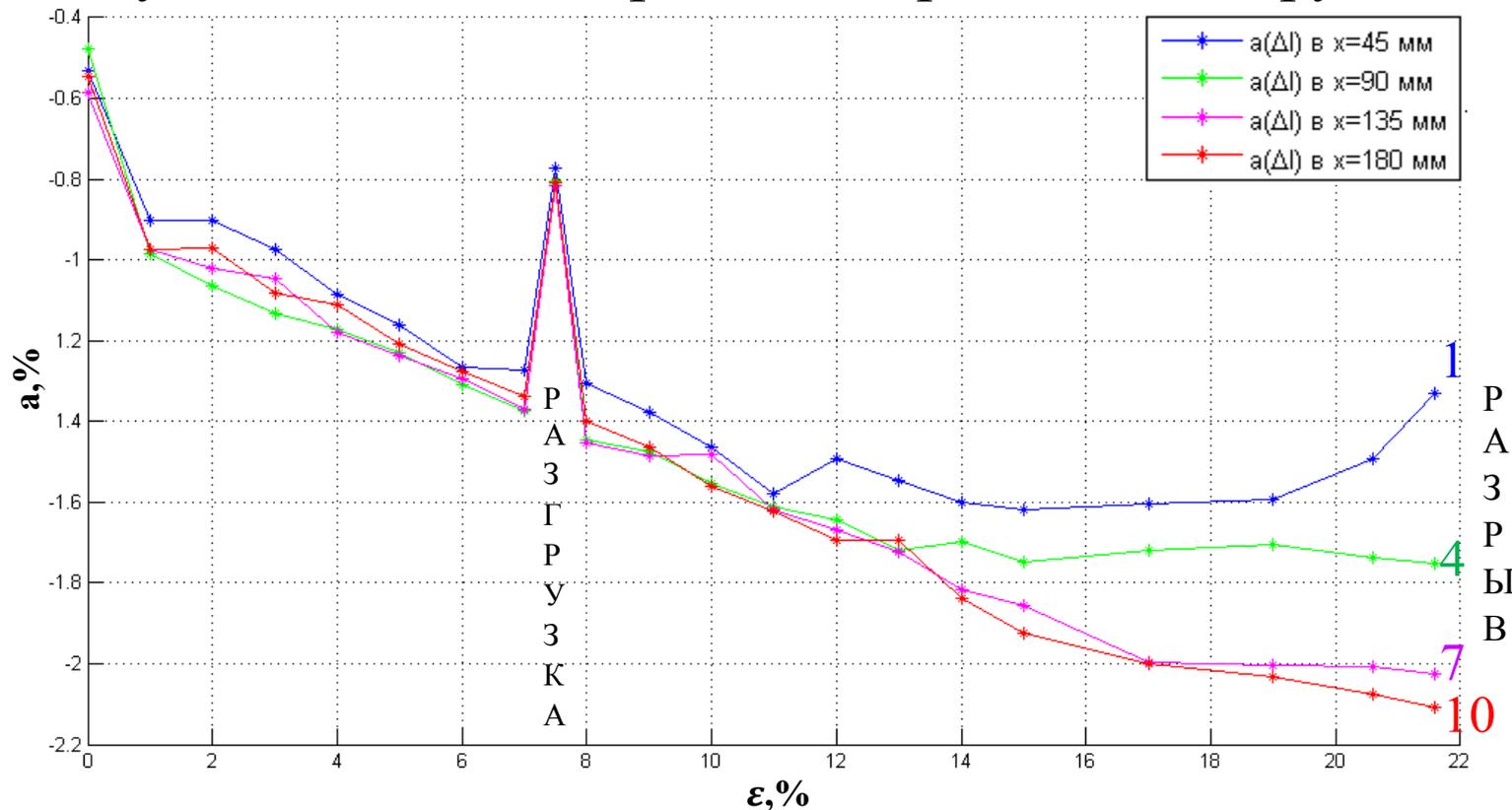
Установка датчика и проведение измерений

## Характеристики образцов:

Материал – алюминий АМц  
Модуль Юнга  $E = 81,21$  ГПа  
Предел текучести  $\sigma_y = 75$  МПа  
Коэффициент Пуассона  $\nu = 0,34$

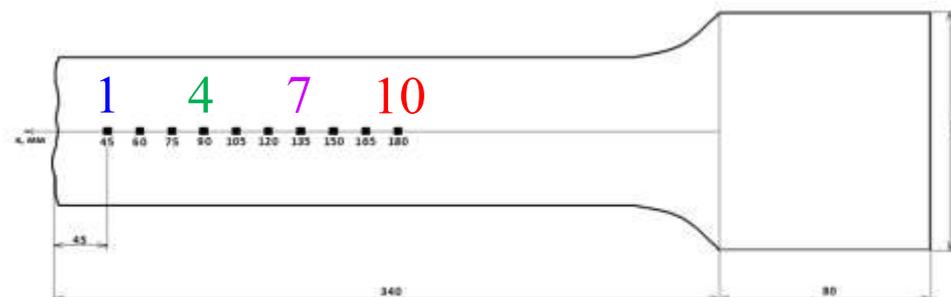


# Акустическая анизотропия в образце под нагрузкой

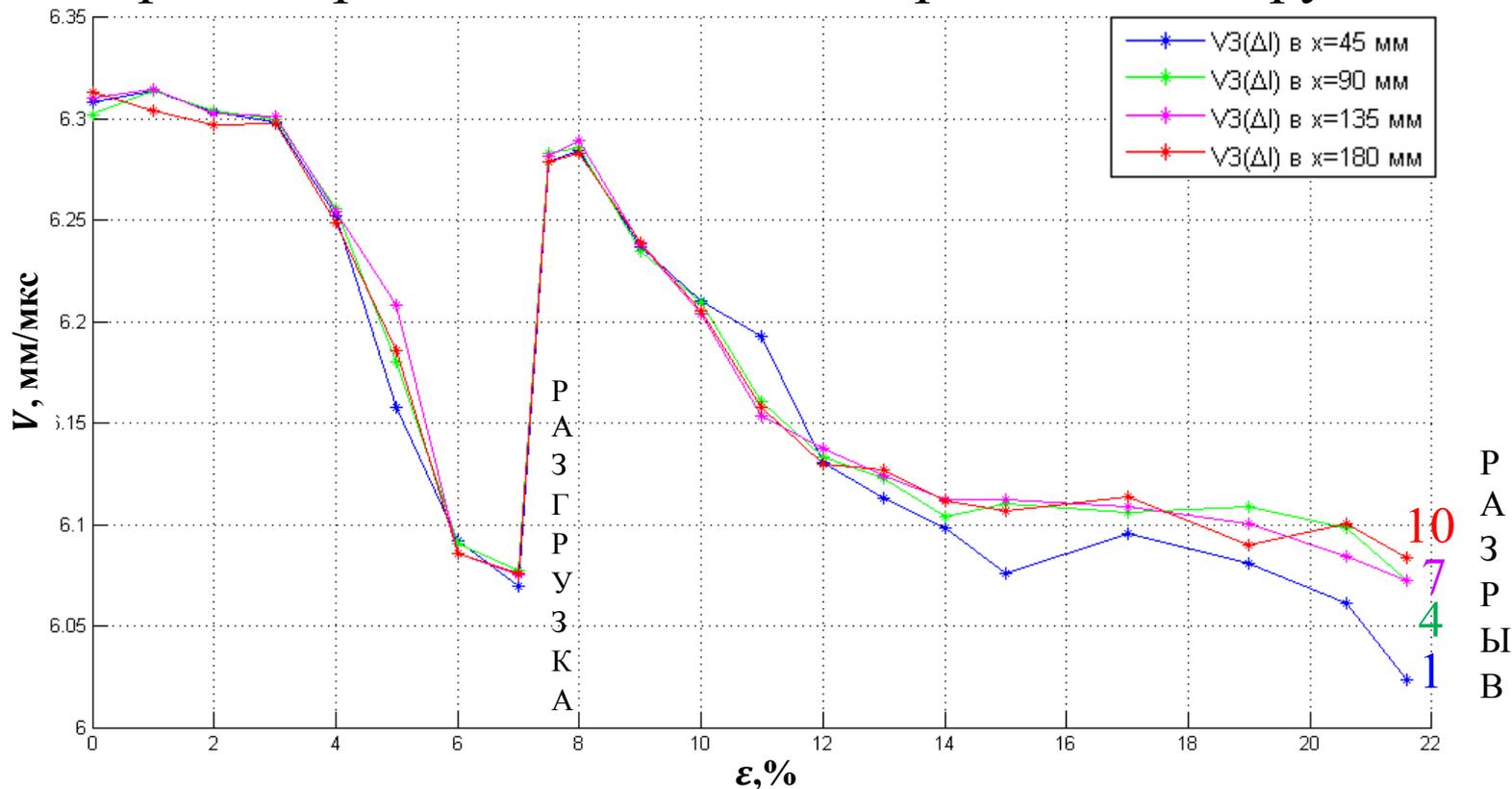


Акустическая анизотропия  $a$  на различных этапах нагружения

**Вывод:** В процессе нагружения величина акустической анизотропии вблизи области разрушения значительно отличается от анизотропии в удаленных от данной области точках

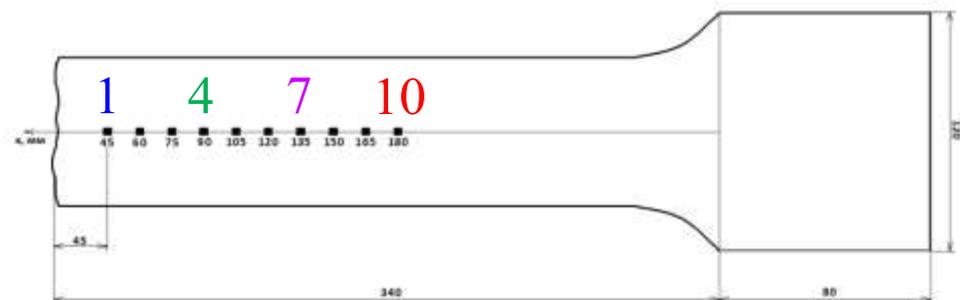


# Скорость продольной волны в образце под нагрузкой

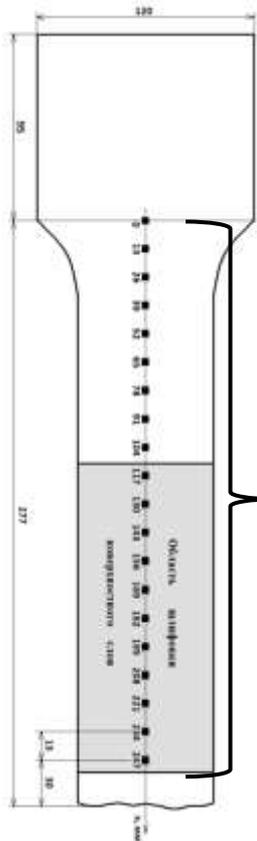


Скорость продольной волны  $V_3$  на различных этапах нагружения

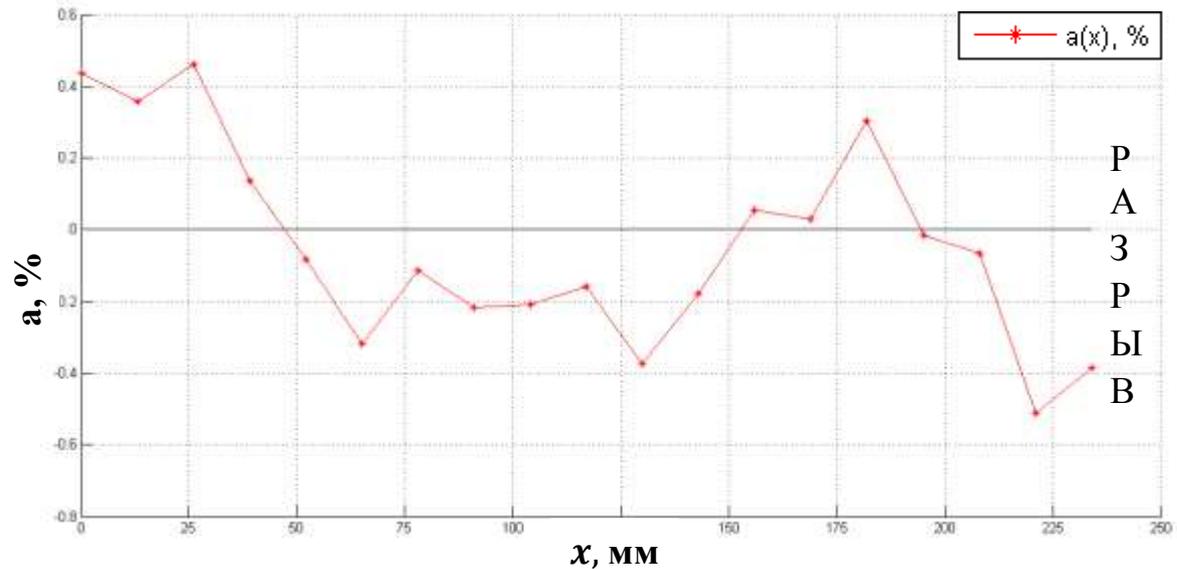
**Вывод:** Скорость продольной волны падает с ростом абсолютной деформации во всех точках рабочей части образца как до, так и после разгрузки



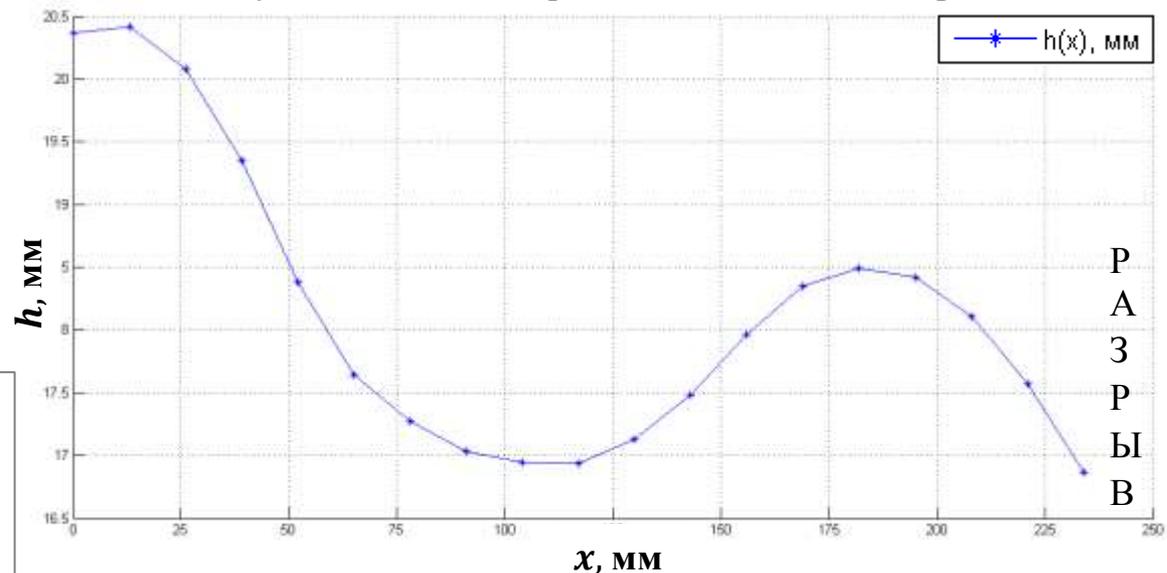
# Акустическая анизотропия в разрушенном образце



Область исследований



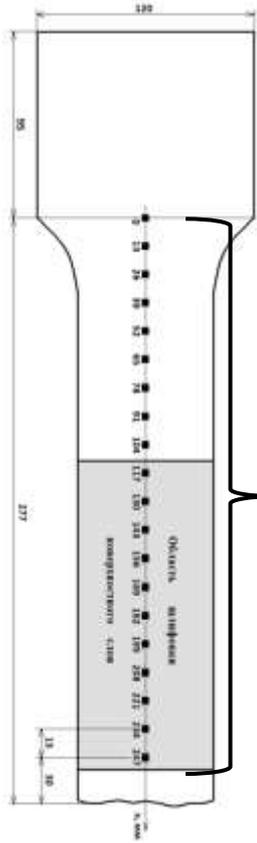
Акустическая анизотропия  $a$  вдоль длины образца



Изменение толщины  $h$  образца вдоль его длины

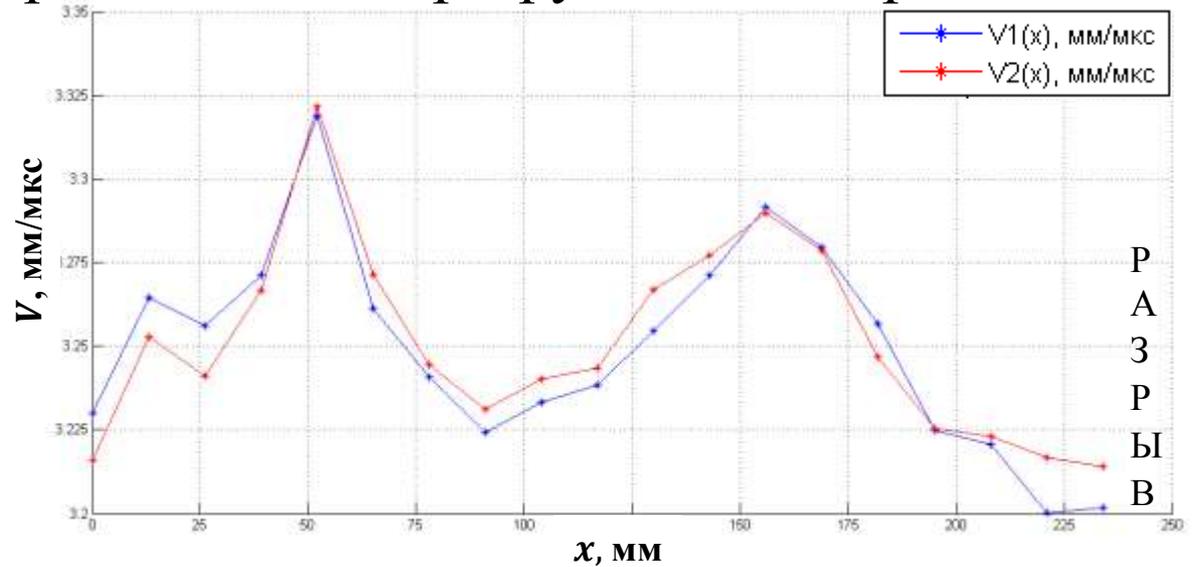
**Вывод:** Существует корреляция между величиной акустической анизотропии  $a$  и степенью пластических деформаций

# Скорости поперечных волн в разрушенном образце

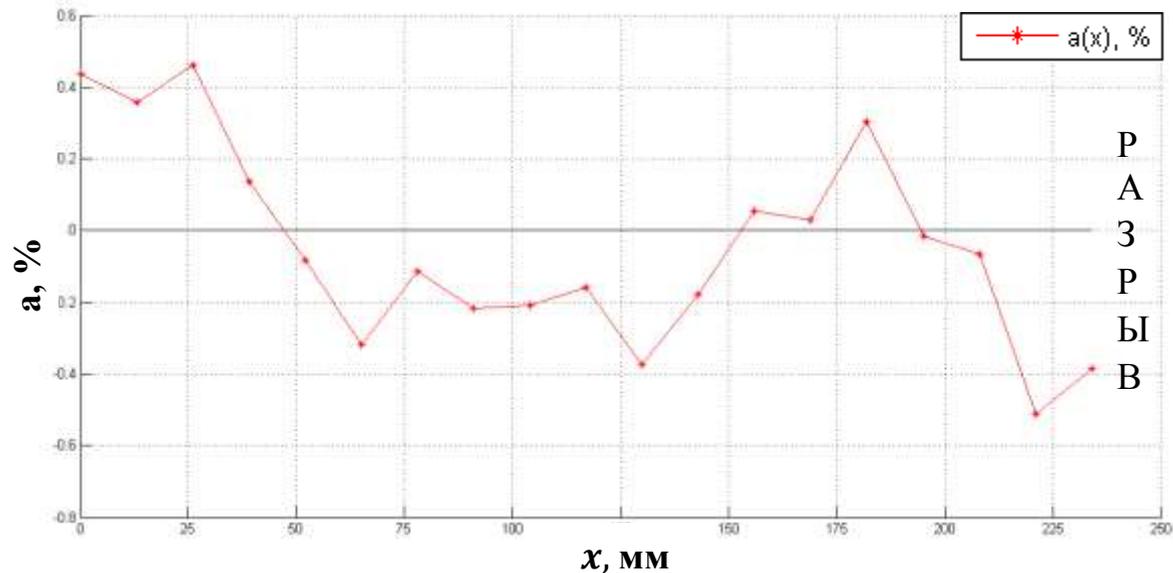


Область исследований

**Вывод:** Скорости поперечных волн  $V_1$  и  $V_2$  не являются постоянными величинами, а их максимумы приходятся на точки перехода акустической анизотропии через нулевое значение

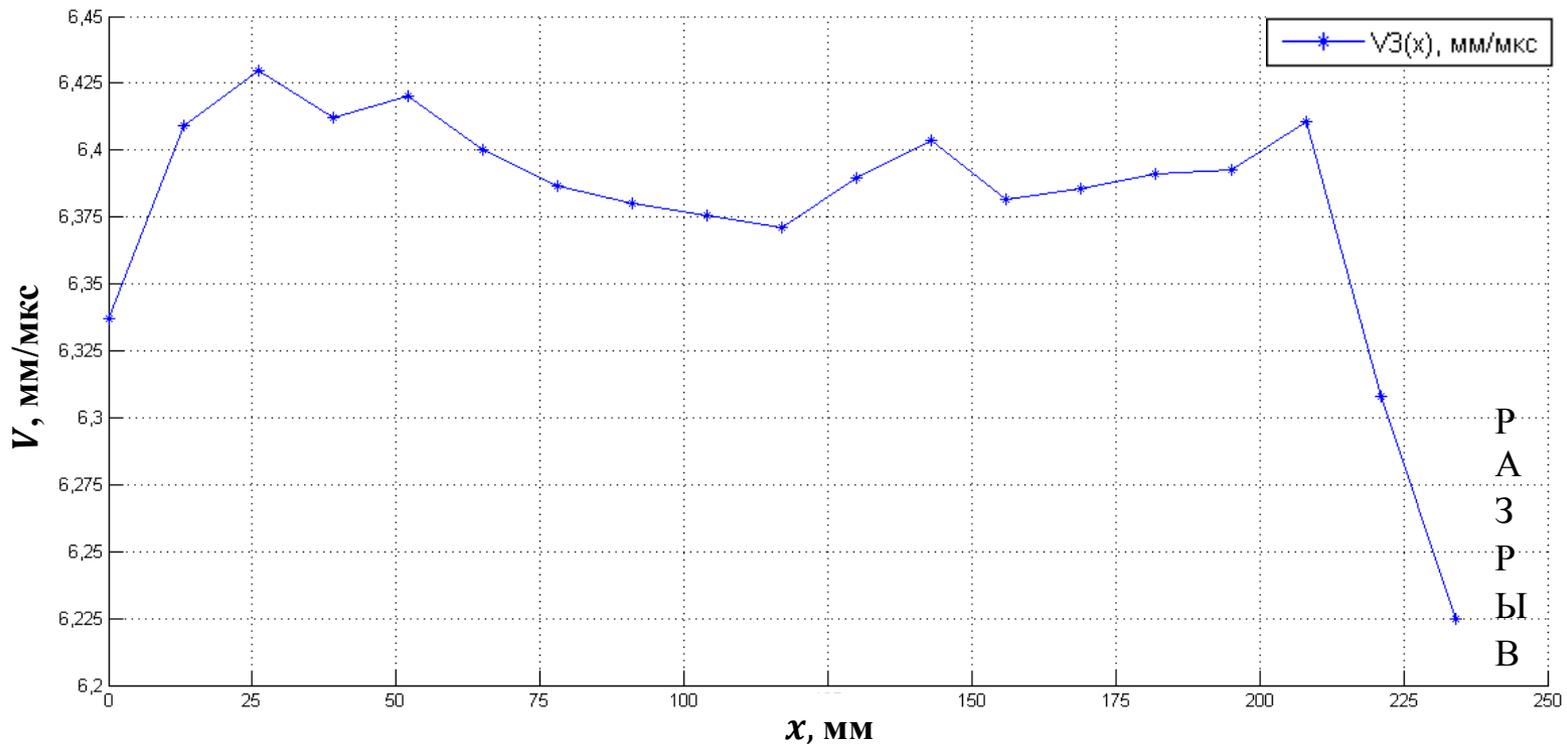


Скорости поперечных волн  $V_1$  и  $V_2$  вдоль длины образца



Акустическая анизотропия  $a$  вдоль длины образца

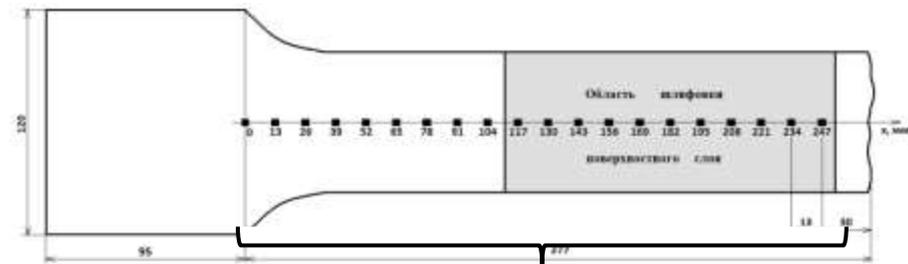
# Скорость продольной волны в разрушенном образце



Р  
А  
З  
Р  
Ы  
В

Скорость продольной волны  $V_3$  вдоль длины образца

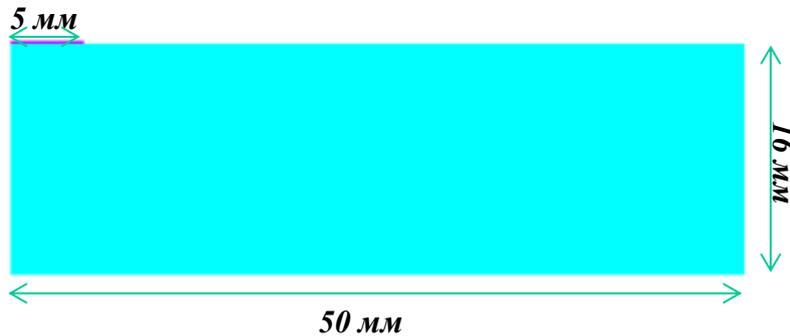
**Вывод:** Скорость продольной волны  $V_3$  не является постоянной величиной и значительно меняется вблизи области разрушения образца



Область исследований

# Конечно-элементное моделирование прохождения продольной волны в изотропной среде

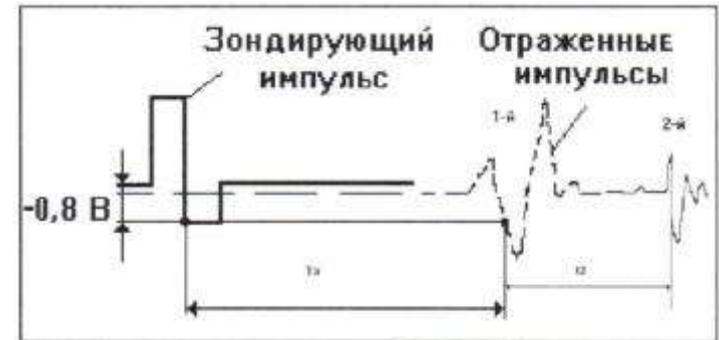
2D:



Материалы:

Сталь

Пьезоэлектрик



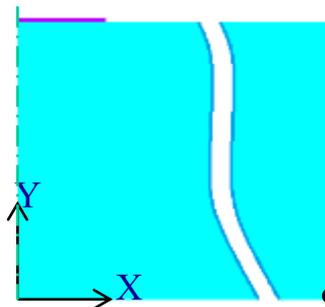
Уровень ЗИ: 50 В

Длительность: 200 нс (частота 5 МГц)

Число импульсов: 3

Граничные условия:

Кинематические:



$$u_x = 0$$

$$u_y = 0$$

Напряжение на пьезоэлементе:  
(зондирующий импульс)

$$U = f(t) \text{ В}$$

$$U = 0 \text{ В}$$



# Результаты конечно-элементного моделирования

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_l + \mathbf{u}_t$$

$$\operatorname{div} \mathbf{u}_t = 0$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{u}_l = 0$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}_l}{\partial t^2} - c_l^2 \Delta \mathbf{u} = 0,$$

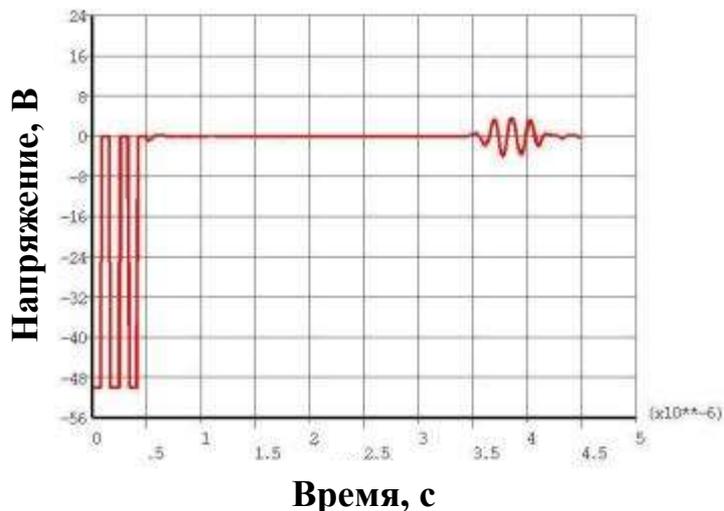
$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}_t}{\partial t^2} - c_t^2 \Delta \mathbf{u} = 0$$

$$c_l = \left( \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2}$$

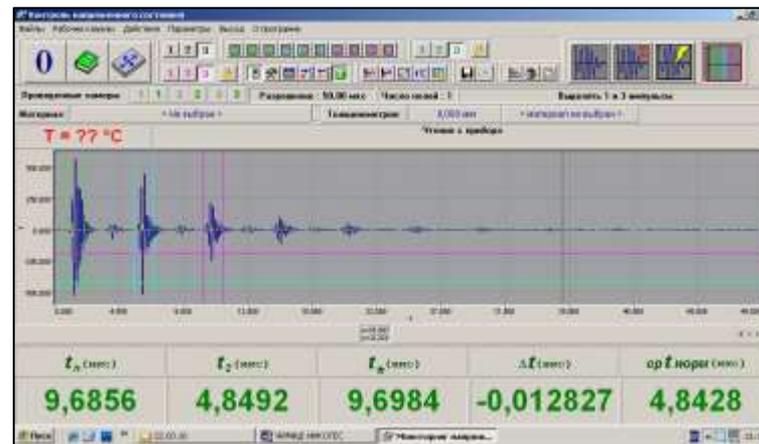
$$c_t = \left( \frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}$$



Распространение продольной волны



Напряжение на пьезопластине  
(отраженный импульс)



Панель управления измерениями



## Выводы

- Удалось обнаружить целый ряд не опубликованных ранее закономерностей, связанных с поведением акустической анизотропии и скоростей упругих ультразвуковых волн в области пластических деформаций;
- Установлена устойчивая и однозначная связь между скоростями ультразвуковых волн, акустической анизотропией и пластическими деформациями;



Возможно практическое применение полученных результатов для оценки ресурса исследуемых материалов и элементов конструкций



## Опубликованные статьи:

**Оценка величины пластических деформаций с использованием акустической анизотропии /**

А.К. Беляев, А.М. Лобачев, В.С. Модестов, А.В. Пивков, В.А. Полянский, А.С. Семенов,  
Д.А. Третьяков, Л.В. Штукин. // Механика твердого тела (принята в печать)

**Измерение акустической анизотропии в типовых образцах /** Д.А. Третьяков, В.С. Модестов, Л.В. Штукин, А.В. Пивков // Неделя Науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. – 2015.

## Участие в конференциях:

### **Days on Diffraction 2016**

(Санкт-Петербургское отделение Математического института им. В.А.Стеклова РАН)  
27 июня - 1 июля 2016 г. (участие планируется)

Международная конференция «**Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций**»  
(ИМАШ УрО РАН, 16 - 20 мая 2016 г.)

Международный научный симпозиум по проблемам механики деформируемых тел, посвященный  
105-летию со дня рождения А.А. Ильюшина  
(Москва, 20 - 21 января 2016 года)



Спасибо за внимание!