



КИНЕТИКА

контактная лазерно-
ультразвуковая структуроскопия

www.keenetica.ru

Телефон: 8 (925) 000-444-3

Почта: info@keenetica.ru

Содержание презентации

- Слайд 3 Принцип работы контактной лазерно-ультразвуковой структуроскопии (КЛУС)
- Слайд 6 Дефектоскоп Кинетик Лазерно-Ультразвуковой Структуроскопии 01 (Кинетик ЛУС-01)
- Слайд 19 Лазерно-ультразвуковая дефектоскопия металлов
- Слайд 29 Измерения локальных упругих модулей
- Слайд 34 КЛУС остаточных напряжений в металлах
- Слайд 40 КЛУС аддитивных технологий
- Слайд 46 КЛУС конструкций из углепластиковых композитов
- Слайд 63 Сравнение дефектоскопов ЛУС-01 и OMNISCAN при оценке структуры стрингера

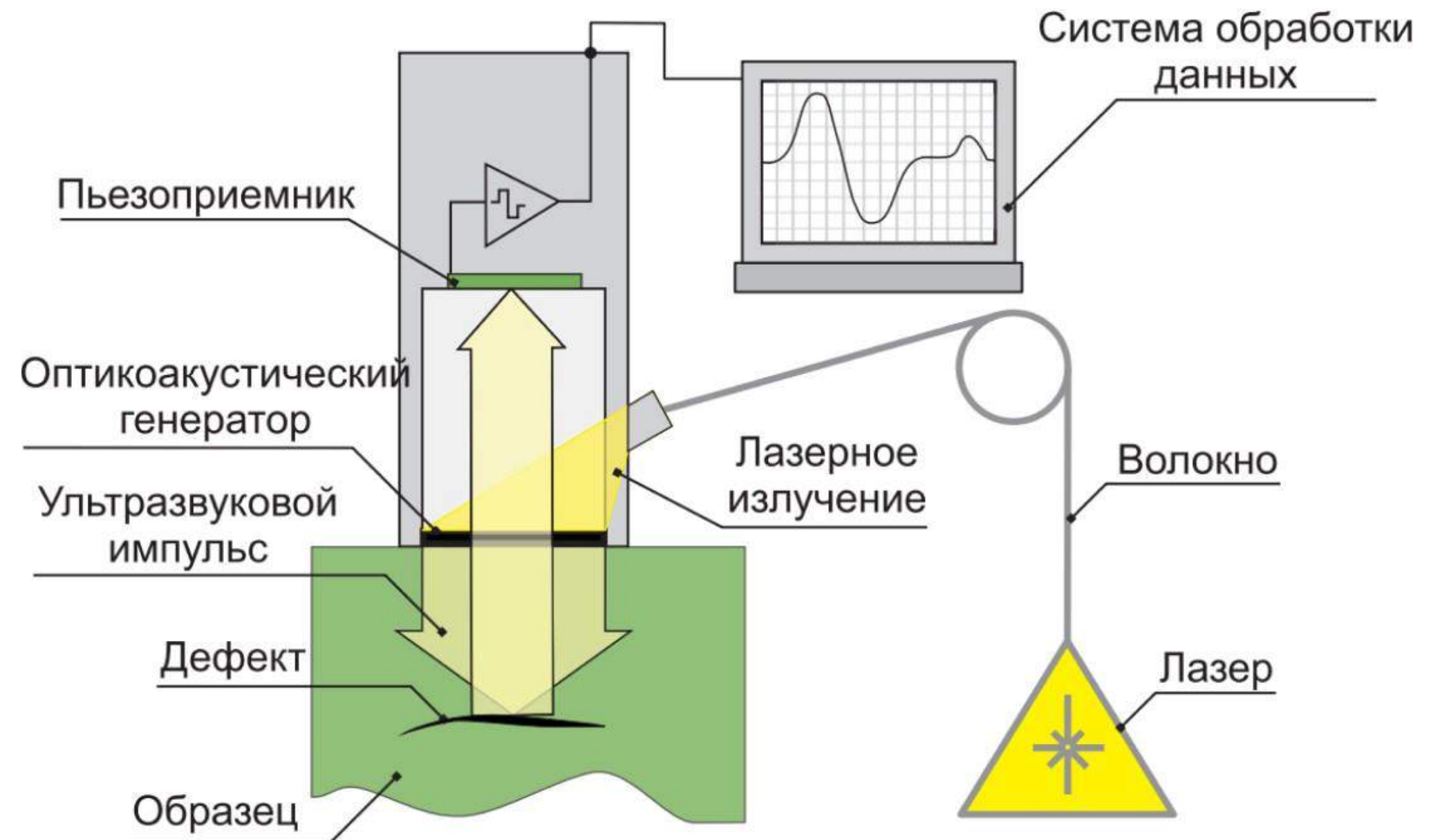
KEENETICA

Принцип работы
Контактной
Лазерно-
Ультразвуковой
Структуроскопии

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

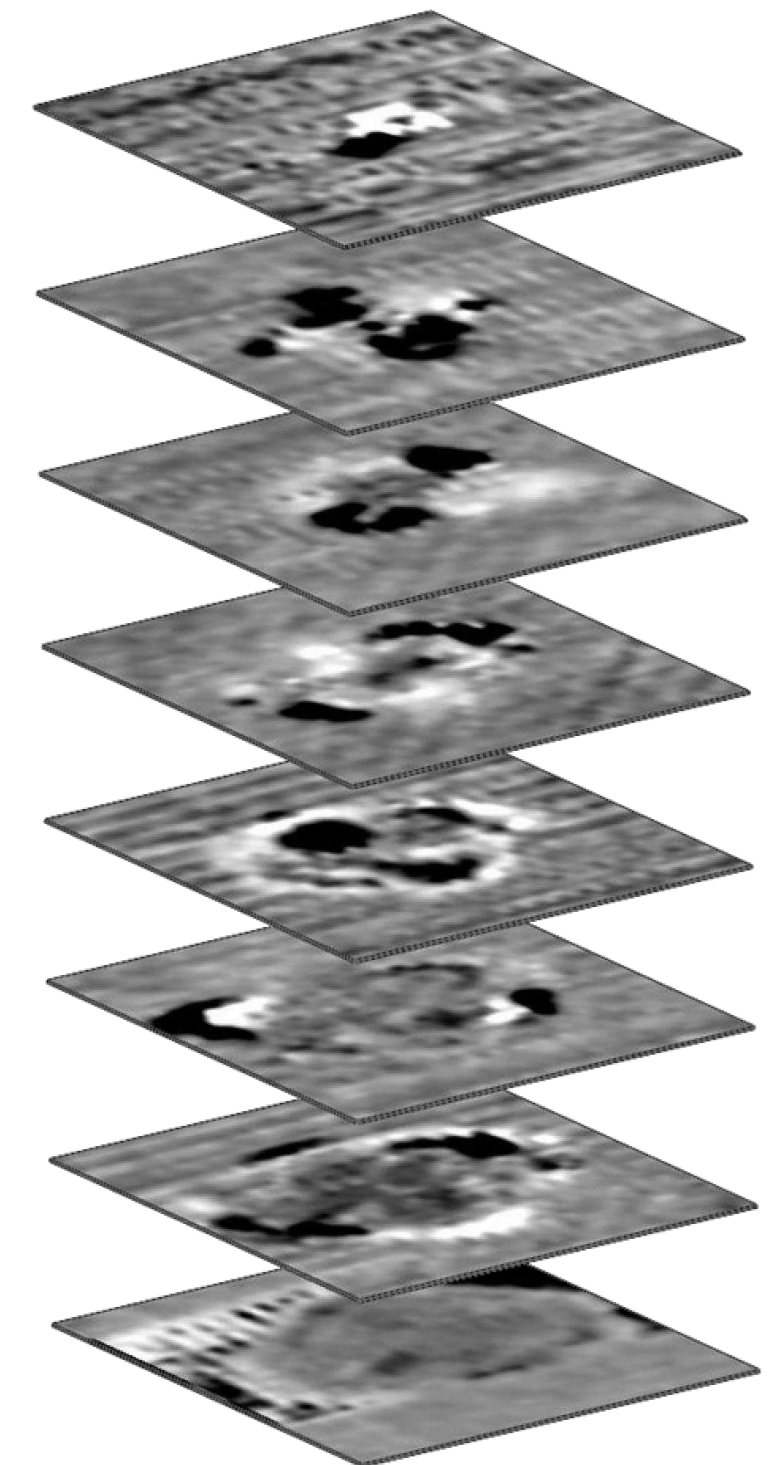
Принцип работы контактной лазерно-ультразвуковой структуроскопии (КЛУС)

1. Наносекундный импульс лазера с диодной накачкой направляется на оптико-акустический генератор и поглощается в нем.
2. При этом возбуждается субмикросекундный ультразвуковой импульс, который направляется в исследуемый образец.
3. Рассеянные и отраженные назад волны, несущие информацию о структуре и свойствах исследуемой среды, регистрируются широкополосным пьезоприемником.



Преимущества КЛУС

- Отсутствие «мертвой зоны»
- Высочайшее разрешение сканирования (от 10 мкм) независимо от размеров объекта контроля
- Альтернатива диагностики композитов и аддитивных материалов без применения рентгена
- Исследование напряженных состояний с точностью 0,1%
- Исследование структуры материала с разрешением выше рентгена
- Возможность бесконтактной диагностики иммерсионным способом
- Программное обеспечение на основе собственных математических моделей
- Использование ИИ для детекции и классификации неоднородностей и дефектов в автоматическом режиме
- Возможность создания реального цифрового двойника изделия для контроля его жизненного цикла



KEENETICA

Дефектоскоп

«Кинетик ЛУС-01»

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

КИНЕТИК ЛУС-01

Оптико-электронный
блок

Оптическое волокно
(присоединяется
к боковой стороне
блока)

Лазерно-
ультразвуковой
преобразователь
ПЛУ-6П-01

Компьютер для
считывания и обработки
данных



Метрологические характеристики «КИНЕТИК ЛУС-01»

Диапазон измерений скорости распространения продольных ультразвуковых волн	2000 - 7000 м/с
--	-----------------

Пределы допускаемой относительной погрешности измерений скорости распространения продольных ультразвуковых волн	$\pm 1\%$
---	-----------

Диапазон измерений временных интервалов	0,02 - 35 мкс
---	---------------

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений временных интервалов	± 15 нс
---	-------------

Диапазон измерений толщины и/или глубины залегания дефектов (сталь)	0,1 - 180 мм
---	--------------

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений толщины и/или глубины залегания дефектов (сталь), мм	$\pm(0,03+0,0015 \cdot H)$
- в диапазоне 0,1 - 90 мм	$\pm(0,01 \cdot H)$
- в диапазоне 90 - 180 мм	

Н – измеренное значение толщины или глубины залегания дефекта, мм

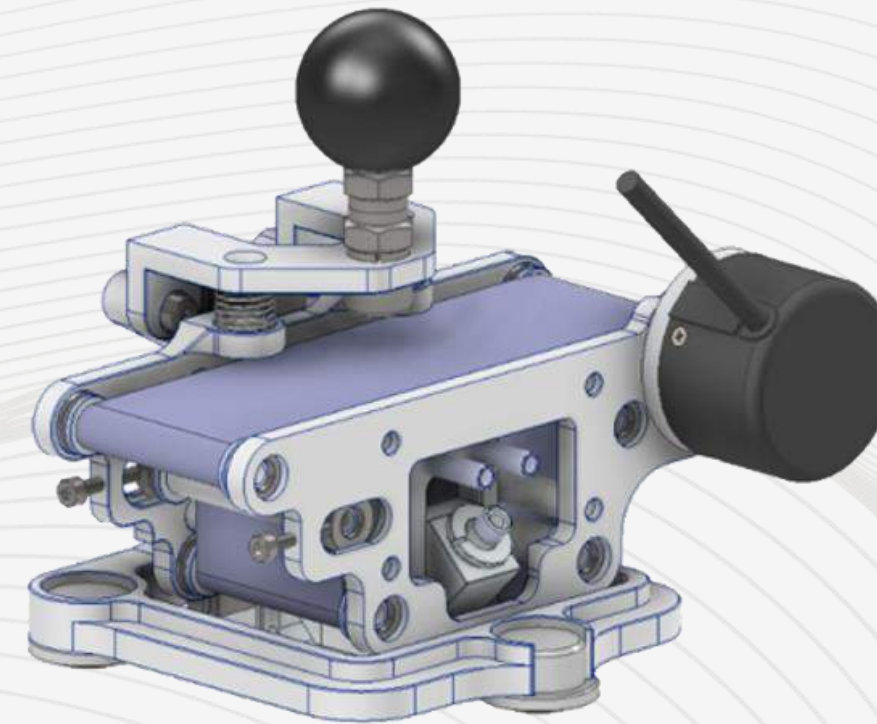
Технические характеристики «КИНЕТИК ЛУС-01»

Частота повторения зондирующих импульсов, кГц	1,0 ±0,01
Габаритные размеры дефектоскопа, мм, не более – длина – ширина – высота	270 170 120
Условия эксплуатации: – температура окружающей среды, °С – относительная влажность воздуха при температуре +31 °С, %, не более	от +15 до +35 80
Зарядка дефектоскопа	~220 В, 50 Гц
Масса, кг, не более	4,0

Автоматизация измерений

При промышленном использовании систем неразрушающего контроля есть необходимость автоматизировать процесс измерений. Для объектов большой площади также необходимо увеличивать скорость сканирования.

Высокая точность перемещений и автоматизация сканирования обеспечиваются использованием портальной системы позиционирования с программируемыми контроллерами.



Полуавтоматический преобразователь с ленточным генератором

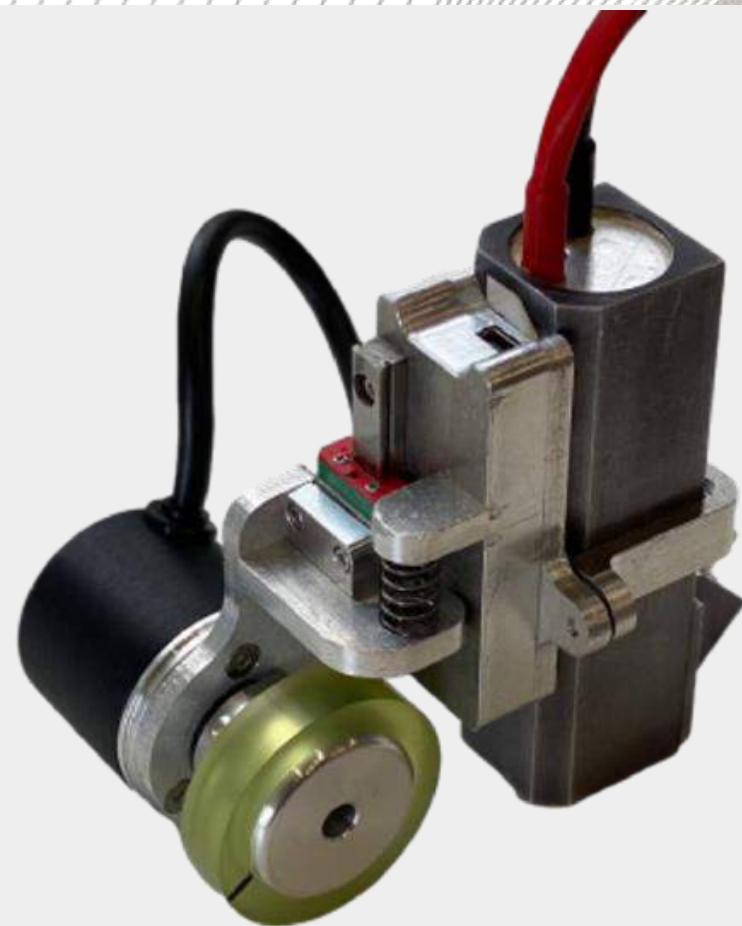
Количество измерений системы позиционирования 1D

Макс. размер объекта не ограничен

Точность позиционирования 0.05 мм

Макс. скорость перемещения 50 мм/с

Автоматизация измерений

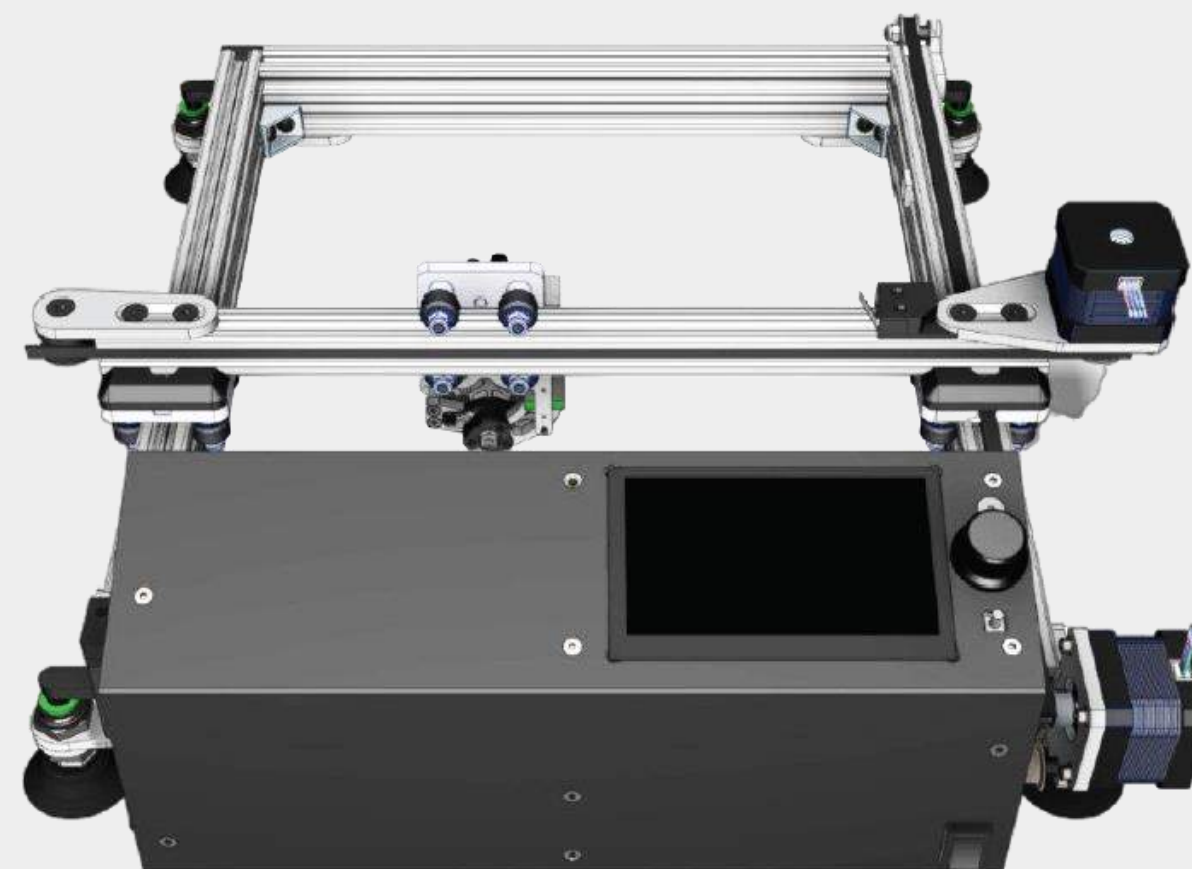
**Одномерная система перемещения**

Количество измерений системы
позиционирования 1D

Макс.размер объекта не ограничен

Точность позиционирования 0.1 мм

Макс. скорость перемещения 20 мм/с

**Двухмерная система перемещения**

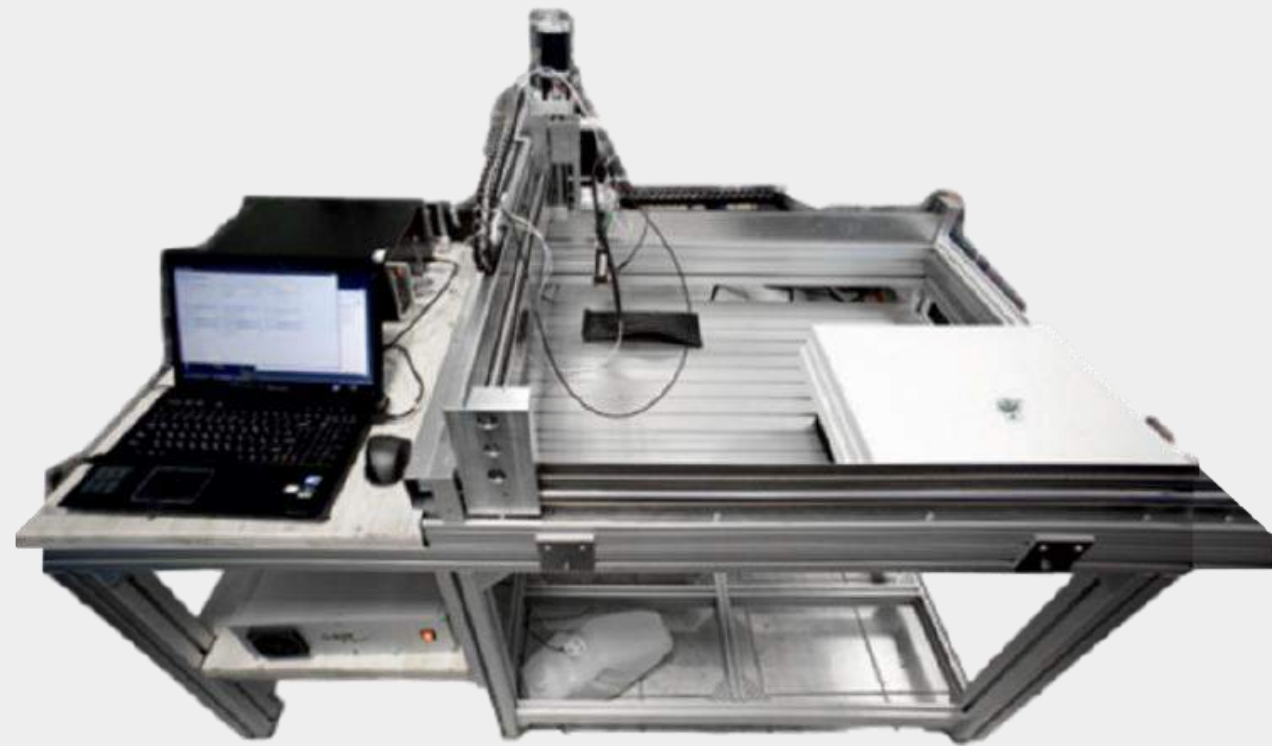
Количество измерений системы
позиционирования 2D

Макс. размер объекта .2x0.2 м

Точность позиционирования 0.1 мм

Макс. скорость перемещения 50 мм/с

Автоматизация измерений

**Трехмерная система перемещения**

Количество измерений системы
позиционирования 3D

Максимальный размер объекта 7 x 0.8 x 0.1 м

Точность позиционирования

по каждой оси 1 мм

Макс. скорость перемещения 2 мм/с

**Роботизированная система**

Количество измерений системы
позиционирования 6D

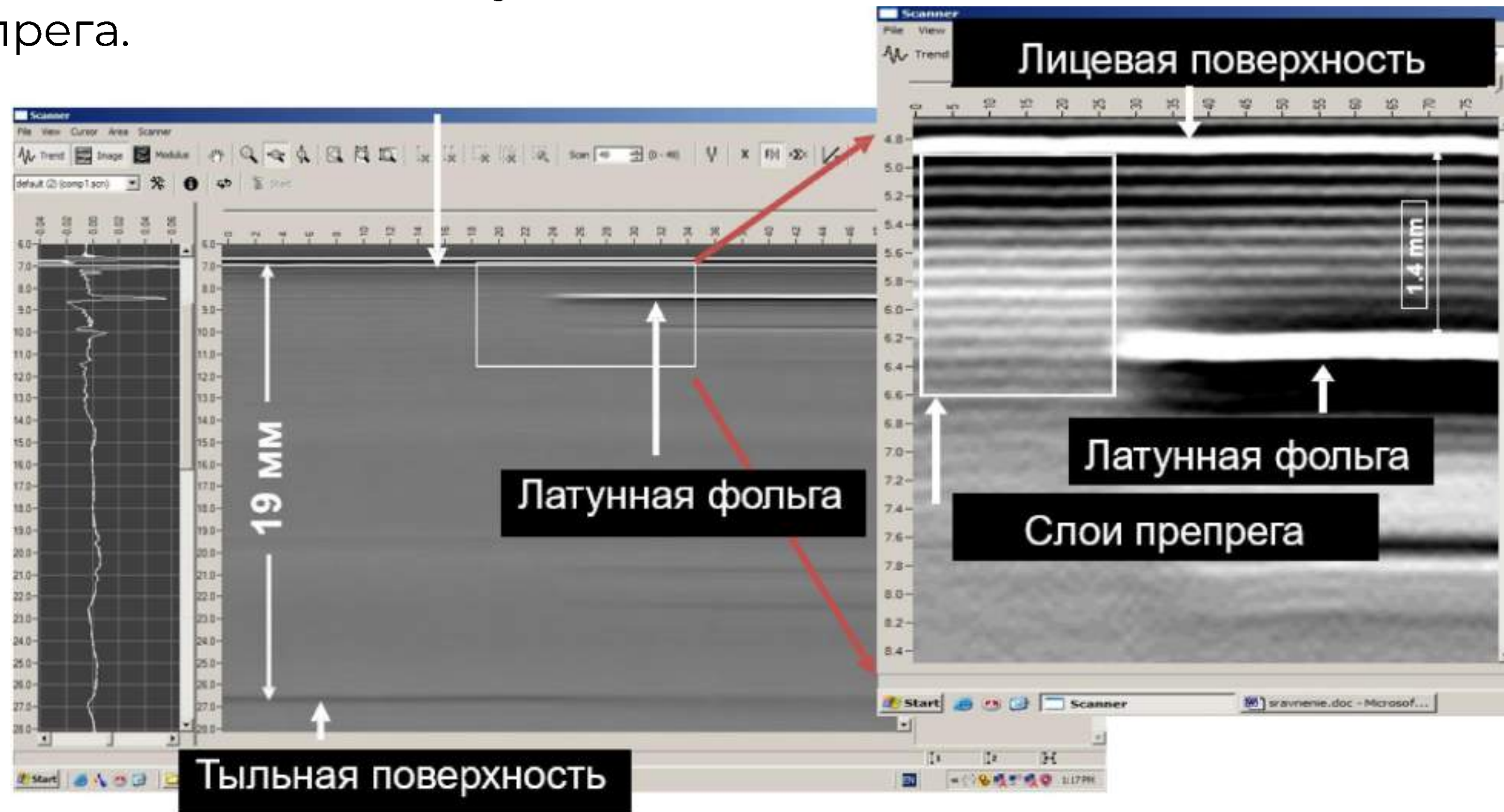
Максимальный радиус действия 1000 мм

Точность позиционирования 0.2 мм

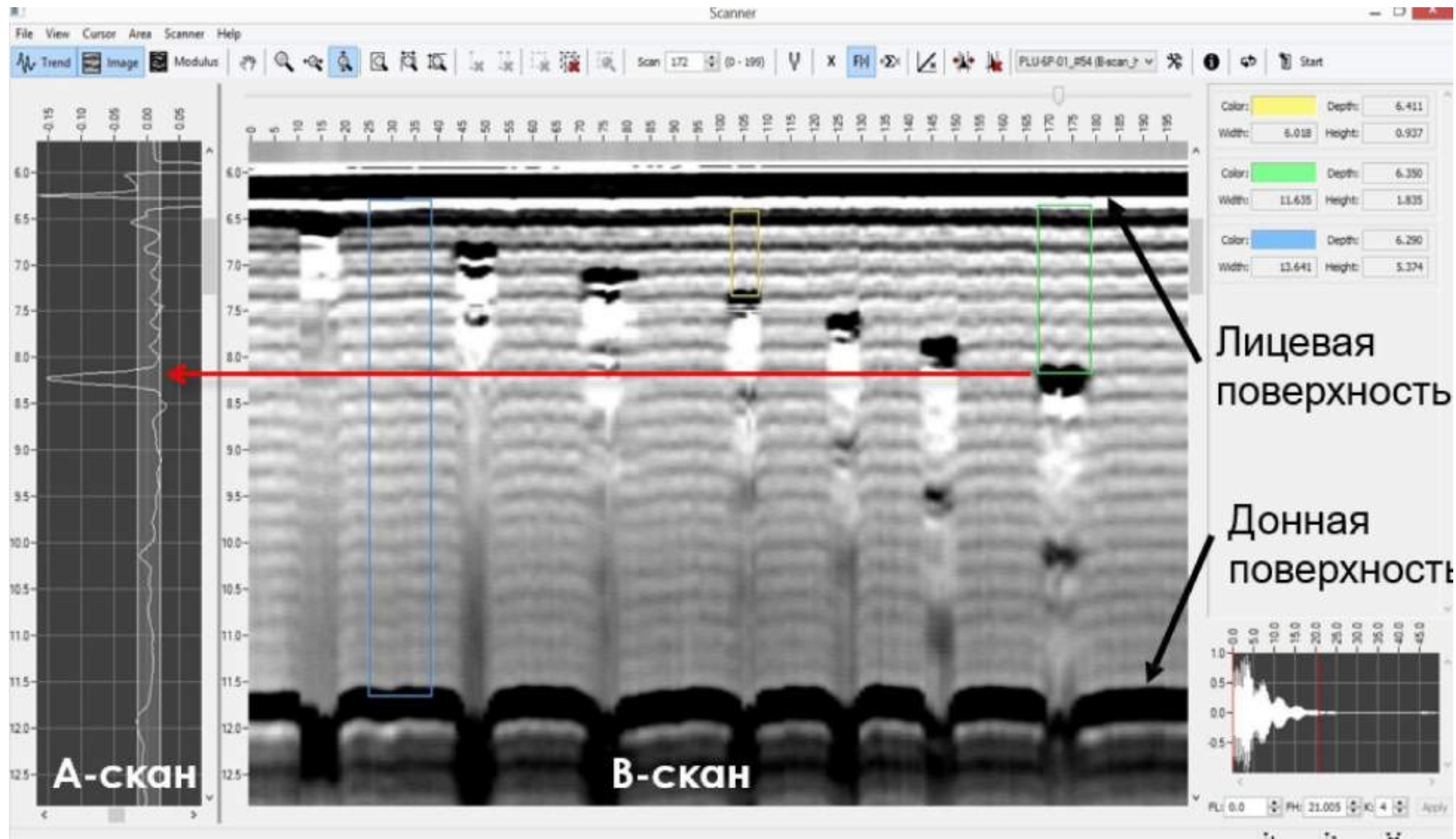
Макс. скорость перемещения 2 мм/с

КЛУС модельного дефекта в УКМ

Латунная фольга заложена между 10-м и 11-м слоями препрега.



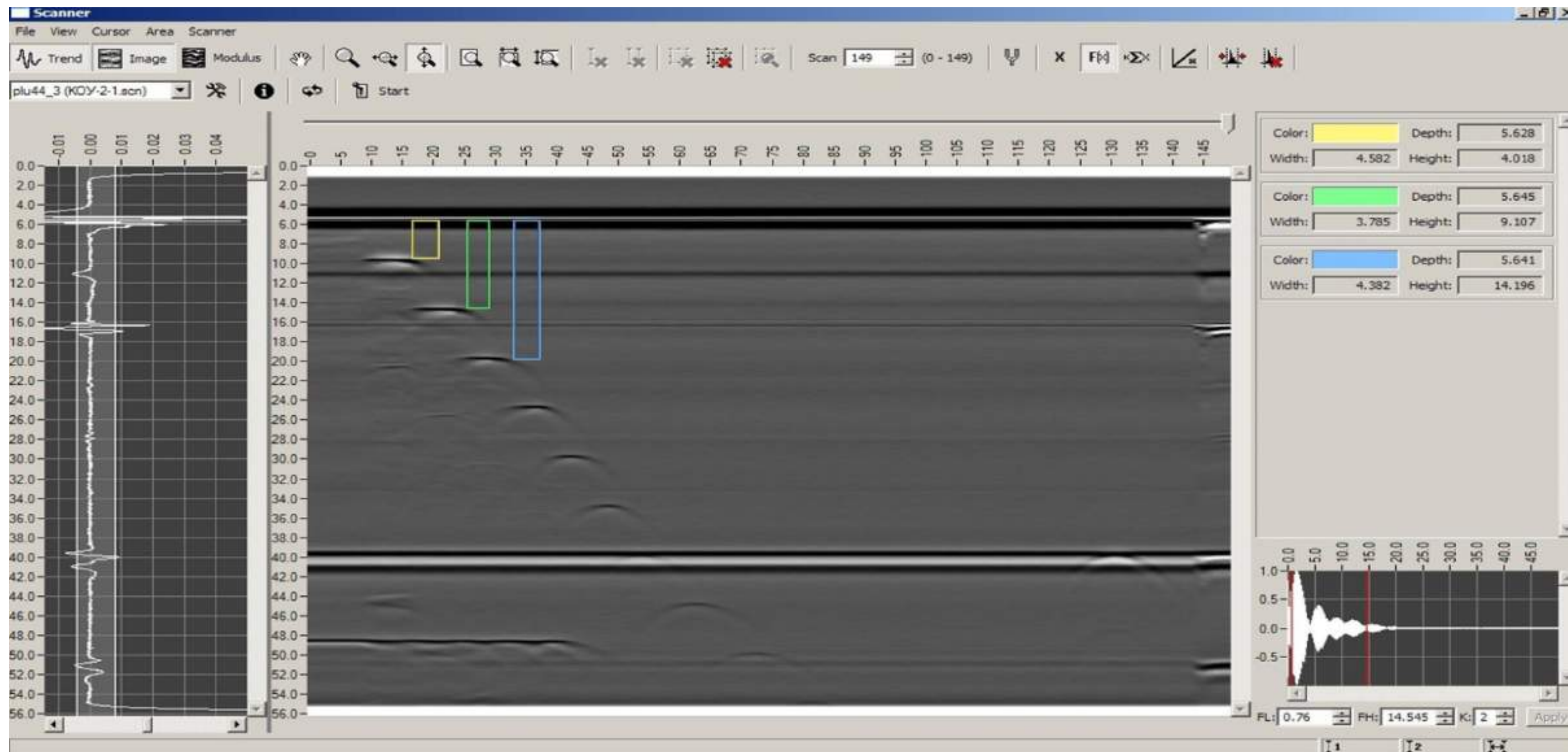
КЛУС расслоений в ПКМ



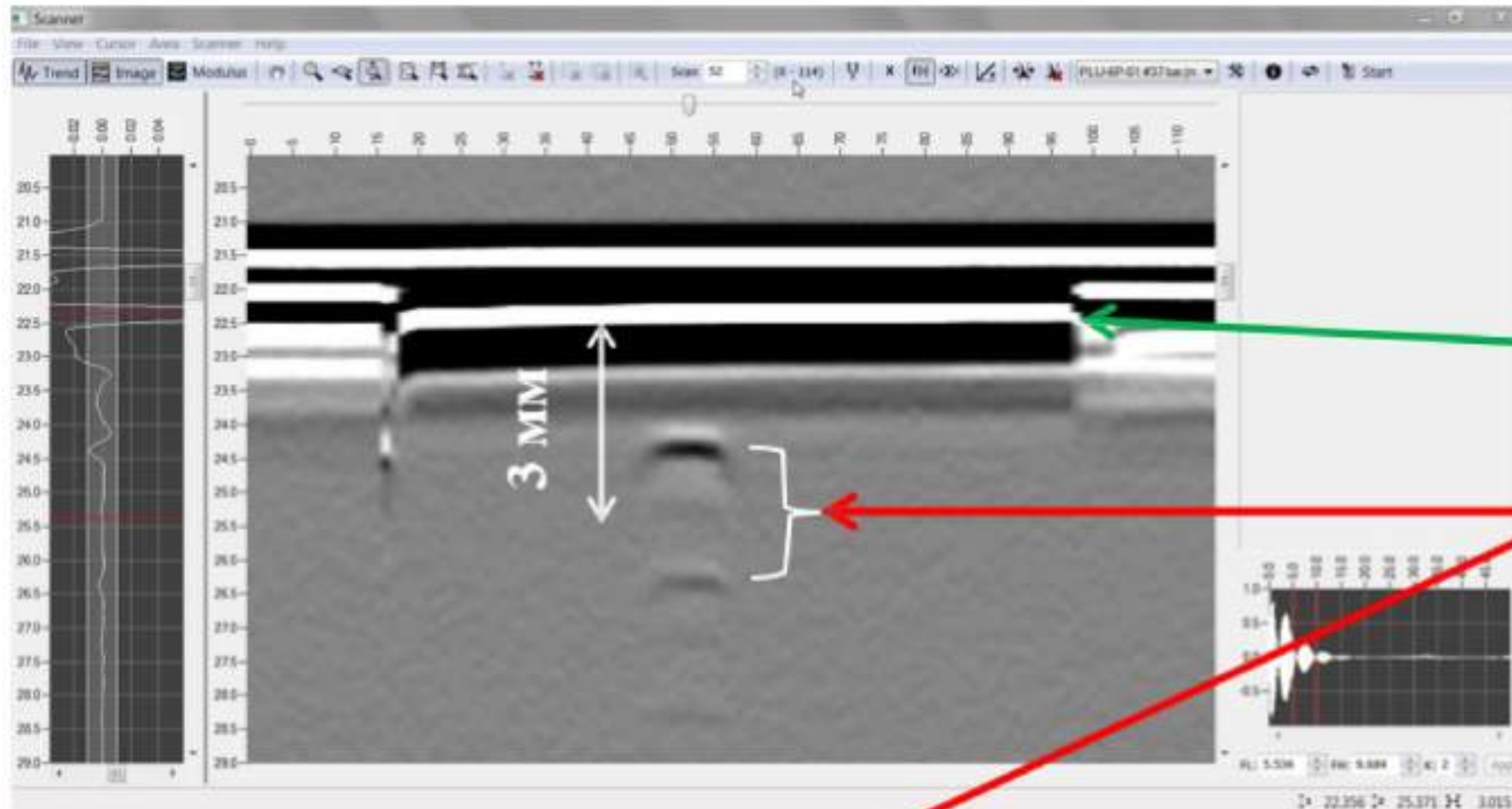
Светлые линии – изображение армирования, темные – матрицы.

Отчетливо видны расслоения между последовательными слоями армирования.

КЛУС образца СО-1



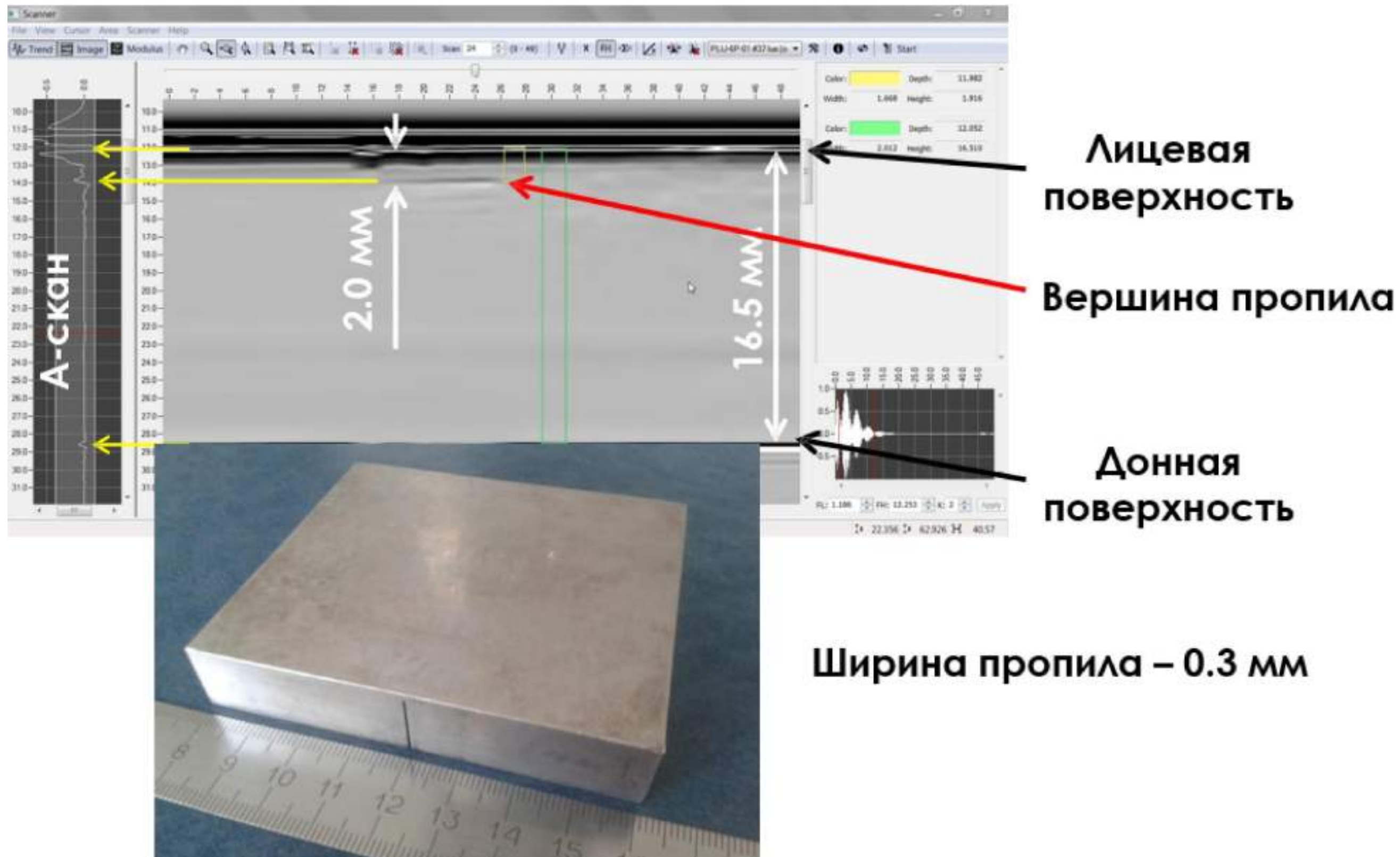
КЛУС бокового сверления



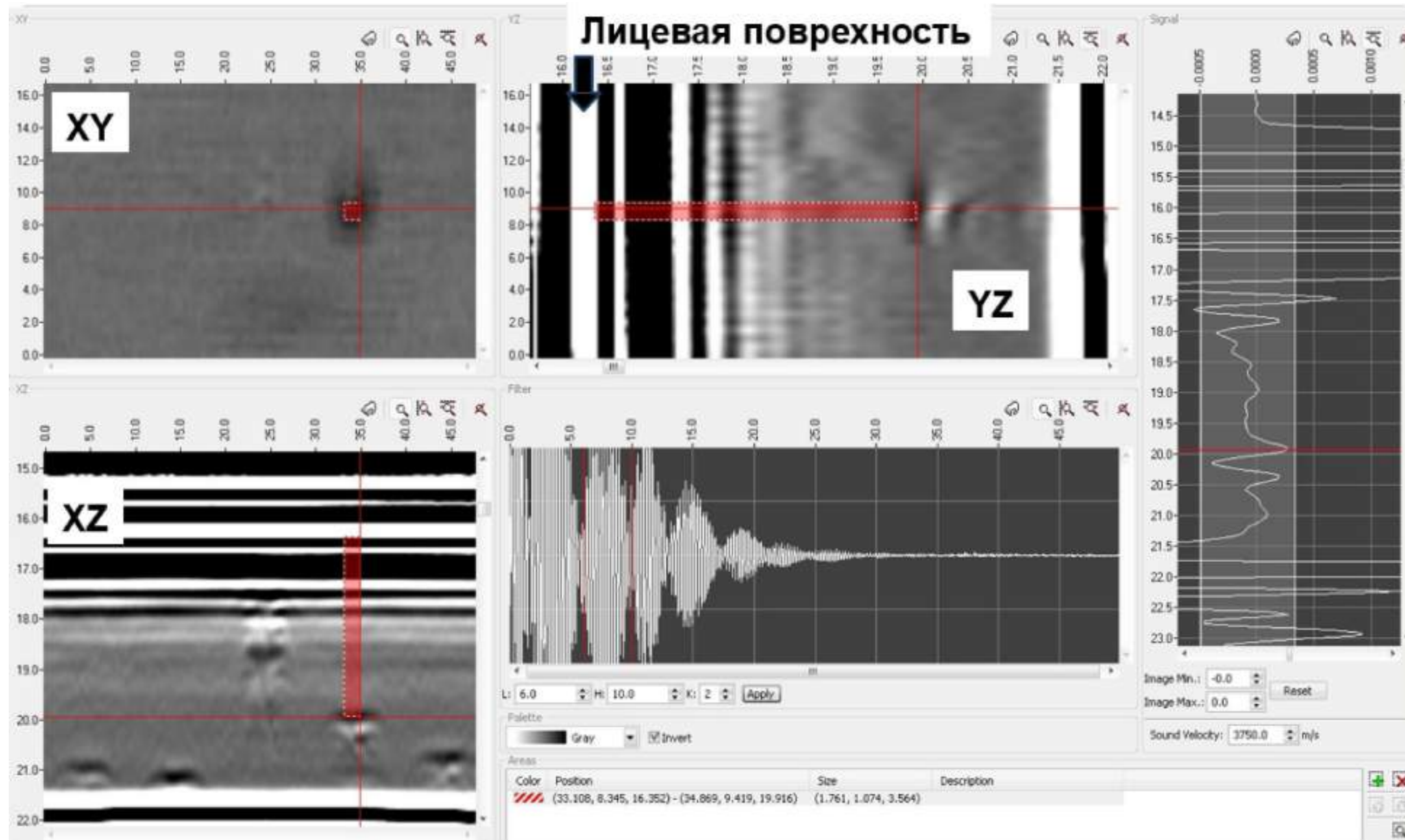
Образец СО-2

Лицевая
поверхностьСверление $\varnothing 2$ мм

Контроль вертикальной трещины



КЛУС сверлений



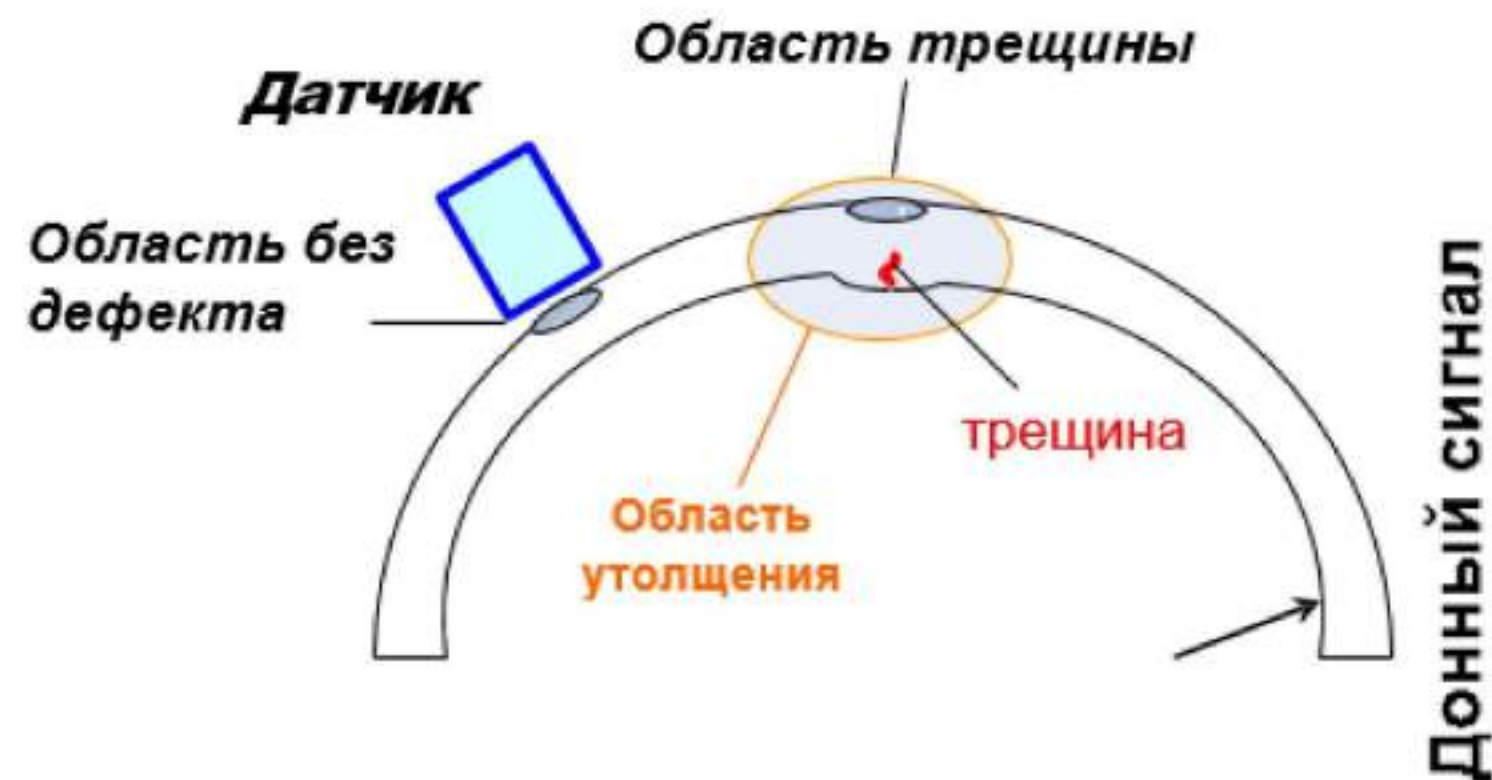
Образец – диск
ø60 мм толщиной
5.3 мм из Д16Т с
неплоскодонными
сверлениями
разной глубины
диаметром от 0.6
мм до 1.2 мм.

KEENETICA

Лазерно-
ультразвуковая
дефектоскопия
металлов

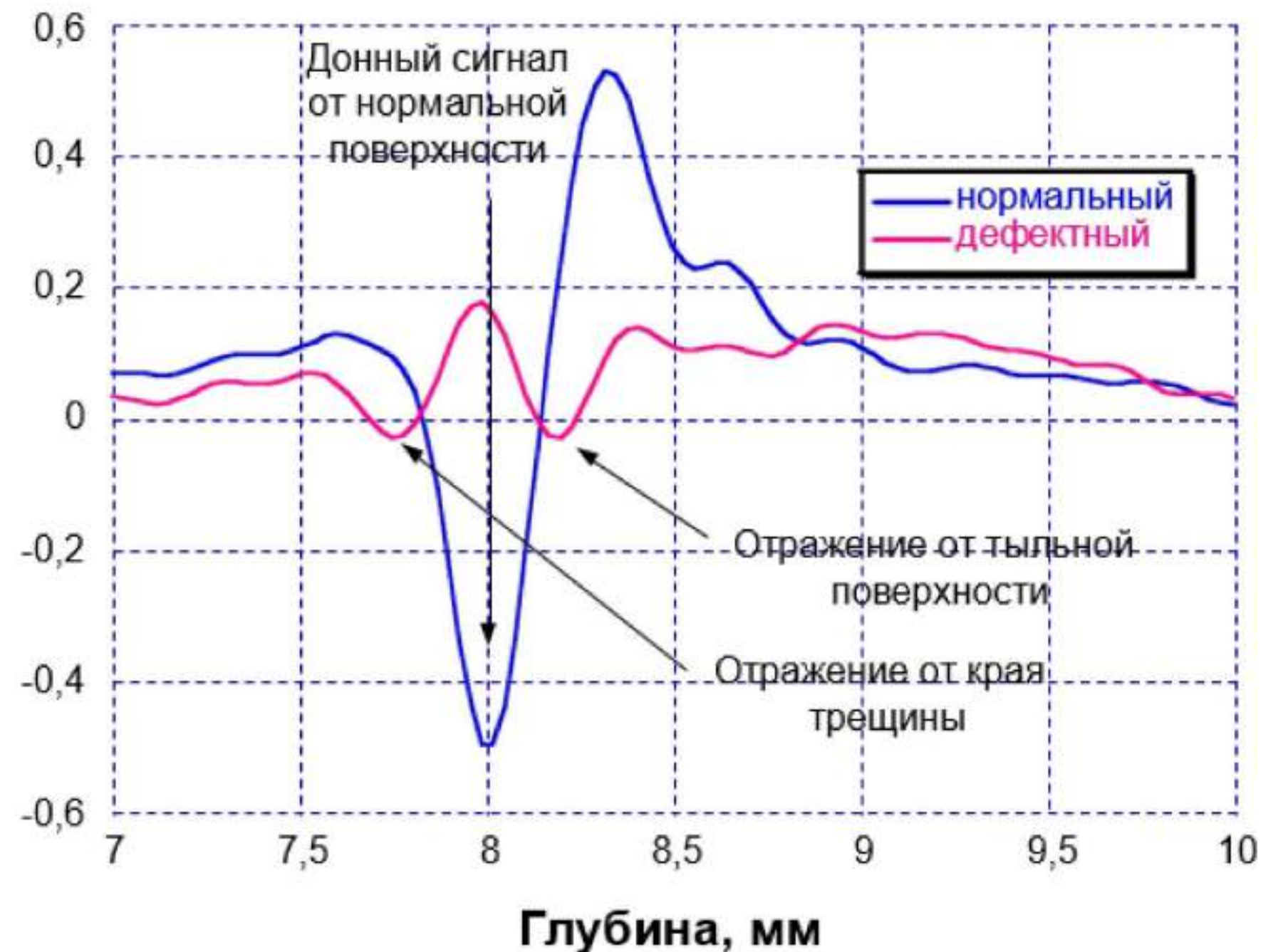
РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

Контроль донной трещины

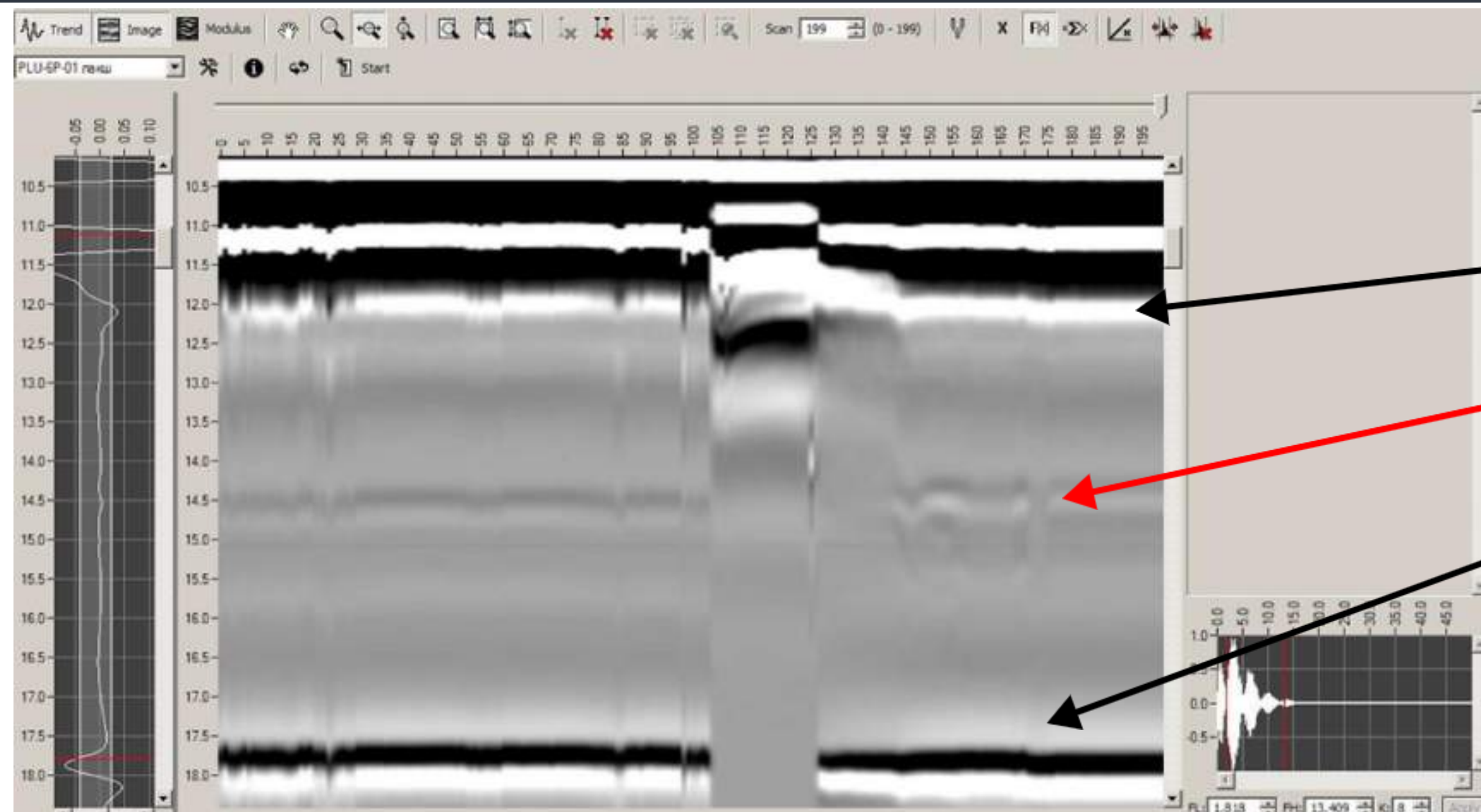


Малая длительность пробного УЗ импульса (0.07 мкс) и малый диаметр УЗ пучка (3 мм) позволяют выделять дефекты на сложных поверхностях.

Контроль полуоси УДЛ-2М



КЛУС расслоения в плите



Лицевая поверхность

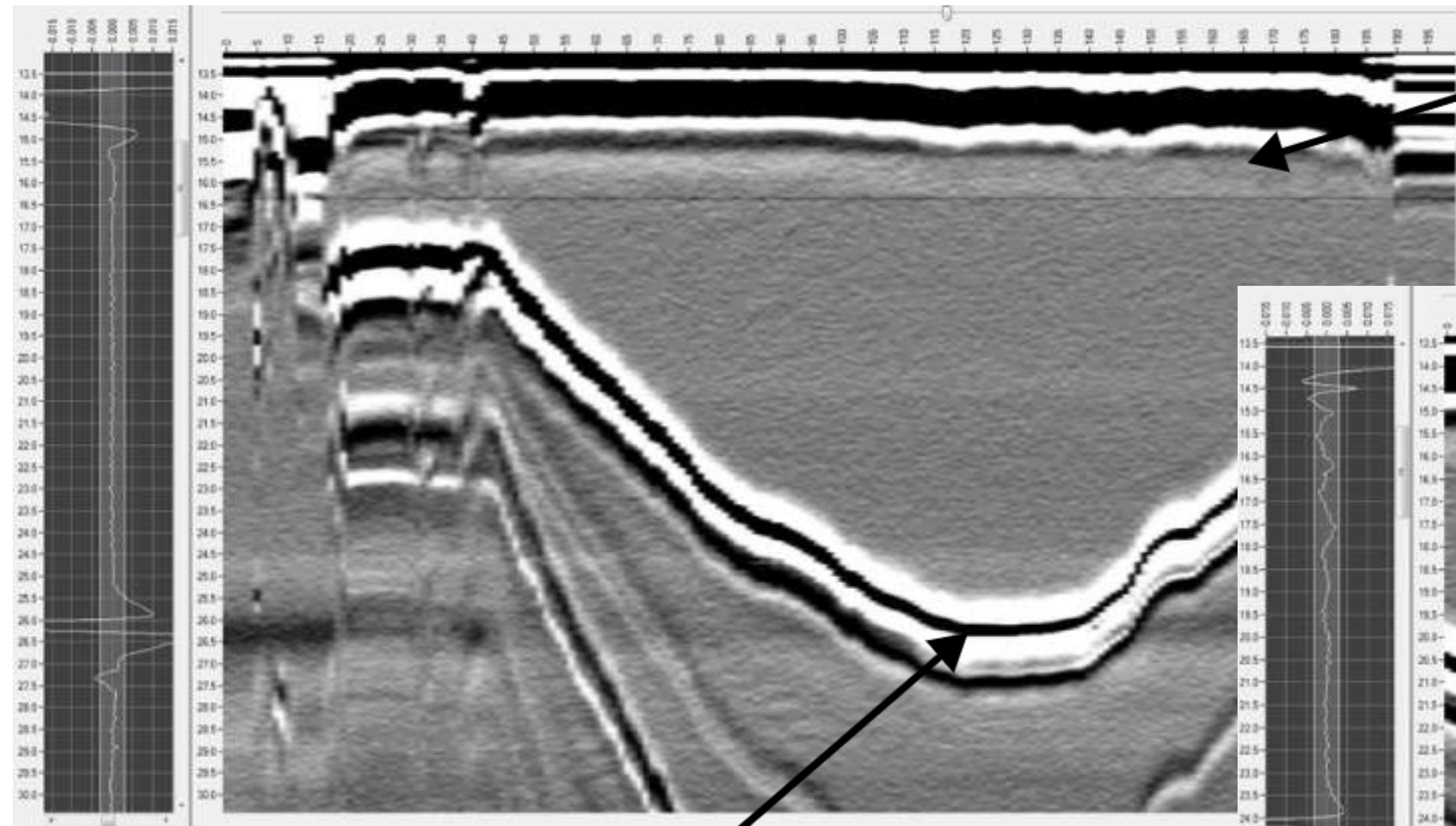
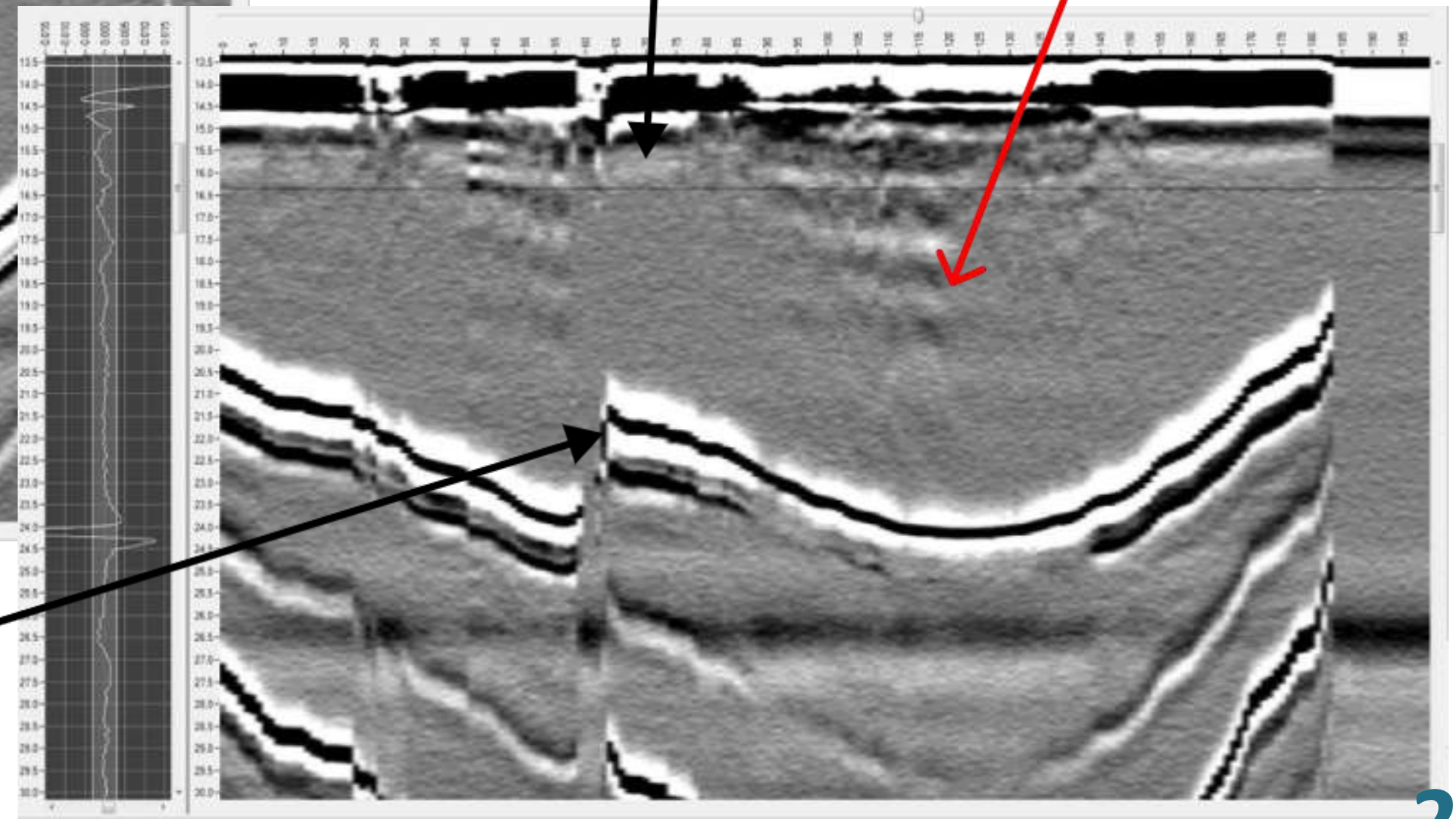
Несплошность

Донная поверхность

Образец – плита из ЭП750Ш толщиной 6.6 мм. На глубине ~3.3 мм в некоторых точках наблюдается дополнительный сигнал. Отрицательная полярность этого сигнала говорит о «мягком» характере обнаруженного отражателя. Малая амплитуда сигнала (по сравнению с амплитудой донного сигнала) и подобие их временной формы говорит о характере дефекта – несплошность с малым раскрытием, расположенная параллельно поверхности объекта. Оценка диаметра несплошности – менее 1 мм.

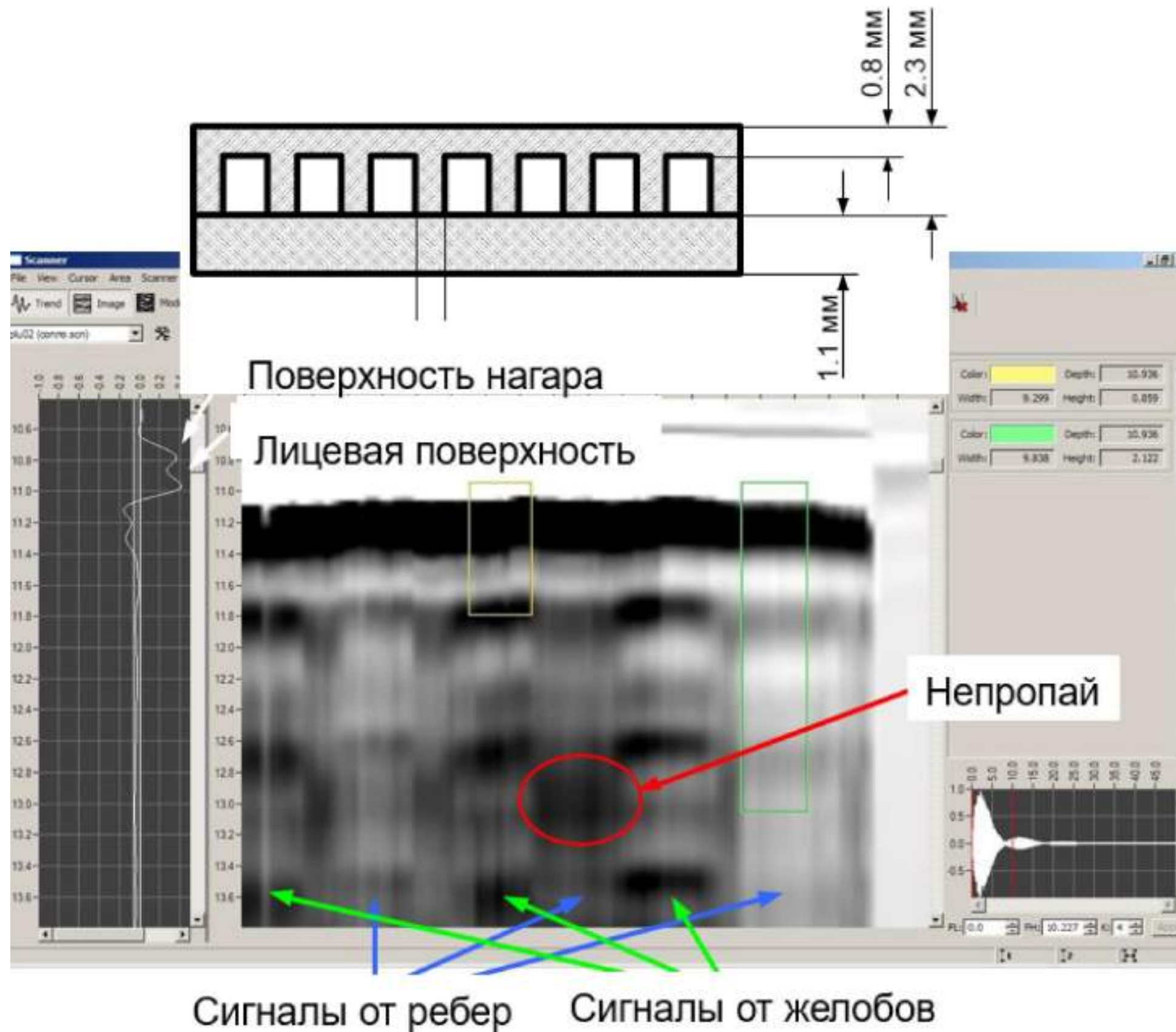
КЛУС зерен

Тыльная поверхность

Лицевая
поверхностьПлоско-слоистая
структура зерен

Тыльная поверхность

Лазерно-ультразвуковой контроль некропия по ребру



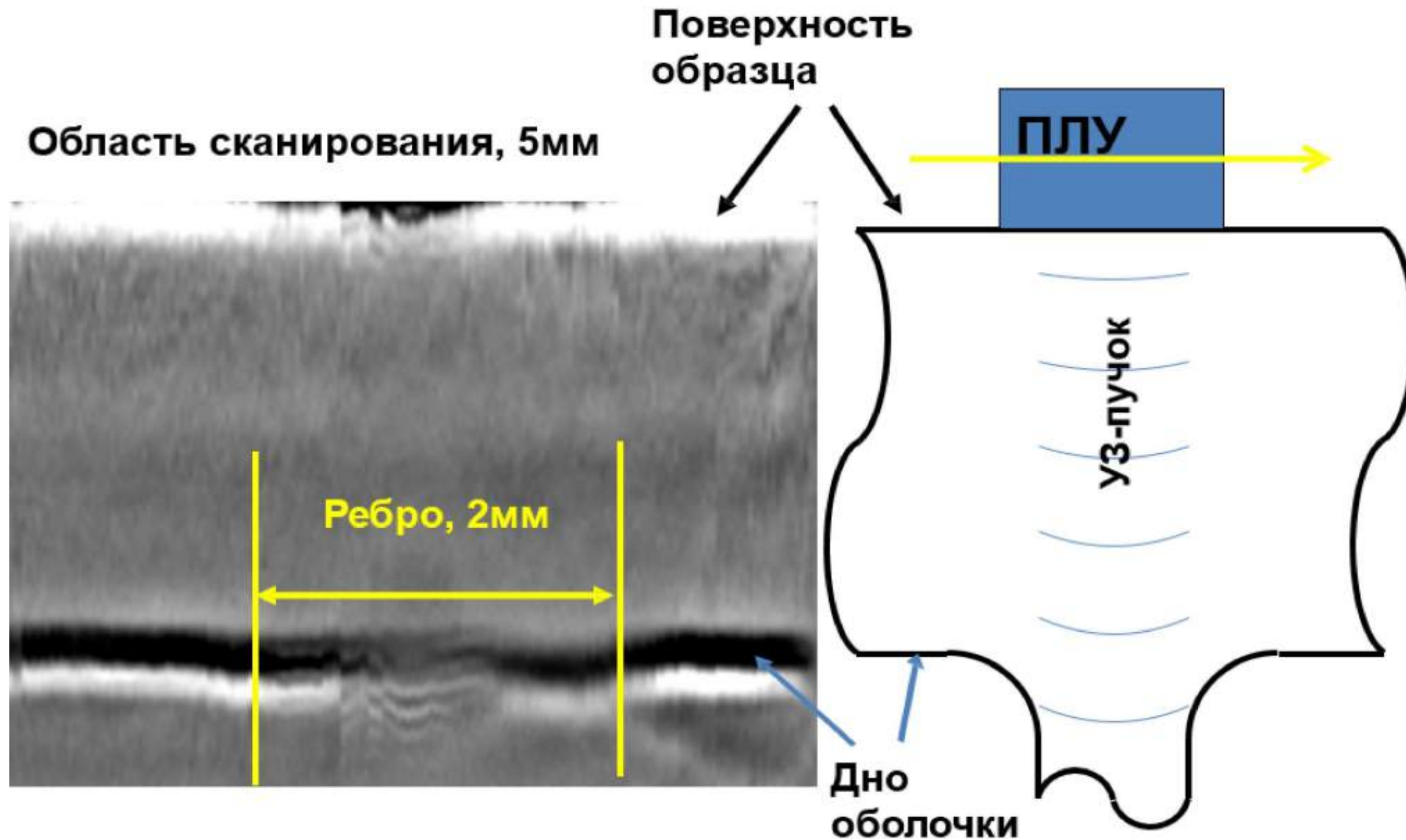
КЛУС монокристаллической лопатки из ЖС-32



Красными стрелками
отмечены зоны сканирования



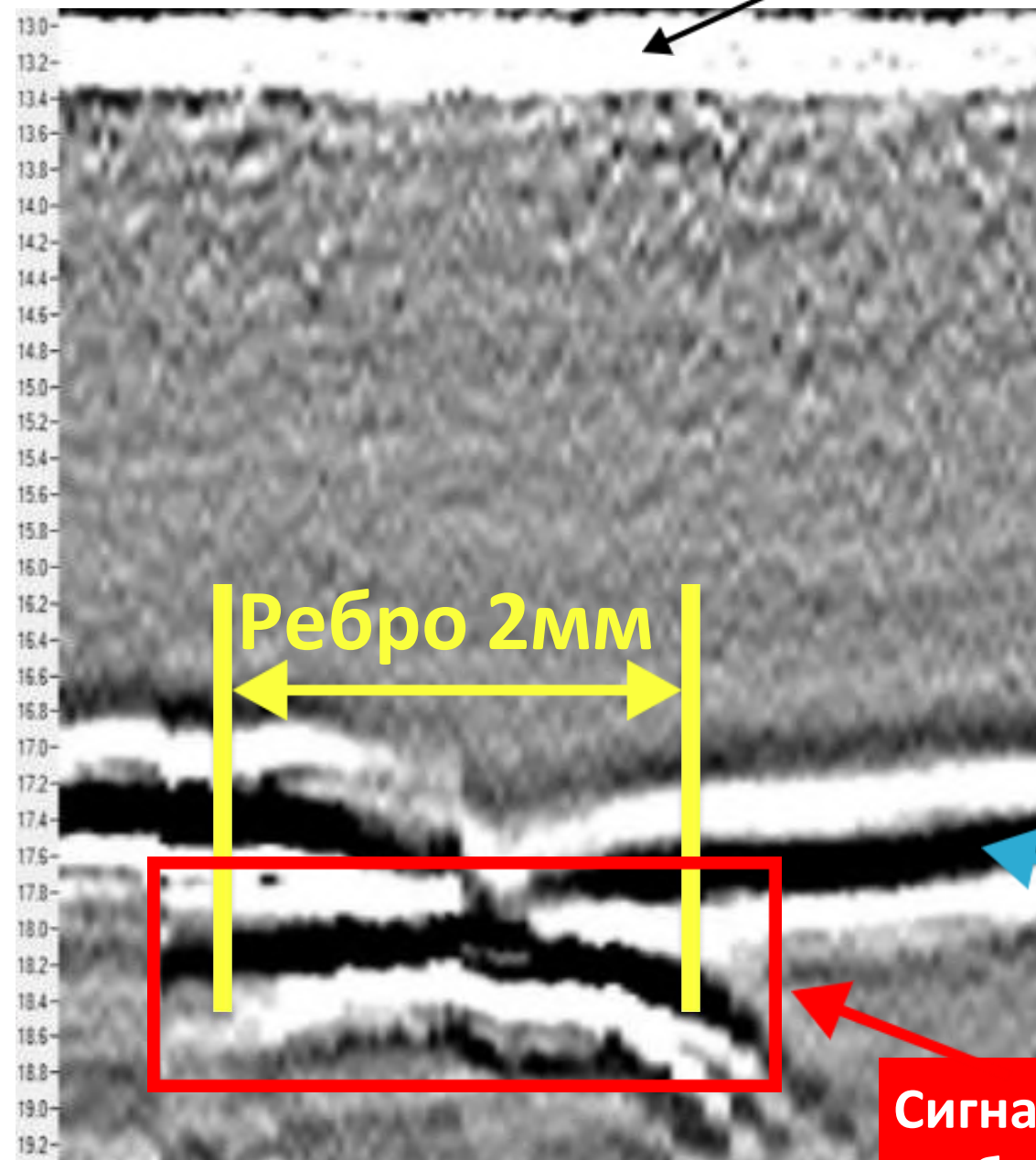
КЛУС ребра без дефекта



КЛУС несплошности в ребре

Область сканирования - 4мм

Поверхность образца



Ребро 2мм

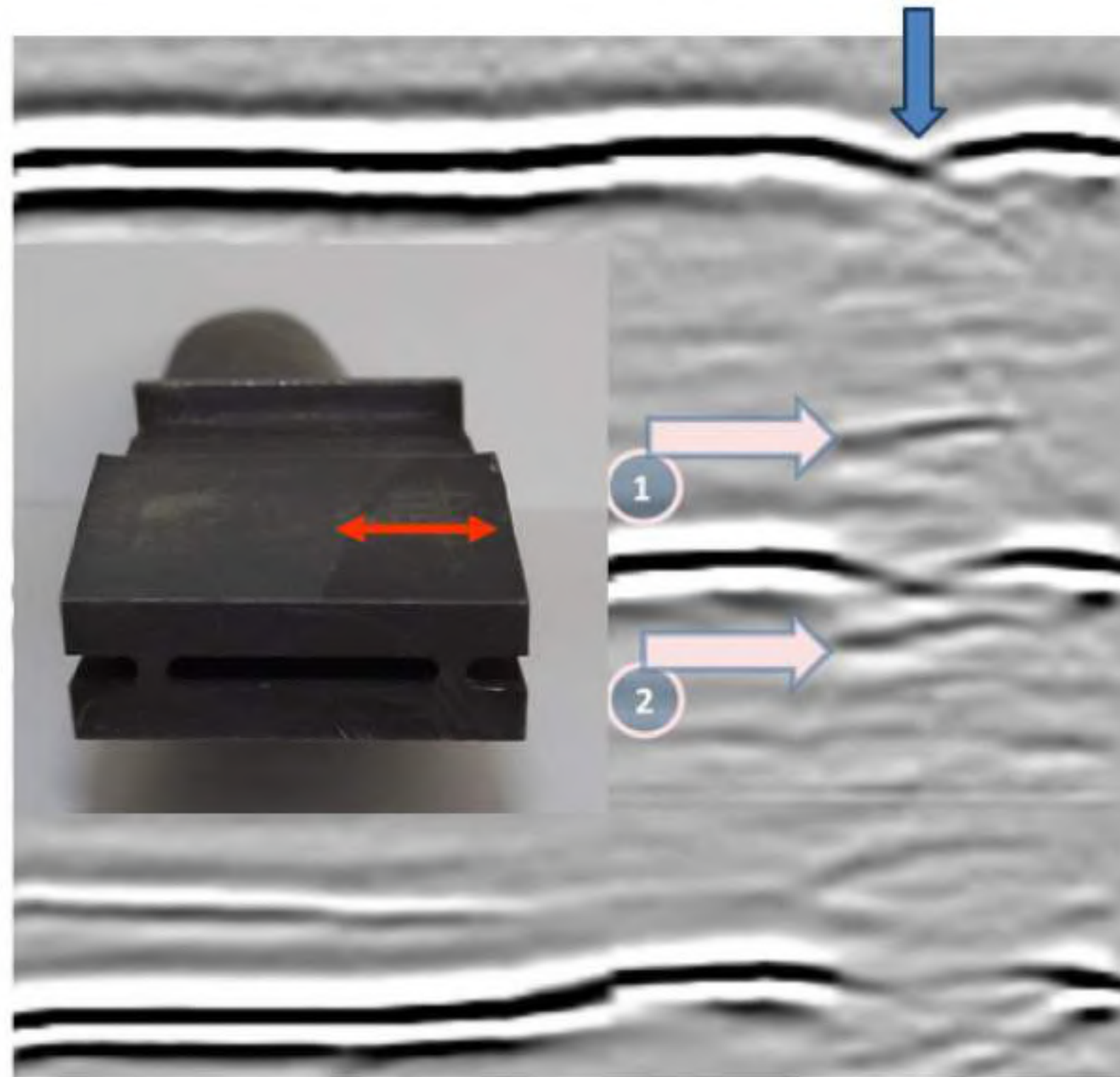
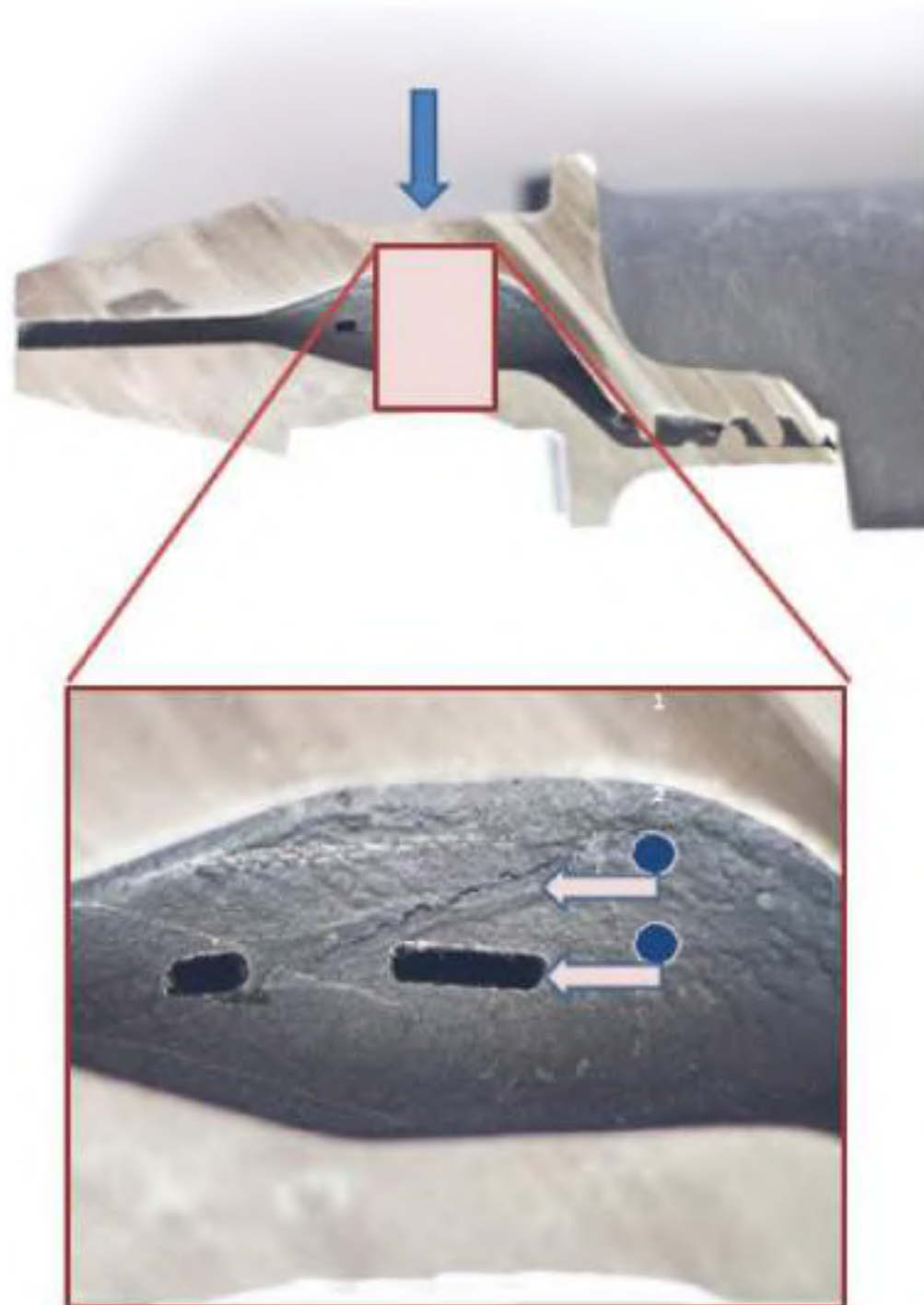
Дно оболочки

Сигнал от несплошности на глубине ~0.5 мм за оболочкой



КЛУС перемычки лопатки

Скан через перемычку лопатки

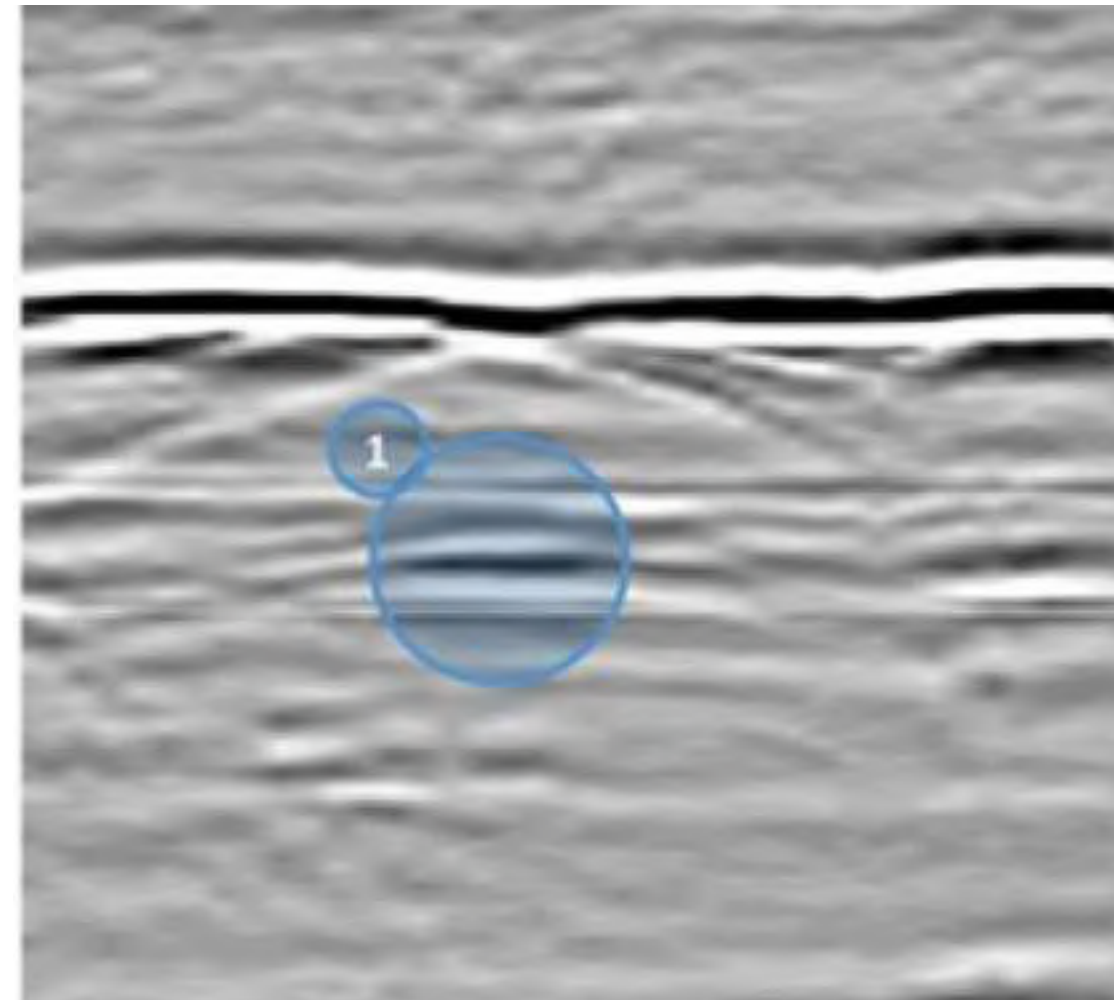
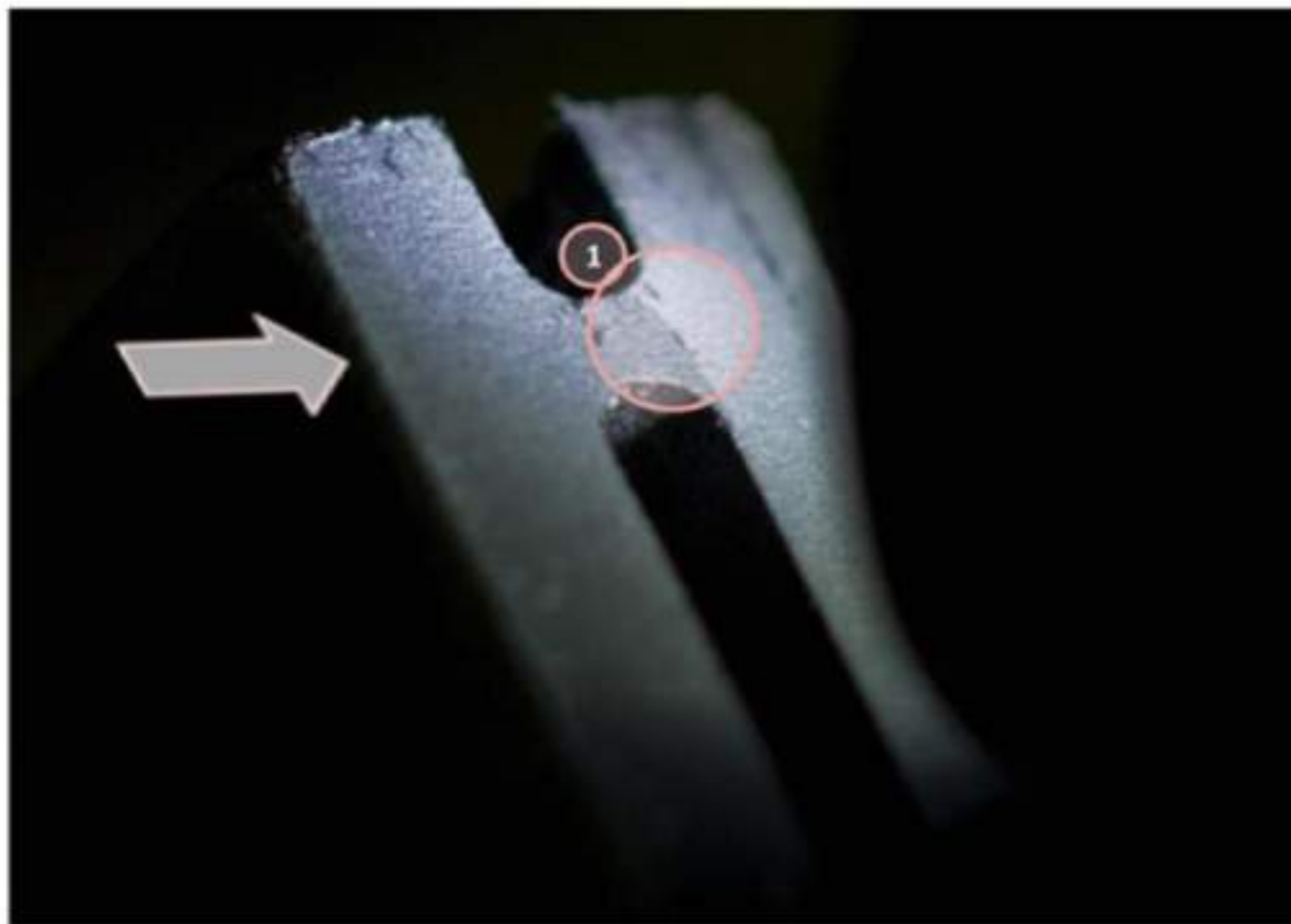


В перемычке лопатки
обнаружено две
несплошности:

1 – трещина,
2 – искусственная
несплошность.

Оба дефекта ребра
выявляются КЛУС

КЛУС разориентации зерен в перемычке лопатки



В зоне 1 на перемычке монокристаллической никелевой лопатки видна граница разориентации зерен. Если угол разориентации кристаллических осей зерен превышает 25° , то эта граница может быть обнаружена КЛУС.

КЛУС зоны 1 разориентации осей зерен представлен на рисунке.

KEENETICA

Измерение
локальных
упругих модулей
с КЛУС

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

КЛУС разориентации зерен в перемычке лопадки

Модуль Юнга $E = \rho c_s^2 \left(\frac{3c_l^2 - 4c_s^2}{c_l^2 - c_s^2} \right)$

Модуль сдвига $G = \rho c_s^2$

Коэффициент Пуассона $\nu = \frac{c_l^2 - 2c_s^2}{2(c_l^2 - c_s^2)}$

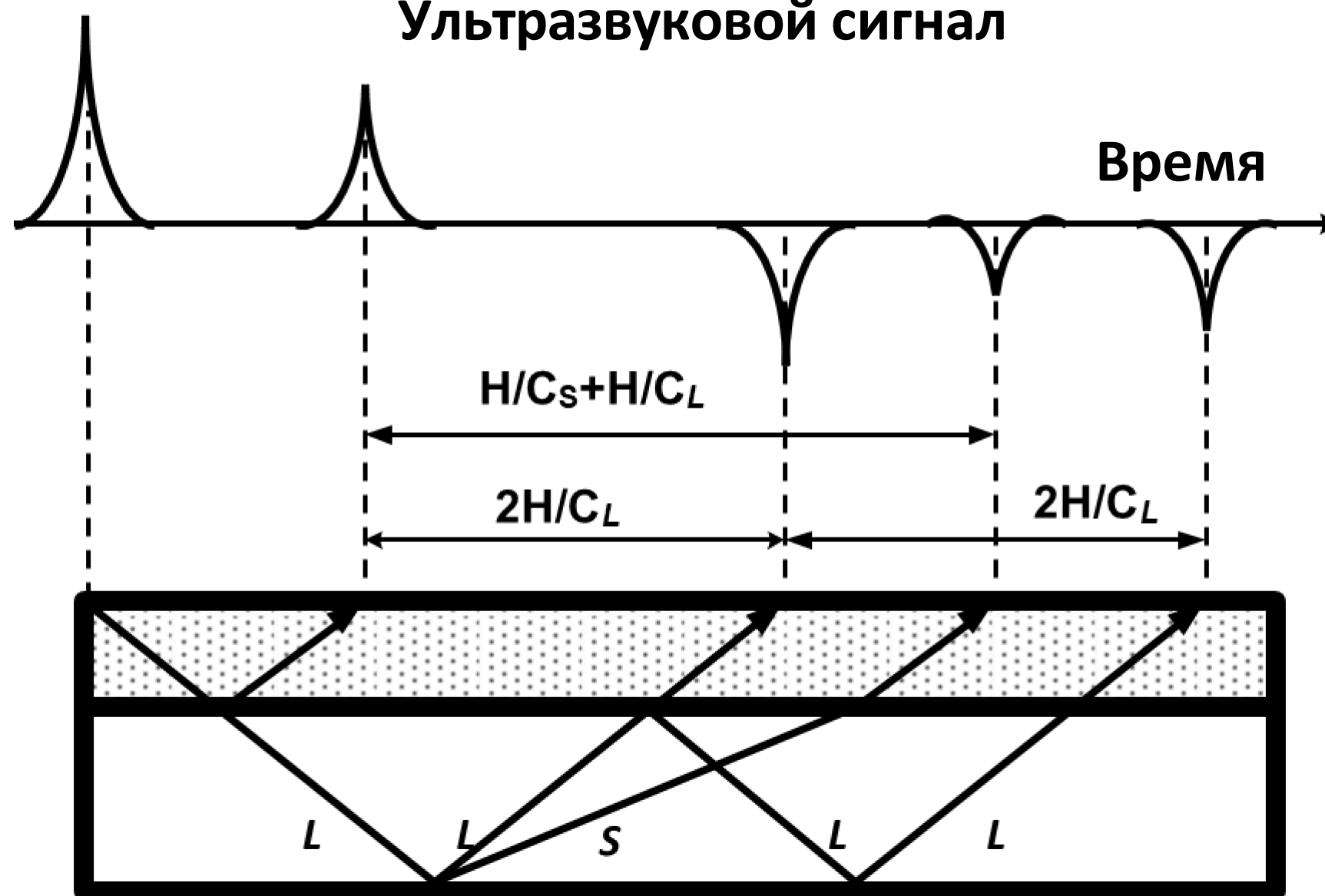
Локальные упругие модули рассчитываются по известной плотности и измеренным скоростям продольных и сдвиговых волн

КЛУС разориентации зерен в перемычке лопадки

Зондирующий
импульс

Ультразвуковой сигнал

Время

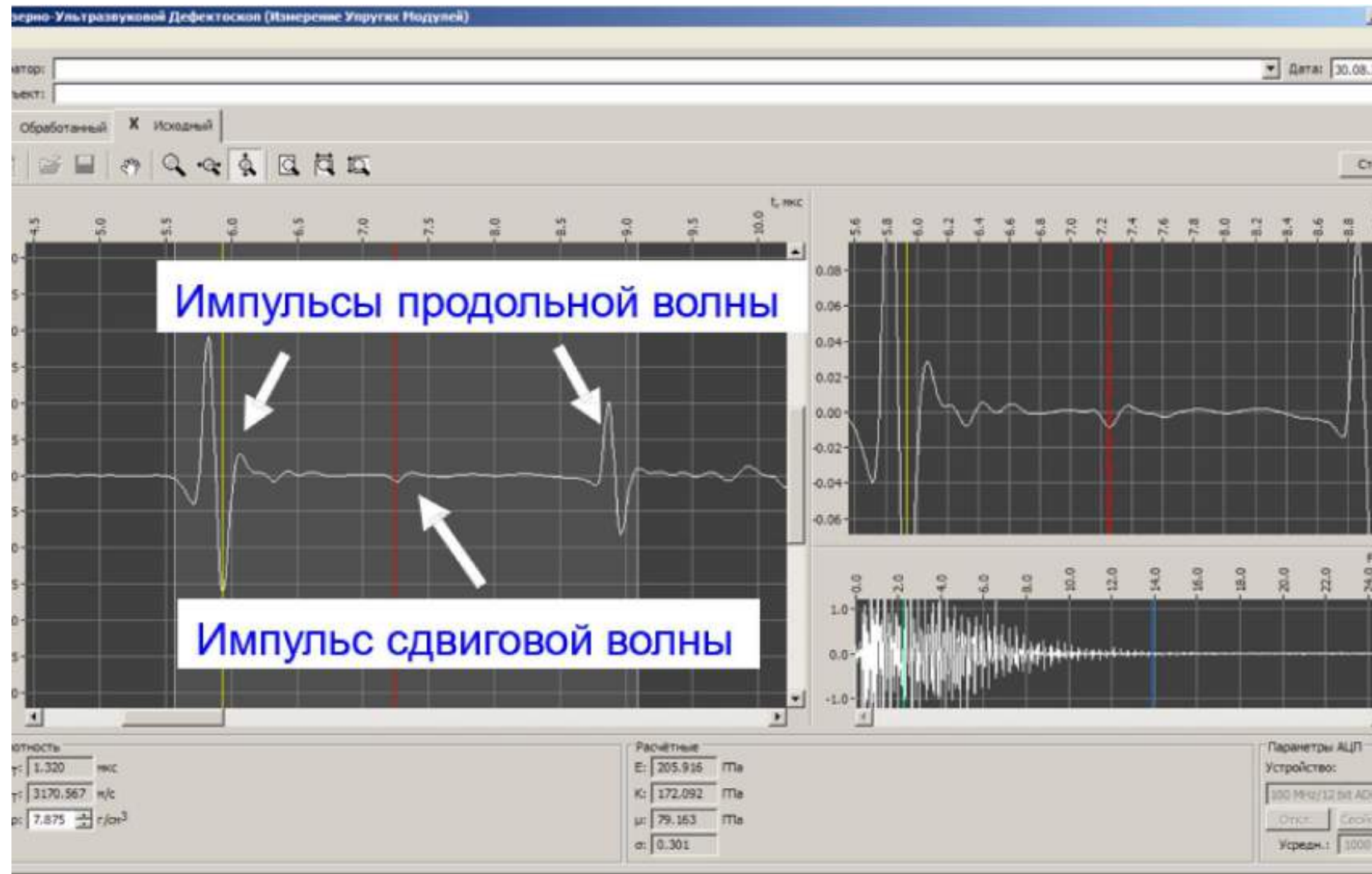


ОА-генератор

Образец

При падении УЗ пучка на свободную донную поверхность объекта отражается не только продольная волна, но происходит также конверсия в сдвиговую волну. Импульс сдвиговой волны частично конвертируется в продольную волну на границе образец-ОА-генератор, которая регистрируется пьезодетектором.

Измерение упругих модулей металла Кинетик ЛУС-01



Измерения эффективны
при толщине образца
более 1 мм

Диаметр УЗ пучка - 2 мм

Измерение скорости УЗ преобразователем ПЛУ-6Н-02

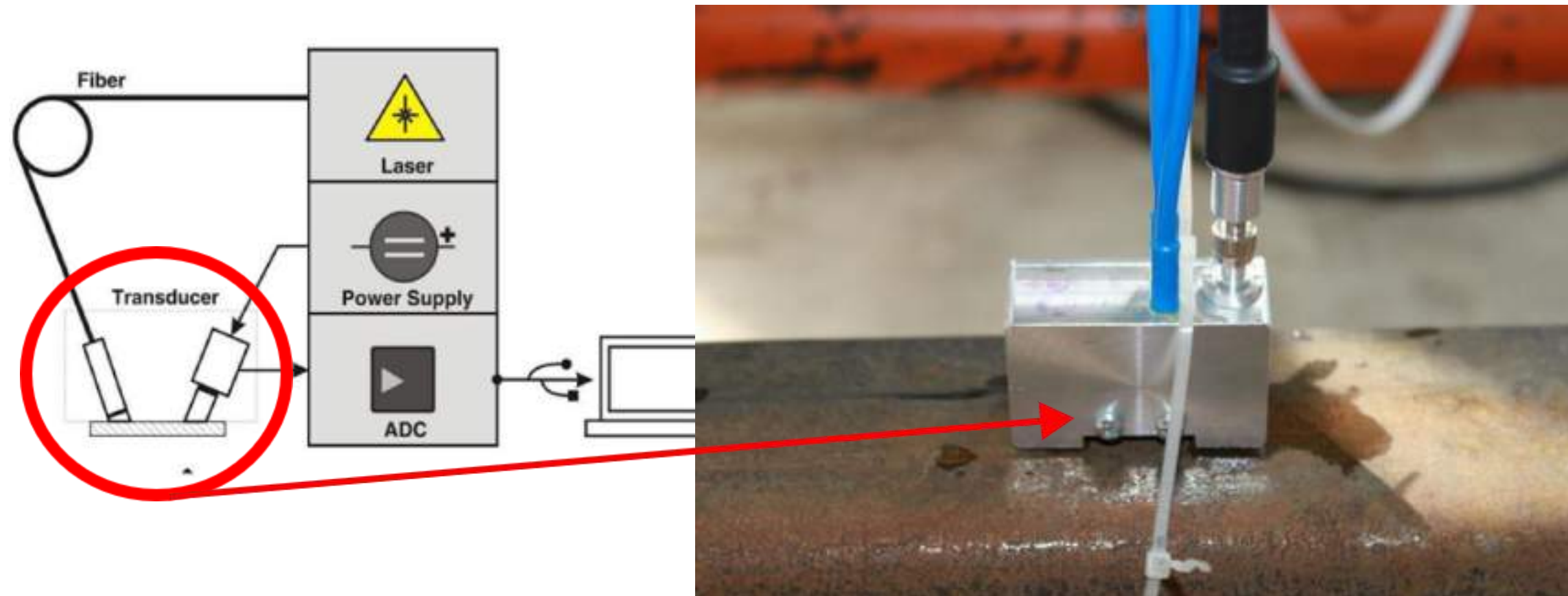


Схема ОА преобразователя ПЛУ-6Н-02.

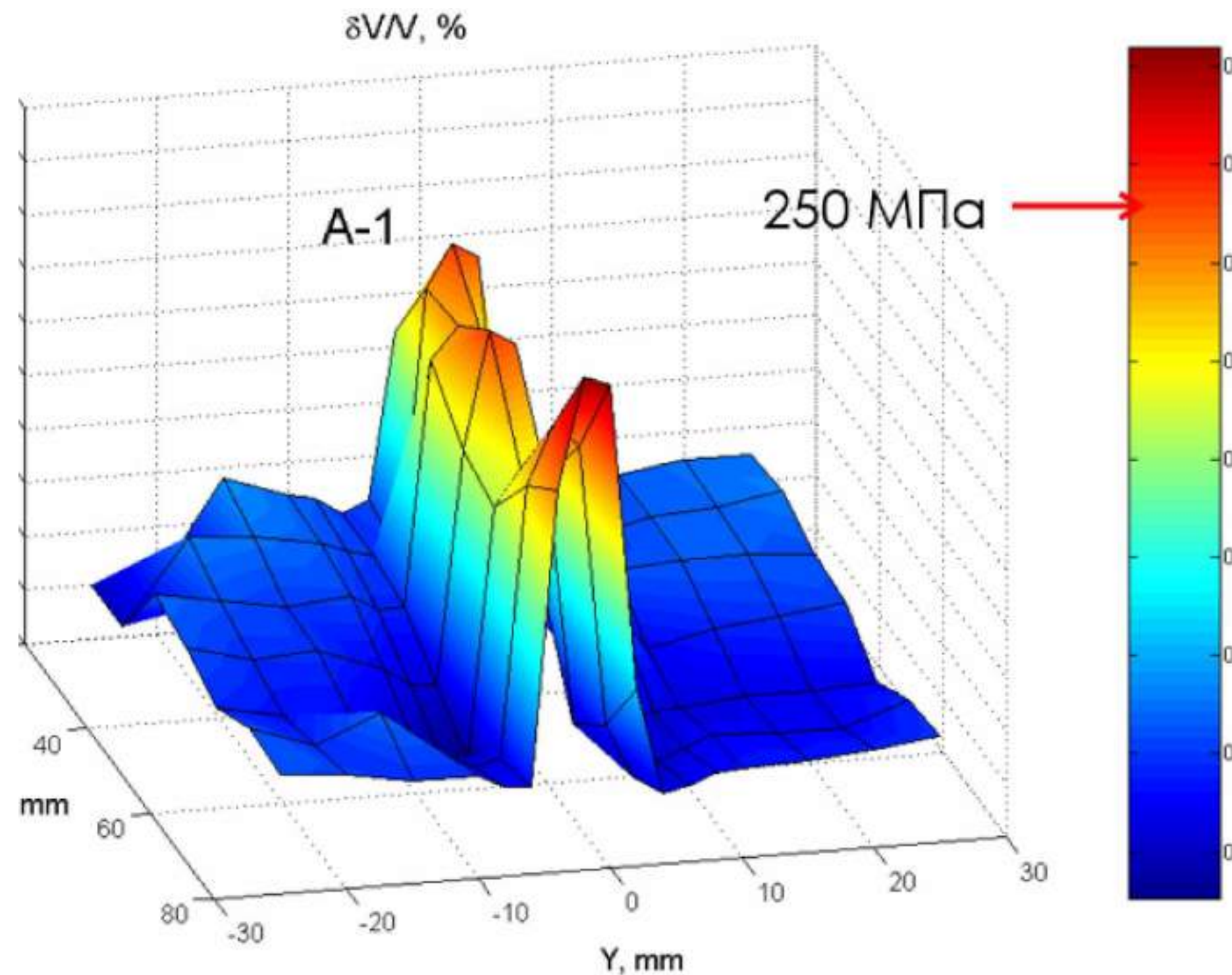
База измерений - 30 мм
Ширина УЗ пучка - 3 мм

KEENETICA

Контроль
напряженных
состояний с
КЛУС

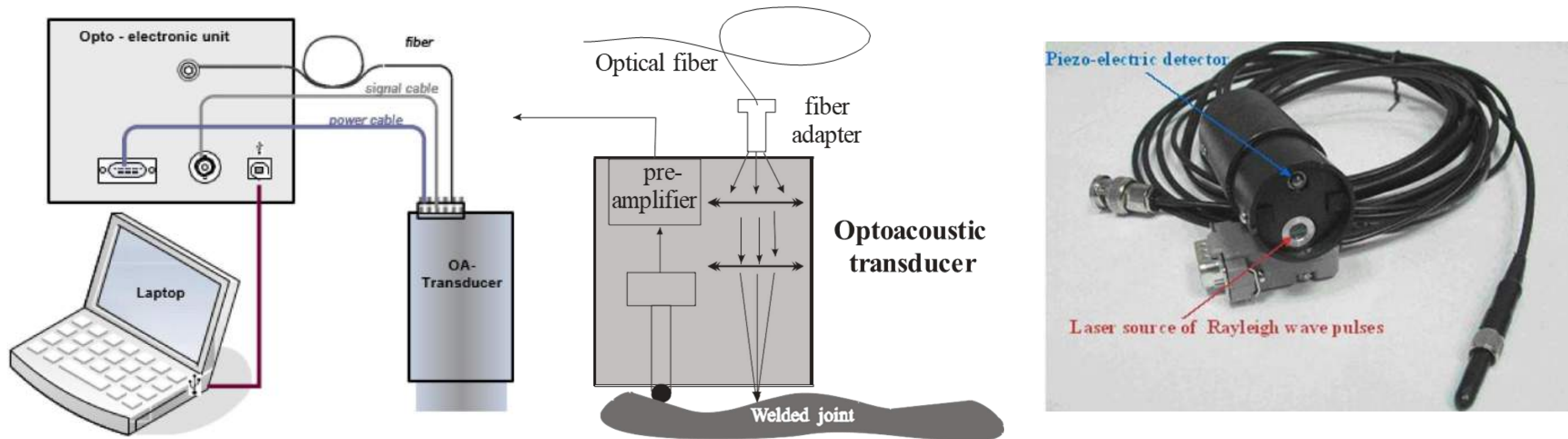
РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ

КЛУС остаточных напряжений сварного шва



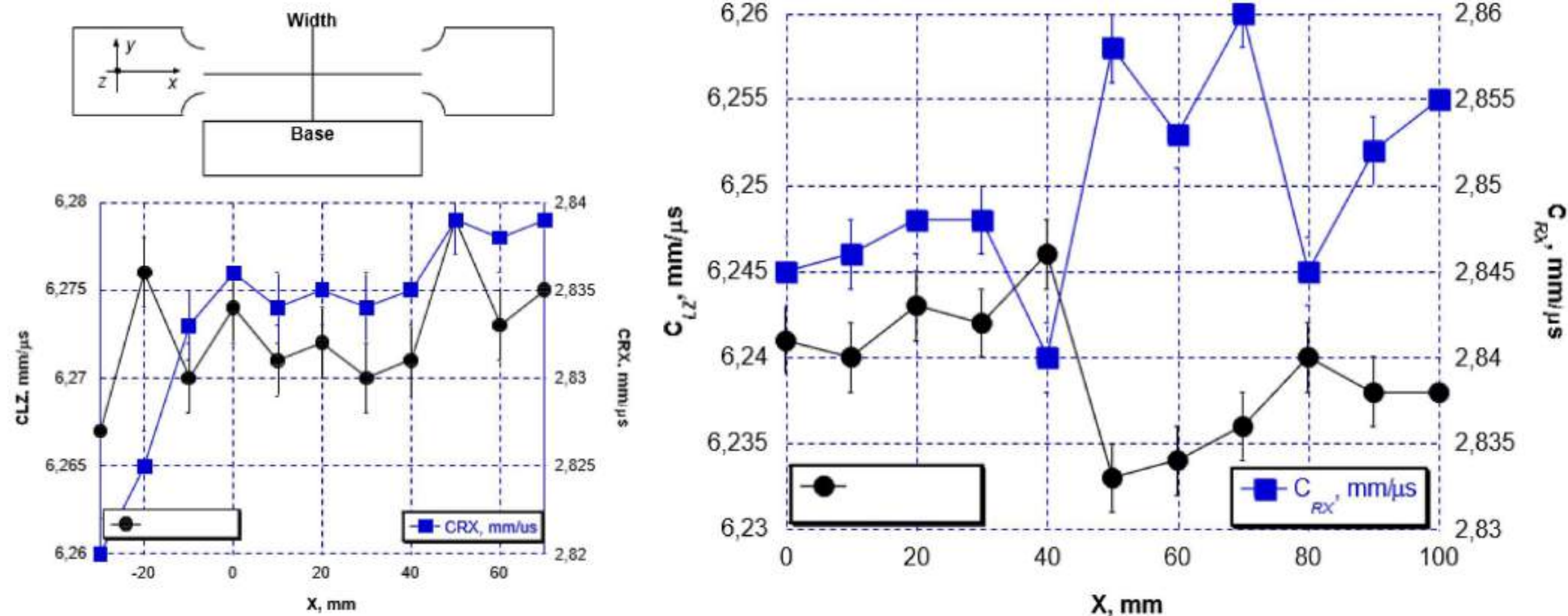
Распределение остаточных напряжений в пластине из стали 12Х18Н10Т толщиной 8.6 мм, проваренной электронным лучом с двух сторон. Аналогичные измерения возможны только с помощью нейтронографии. В отличие от нее, лазерный ультразвук позволяет производить измерения непосредственно на объекте контроля.

ЛУ измерение скорости рэлеевских волн



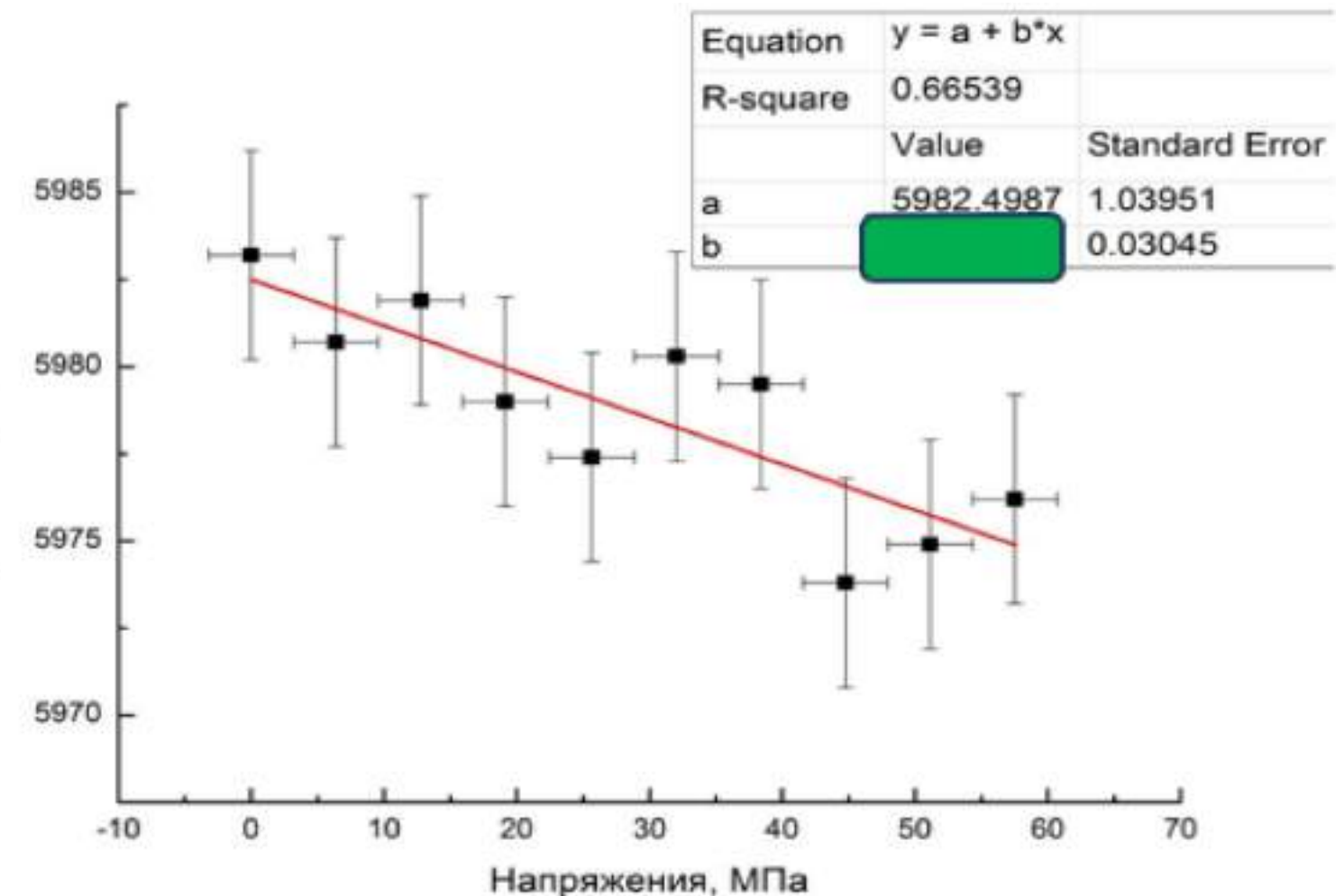
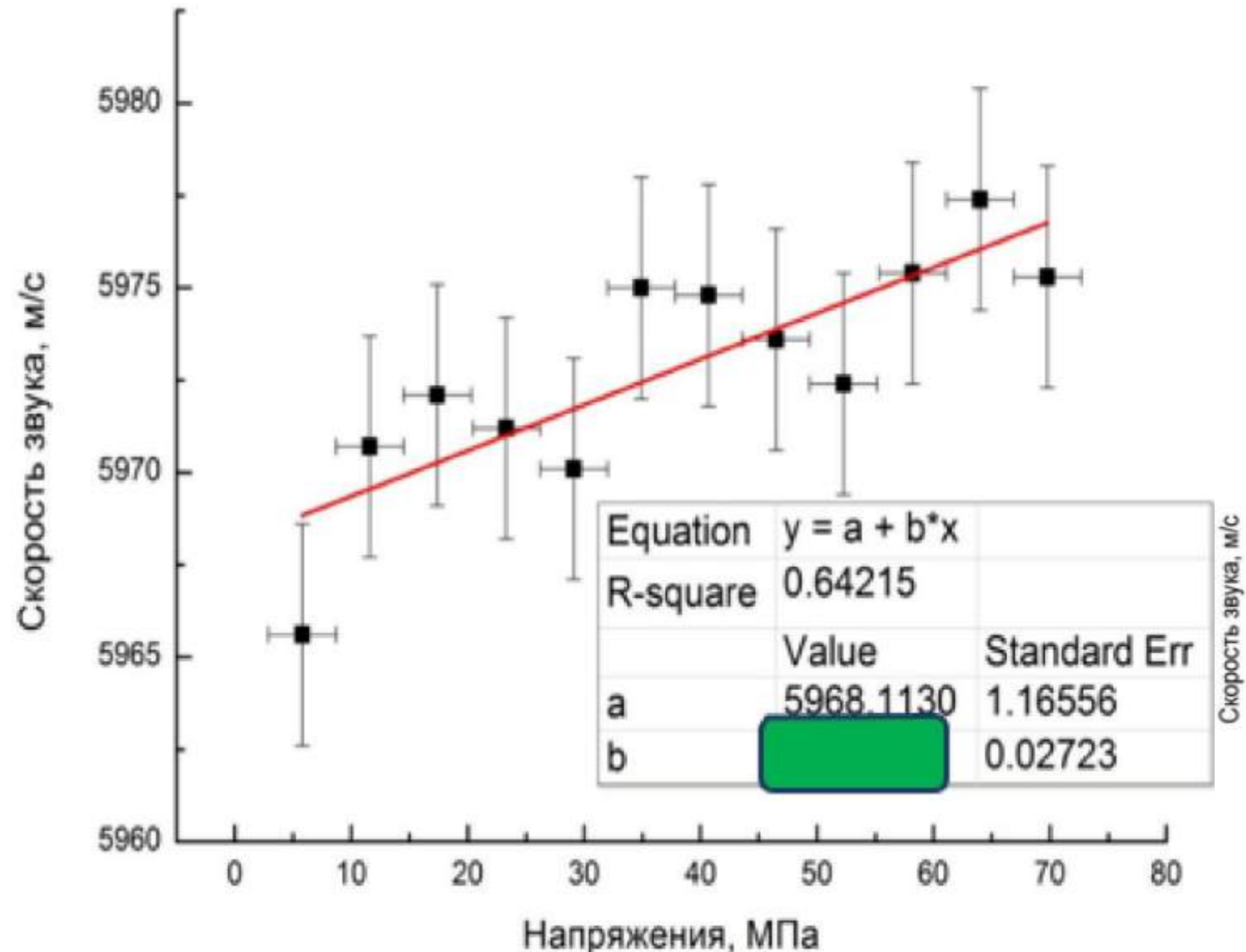
Фокусированный лазерный пучок возбуждает короткий импульс Рэлеевских волн, который распространяется по исследуемой поверхности и регистрируется точечным пьезоприемником. По времени распространения импульса определяется скорость ПАВ.

ЛУ КЛУС остаточных напряжений

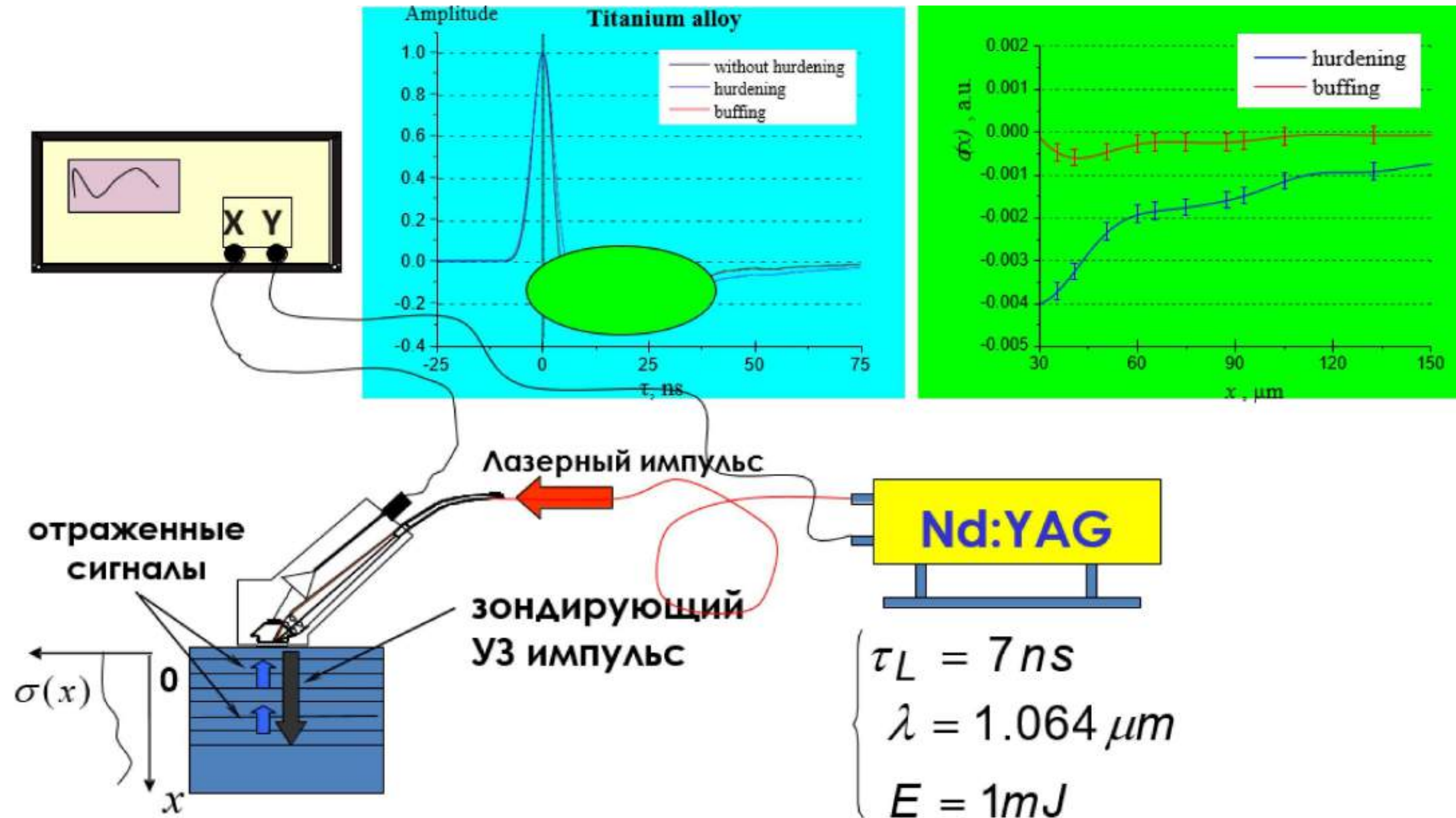


Измерения скоростей УЗ с помощью лазерно-ультразвуковой структуроскопии производятся локально. Распределение скорости продольной волны CLZ и скорости рэлевской волны CRX вдоль образца представлены выше. Измерение скоростей УЗ однозначно выявляет область локализации внутренних напряжений

Акустоупругий эффект в рельсе



КЛУС подповерхностных напряжений



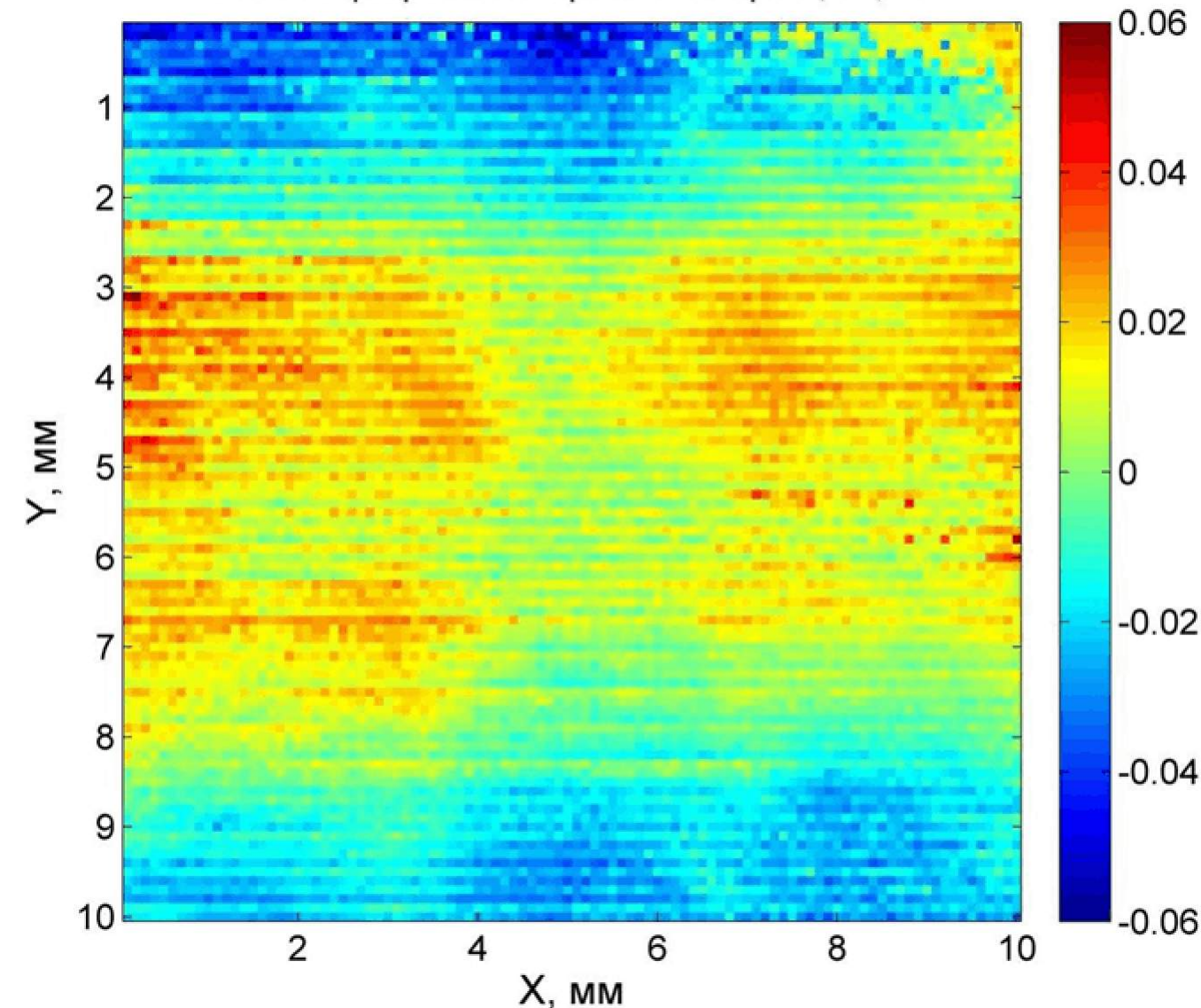
KEENETICA

КЛУС
аддитивных
технологий

РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ

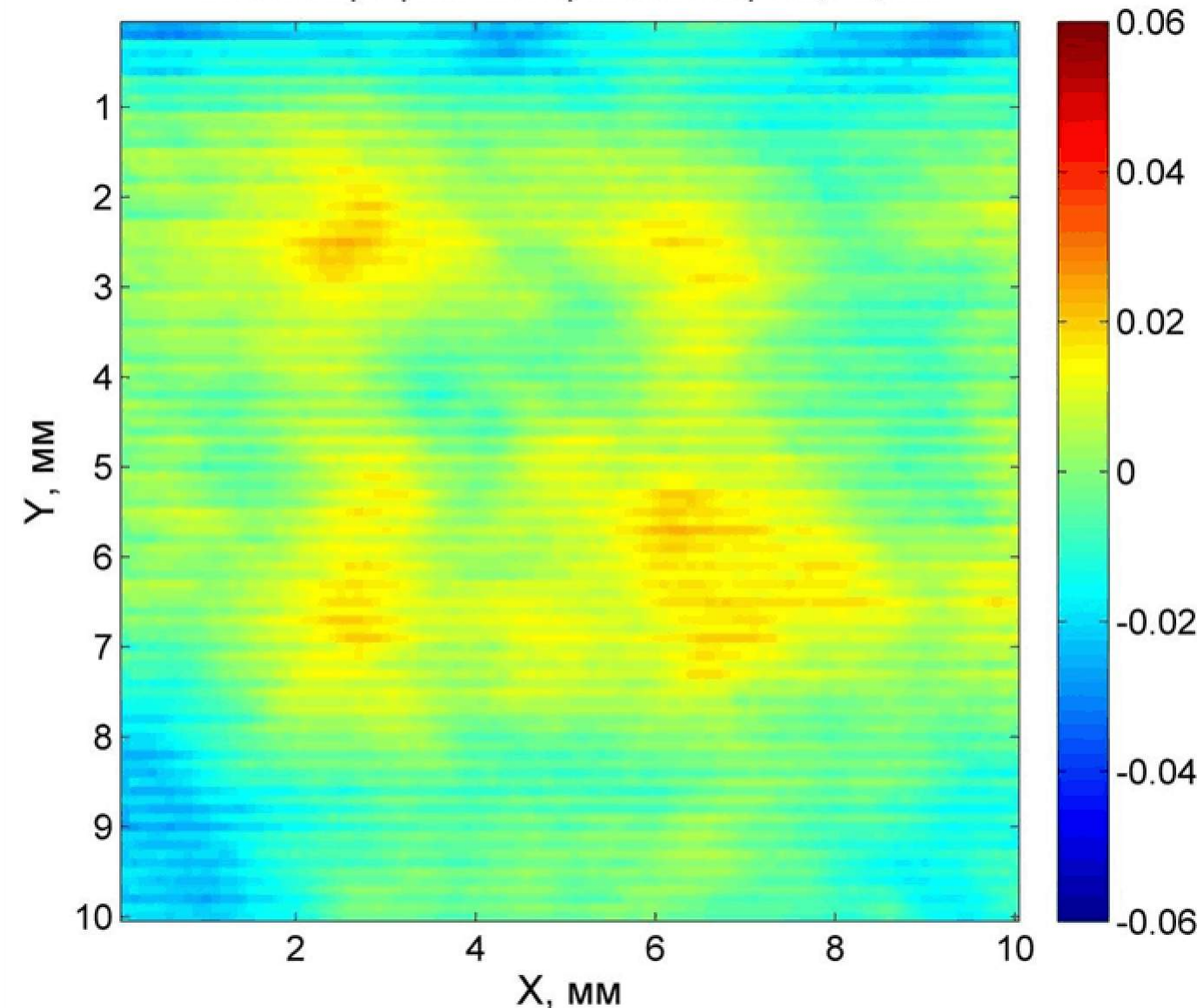
Лазерно-ультразвуковая профилометрия поверхности ТЗП

Высота профиля поверхности образца 1, мм



Профиль хромового
покрытия 100 мкм на
меди

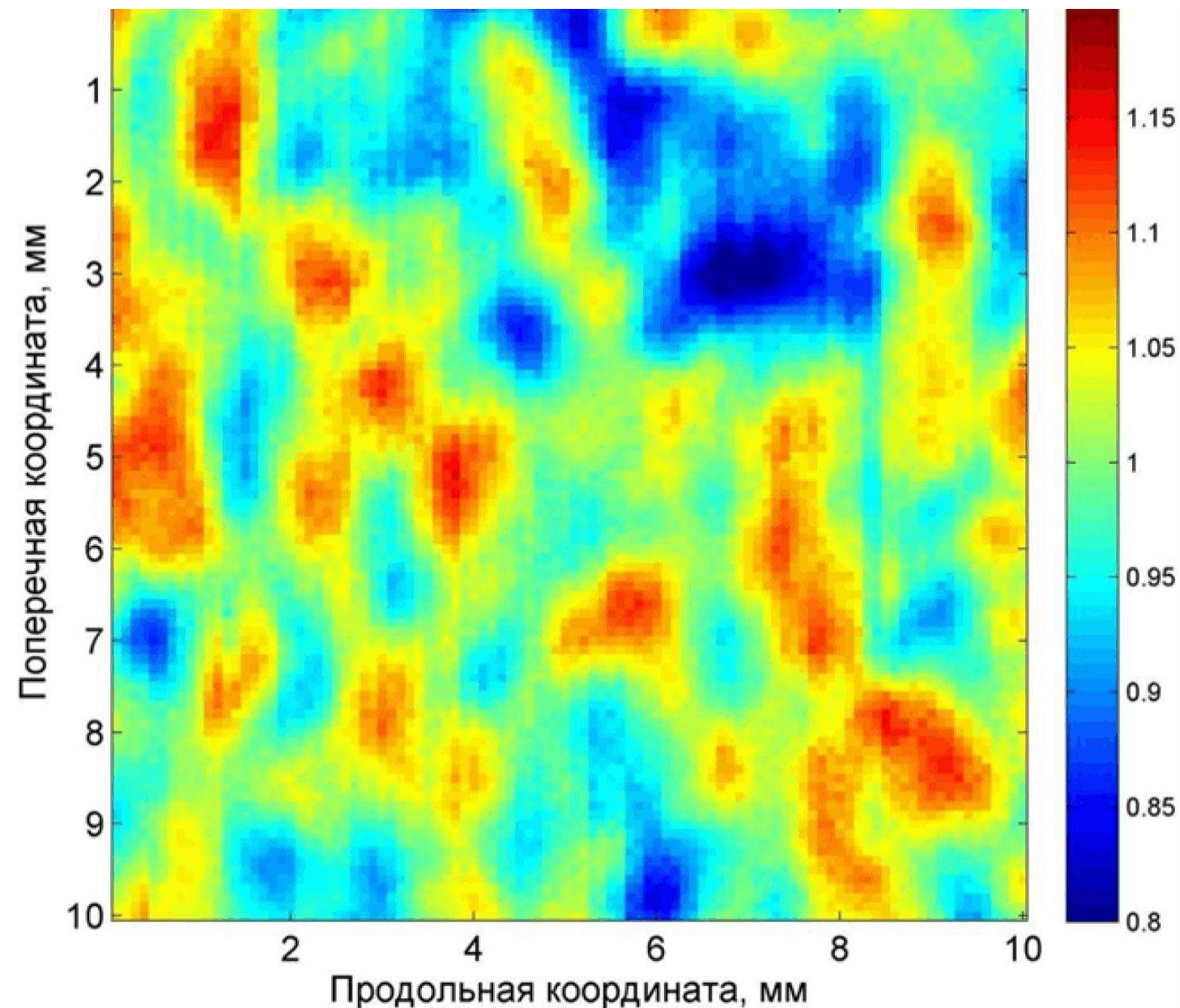
Высота профиля поверхности образца 2, мм



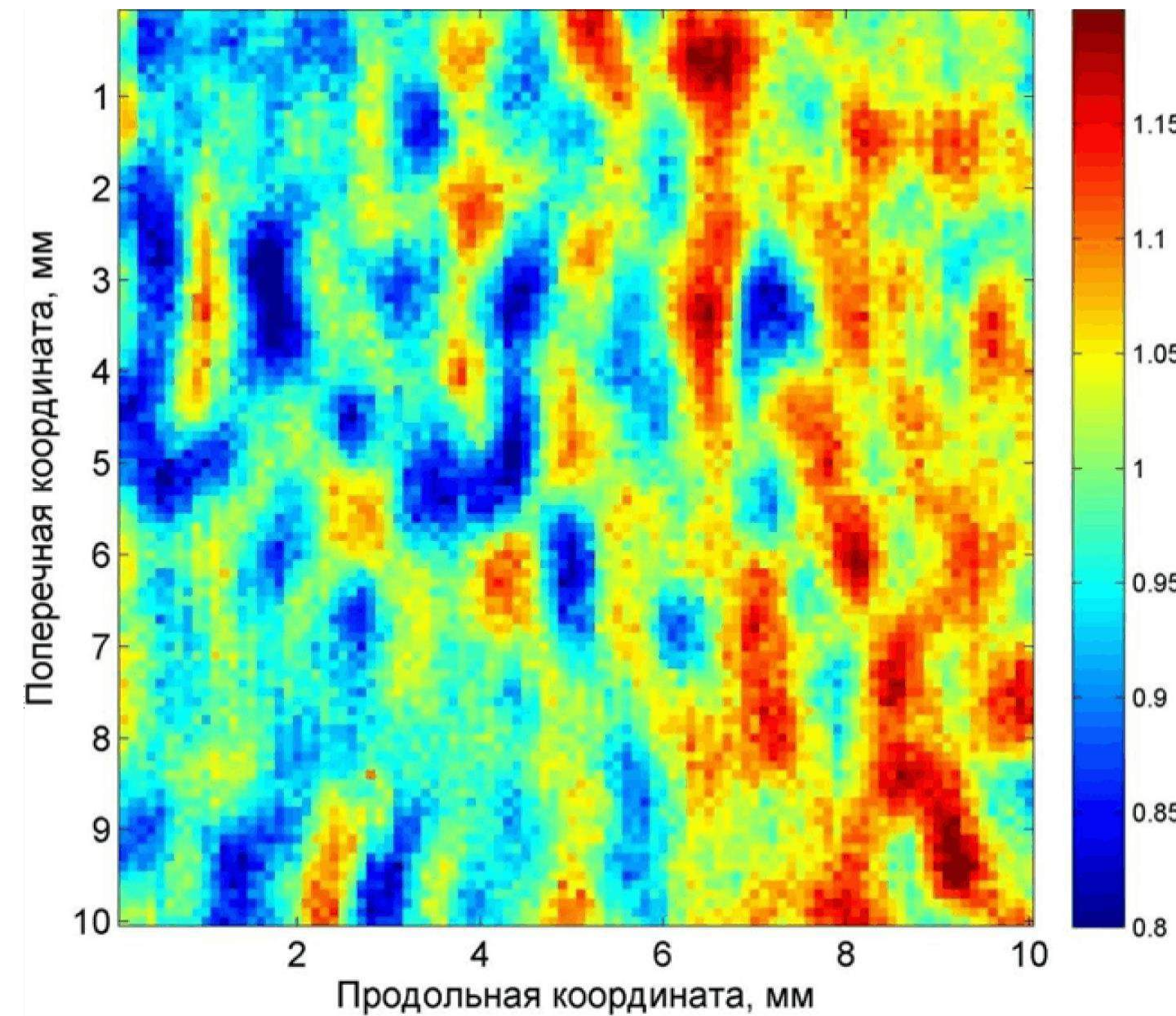
Профиль покрытия циркониевой
керамики 30 мкм на хромовом
покрытии 100 мкм на меди

Как видно,
высота профиля
определяется
с точностью не
хуже 5 мкм.
Второе
покрытие
«сглаживает»
поверхность,
высота
неровностей
уменьшается в 3
раза.

Измерение плотности ТЗП



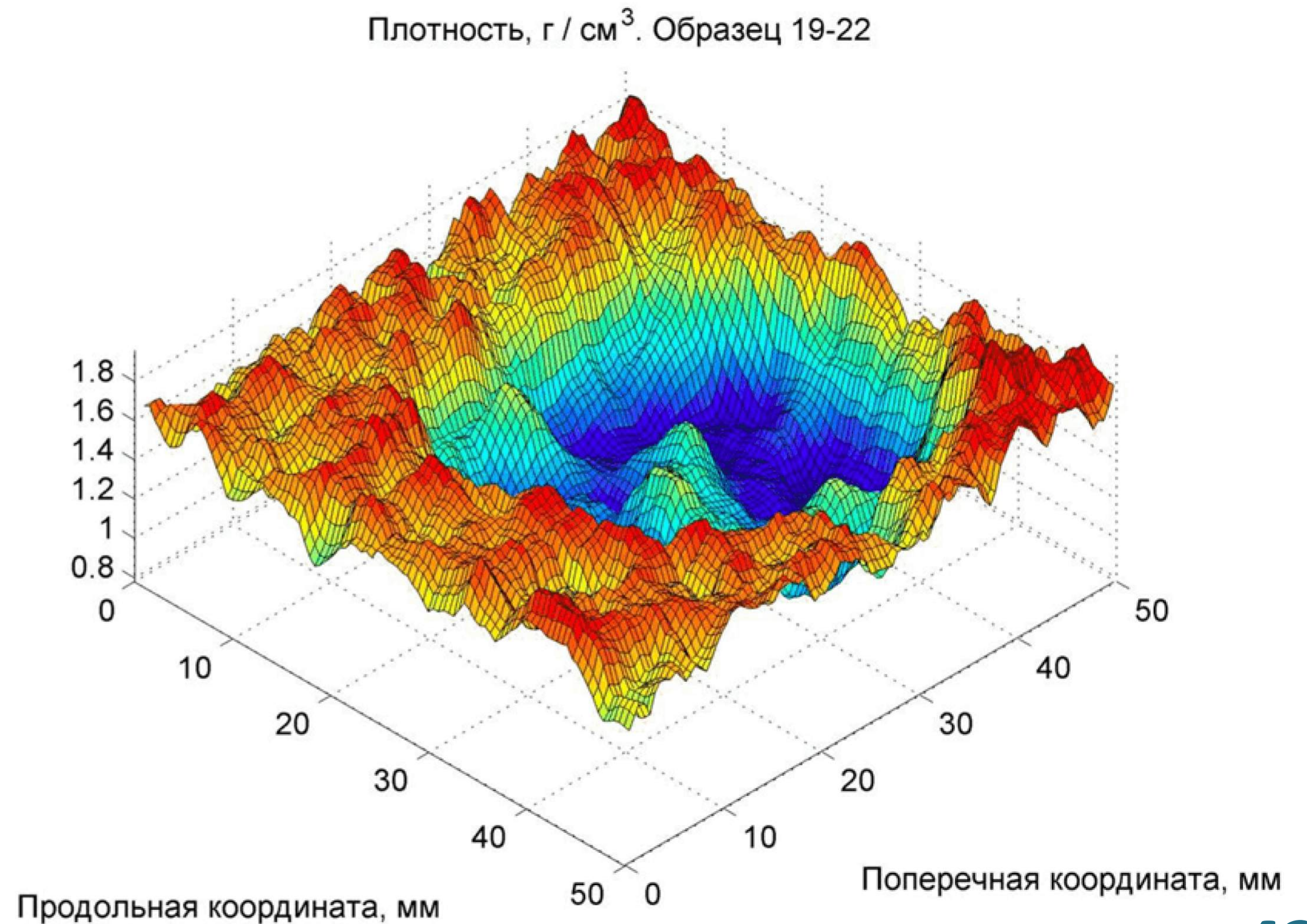
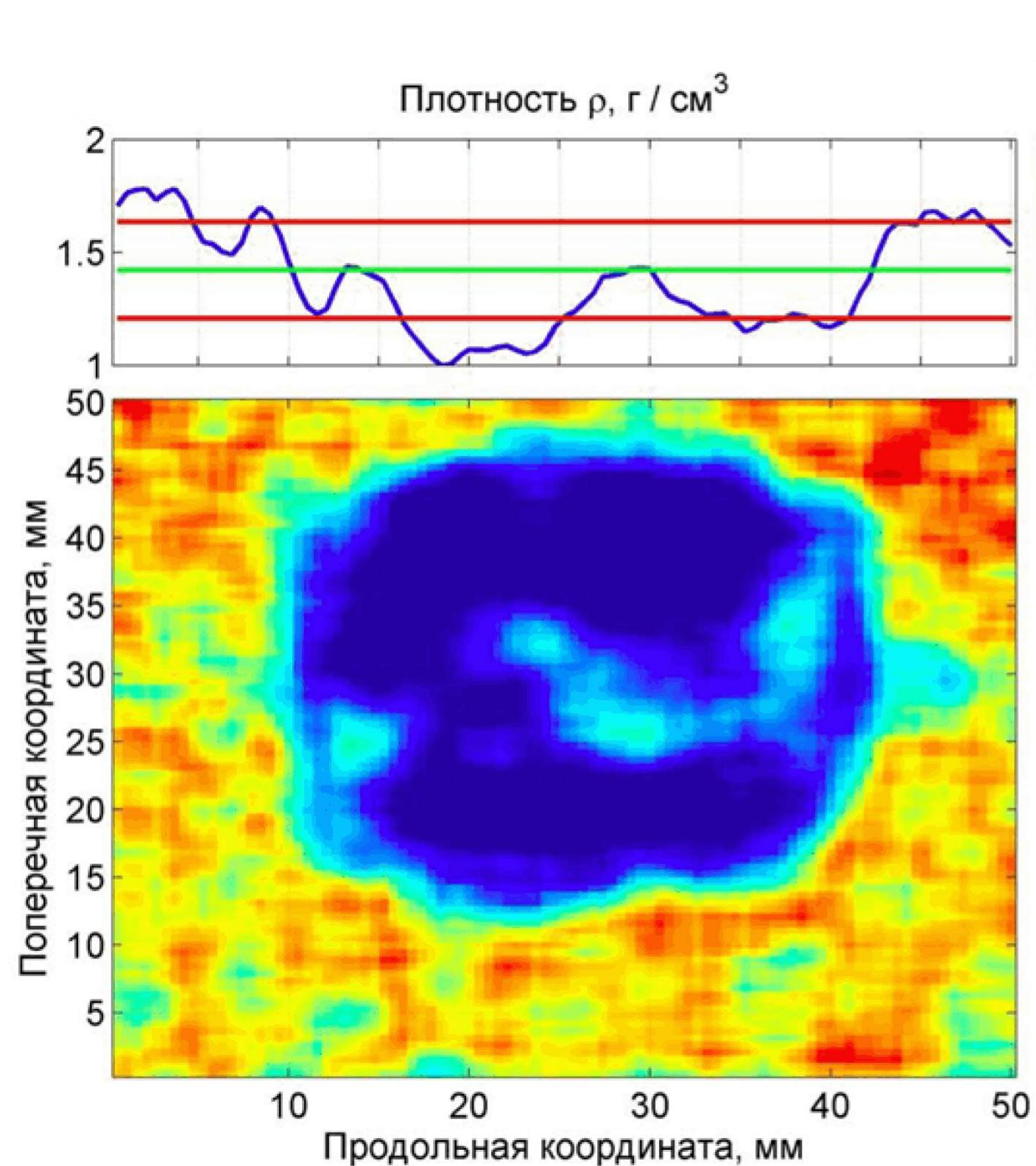
Никель-хром #100 мкм



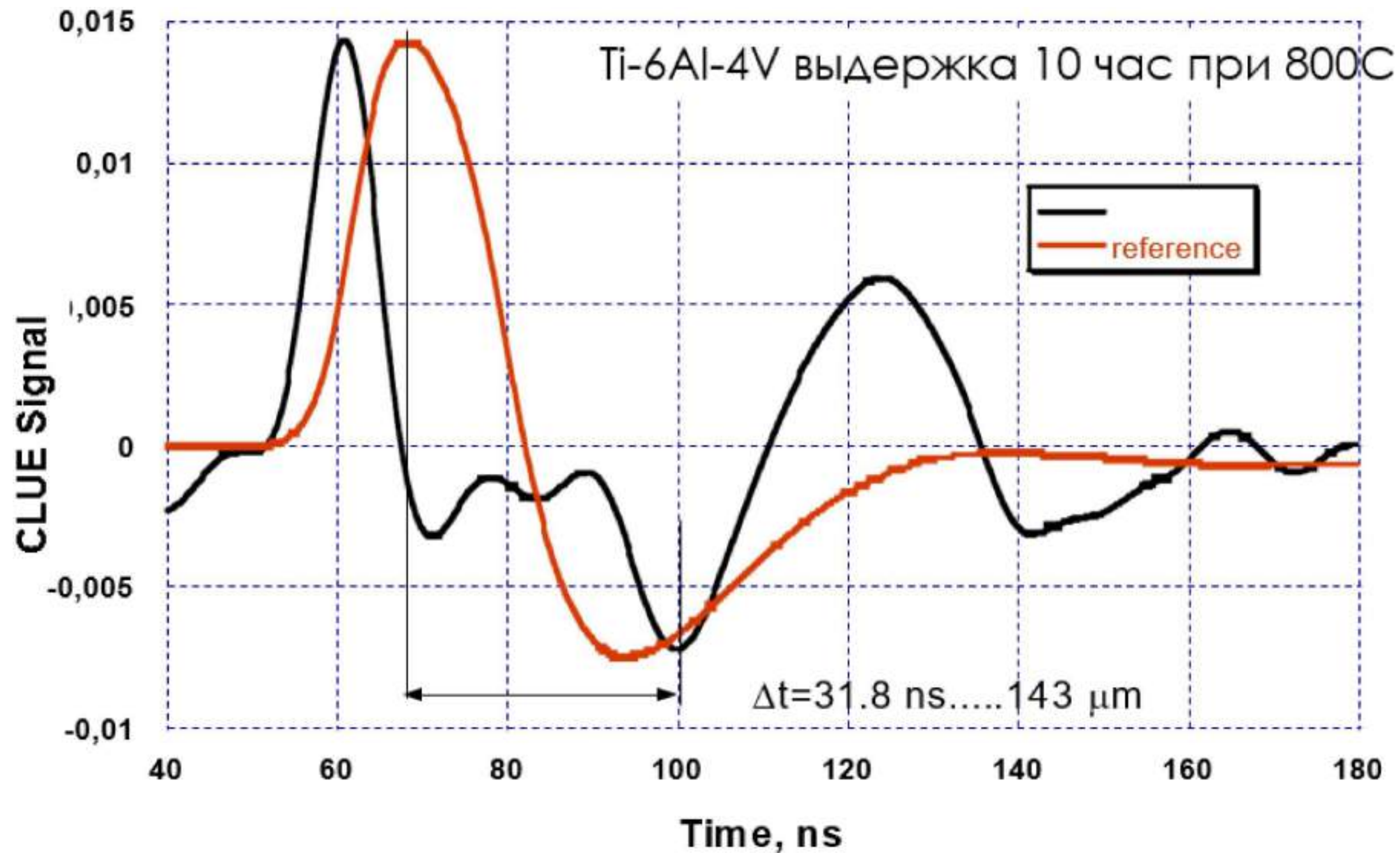
Никель-хром #100 мкм+
окись циркония #30 мкм

Относительные
вариации
плотности
определяются
по локальному
коэффициенту
отражения УЗ
от поверхности

Измерение плотности образца УУКМ



Измерение толщины окисленного слоя на титане



Различия в акустическом импедансе покрытия и основного металла делают возможным измерение толщины покрытия.

Контроль образцов ЭП648

№	плотность, г/см ³	пористость, %	V(расчет), км/с	V(изм.), км/с	энерговклад, Дж/мм
1	8.124	0.9%	5.82	5.83±0.03	0.22
2	8.105	1.2%	5.79	5.43±0.03	0.27
3	8.035	2.0%	5.73	5.71±0.03	0.22
	8.2	0.0%	5.95		

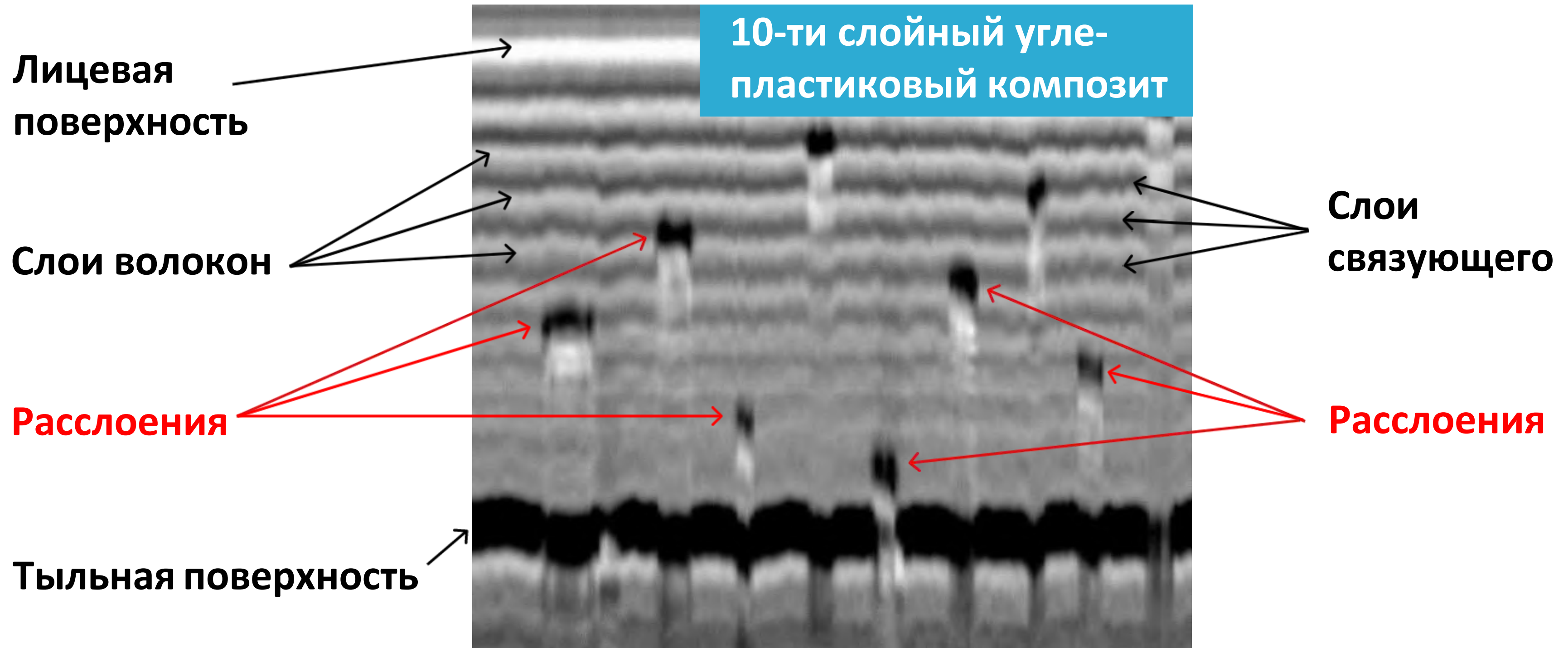
Образцы размером 25*25*25 мм изготавливались методом СЛС. Расчетная скорость УЗ определялась по измеренной плотности. Расхождение расчетной и измеренной скорости УЗ для образца №2 определяется большим энерговкладом при сплавлении и, соответственно, отличиями процесса кристаллизации. Образец №1 уплотнялся по газостатической технологии. Контрольные цифры взяты для образца проката.

KEENETICA

КЛУС изделий
из ПКМ

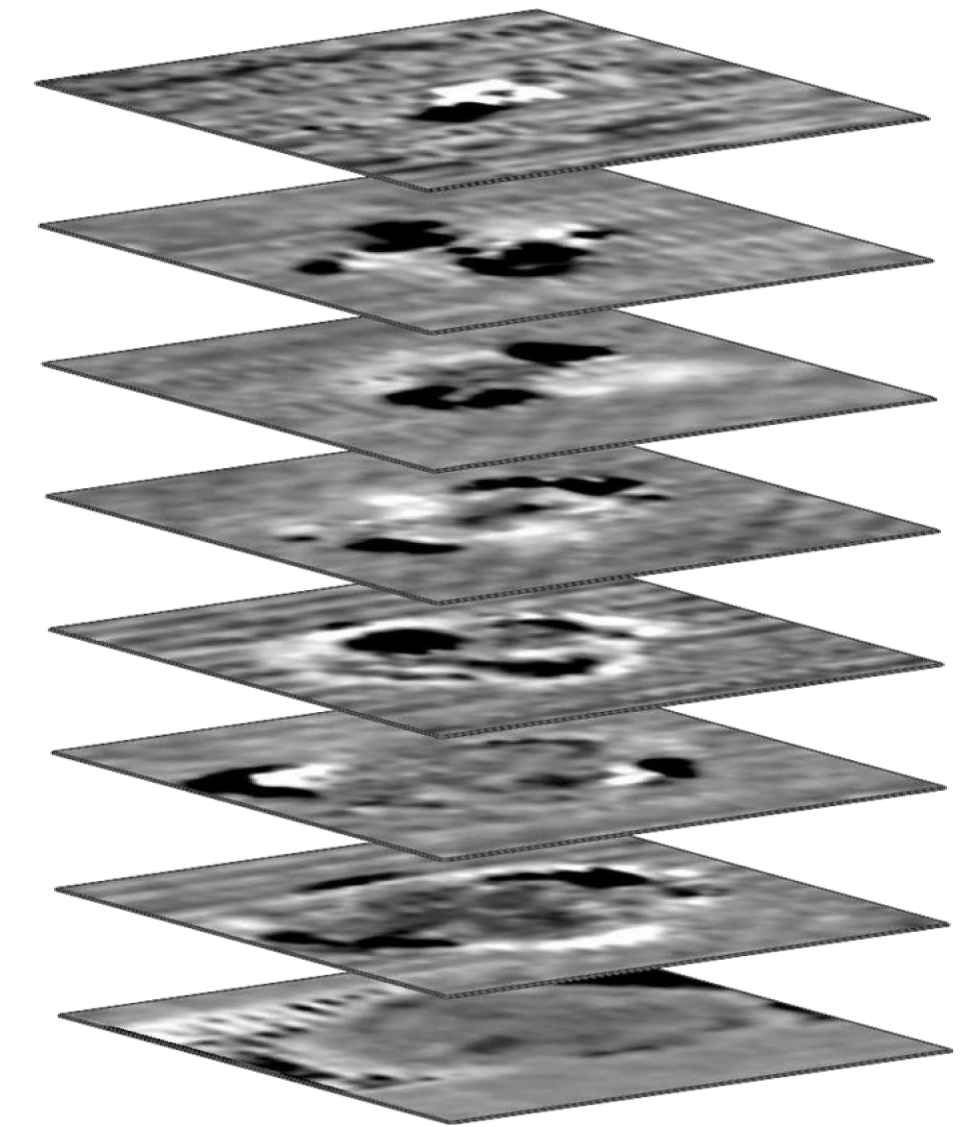
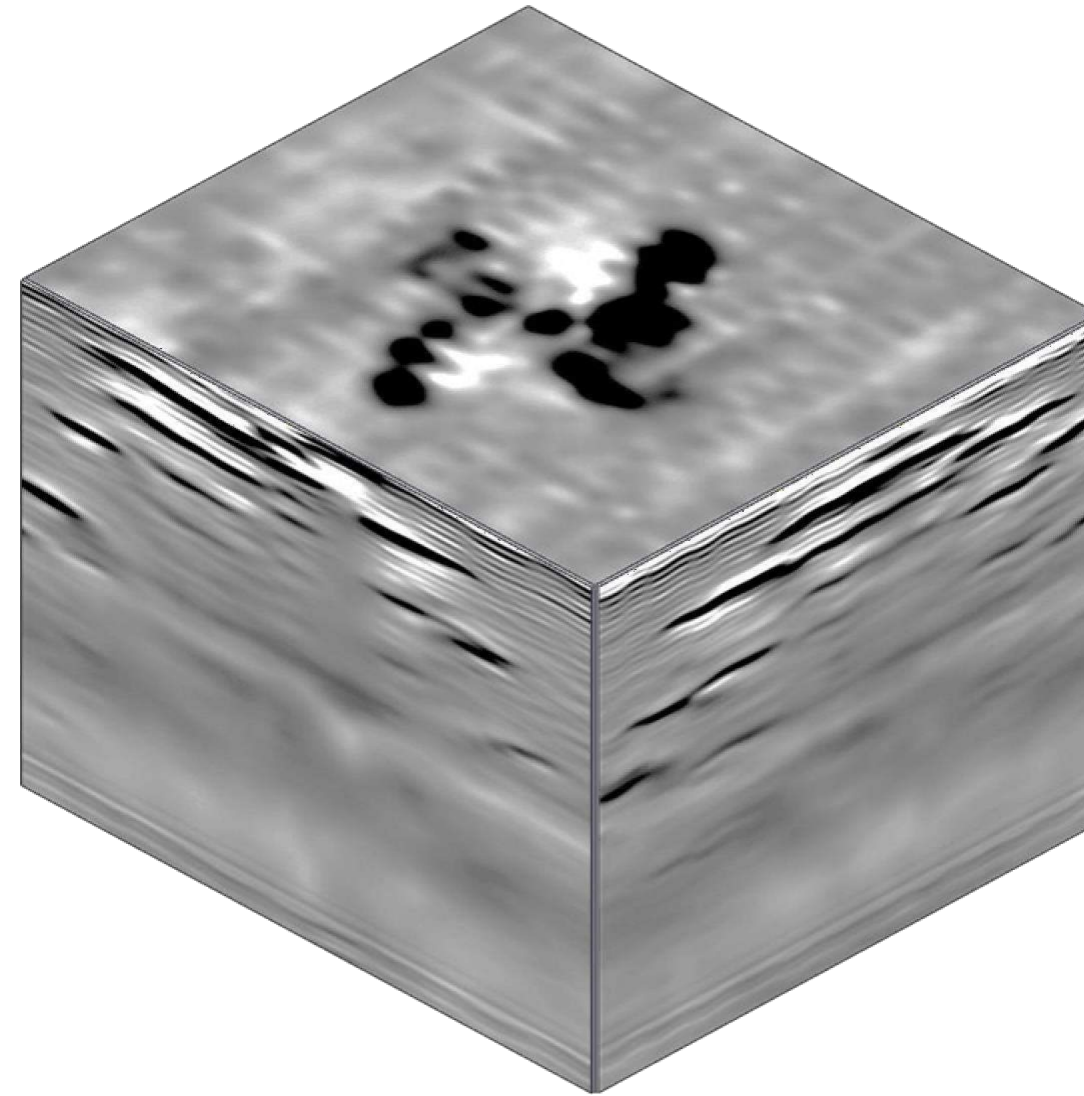
РАЗДЕЛ СЕДЬМОЙ

КЛУС расслоения в ПКМ



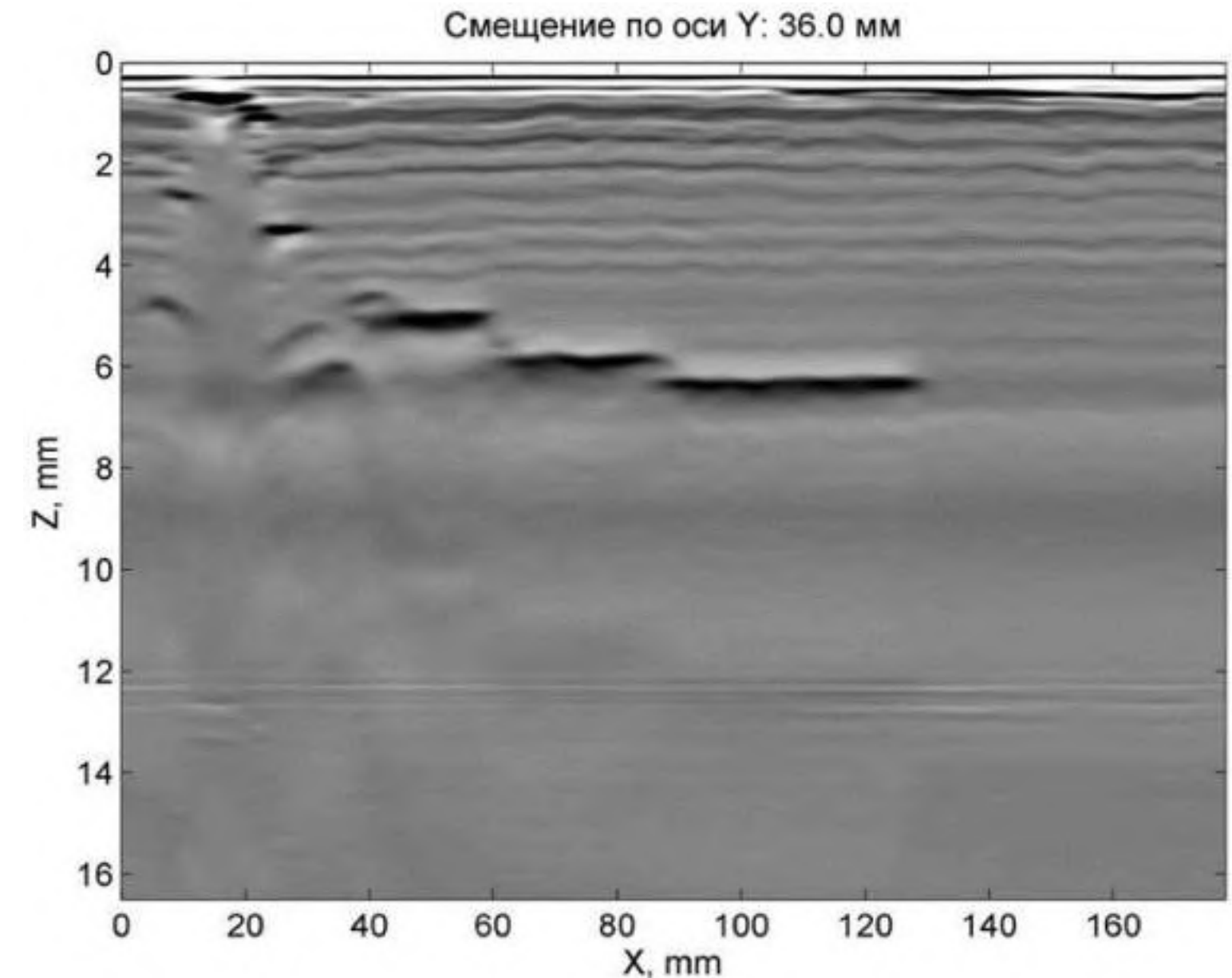
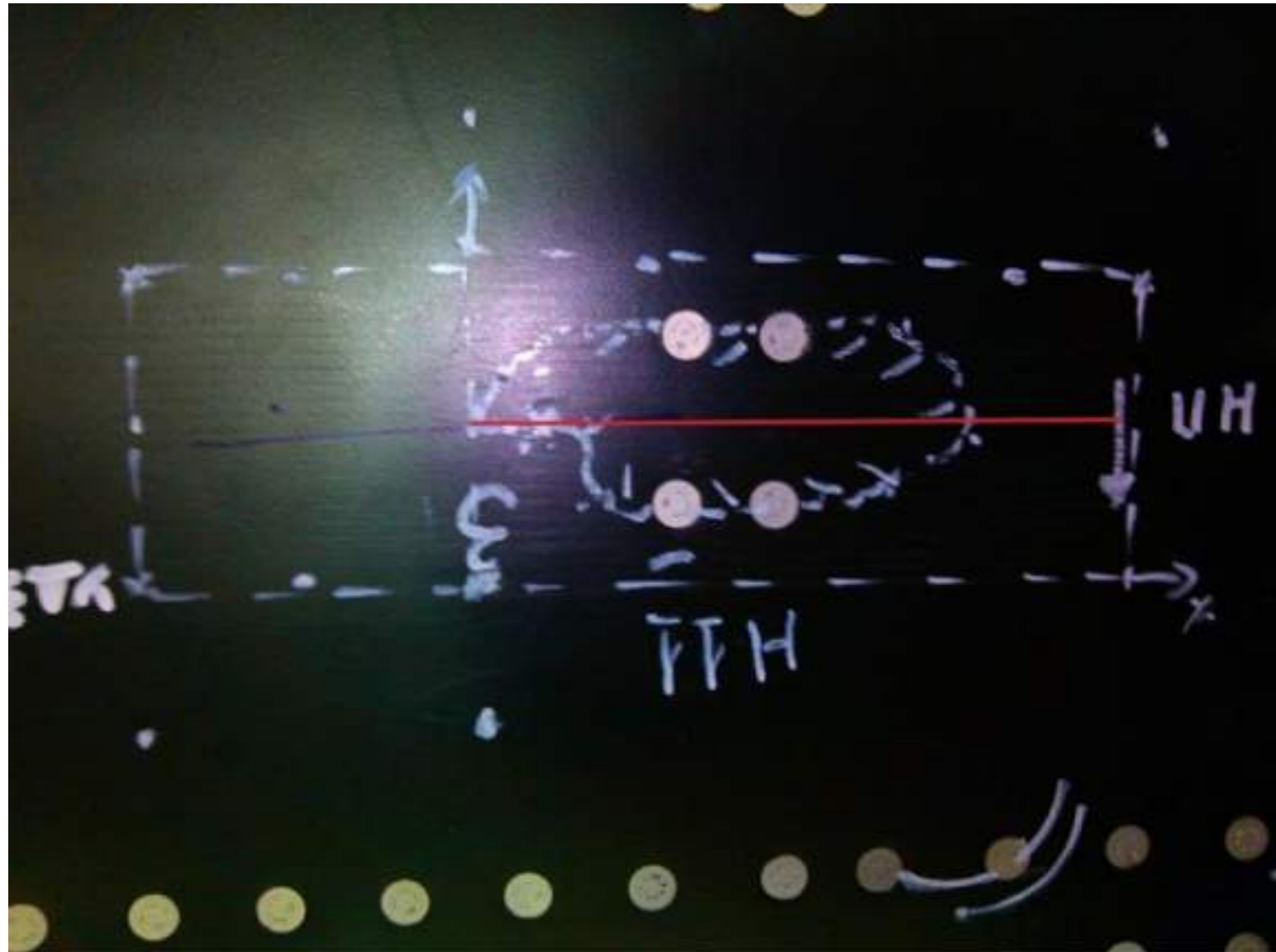
Различия в акустическом импедансе покрытия и основного металла делают возможным измерение толщины покрытия.

Ударные разрушения ПКМ. 30 Дж



Различия в акустическом импедансе покрытия и основного металла делают возможным измерение толщины покрытия. Разрушение в каждом слое распространяется вдоль направления волокон в нем. Соотношение глубины и диаметра зоны разрушения коррелирует с отношением скоростей УЗ вдоль и поперек волокон.

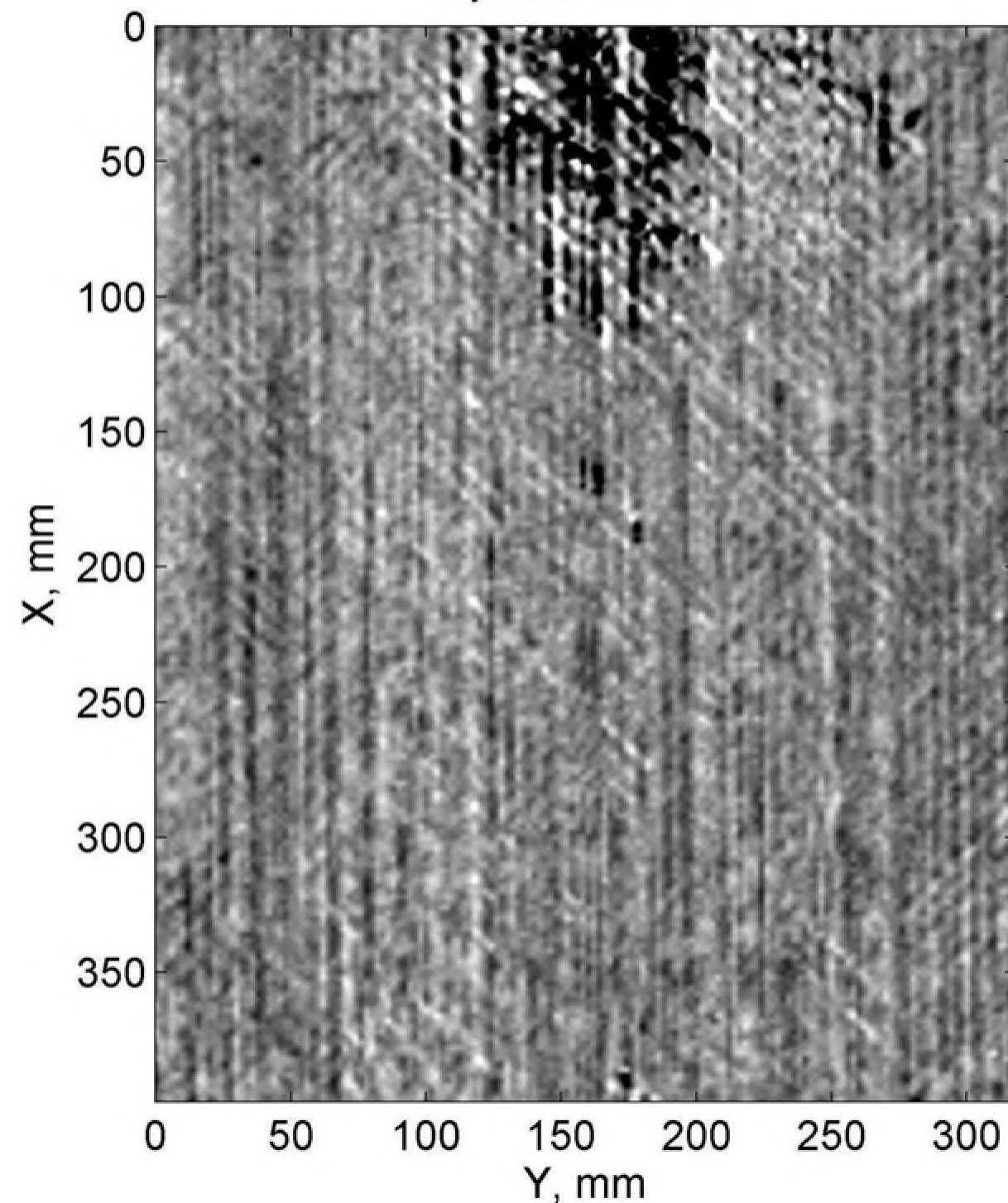
Лазерно-ультразвуковая структуроскопия ПКМ



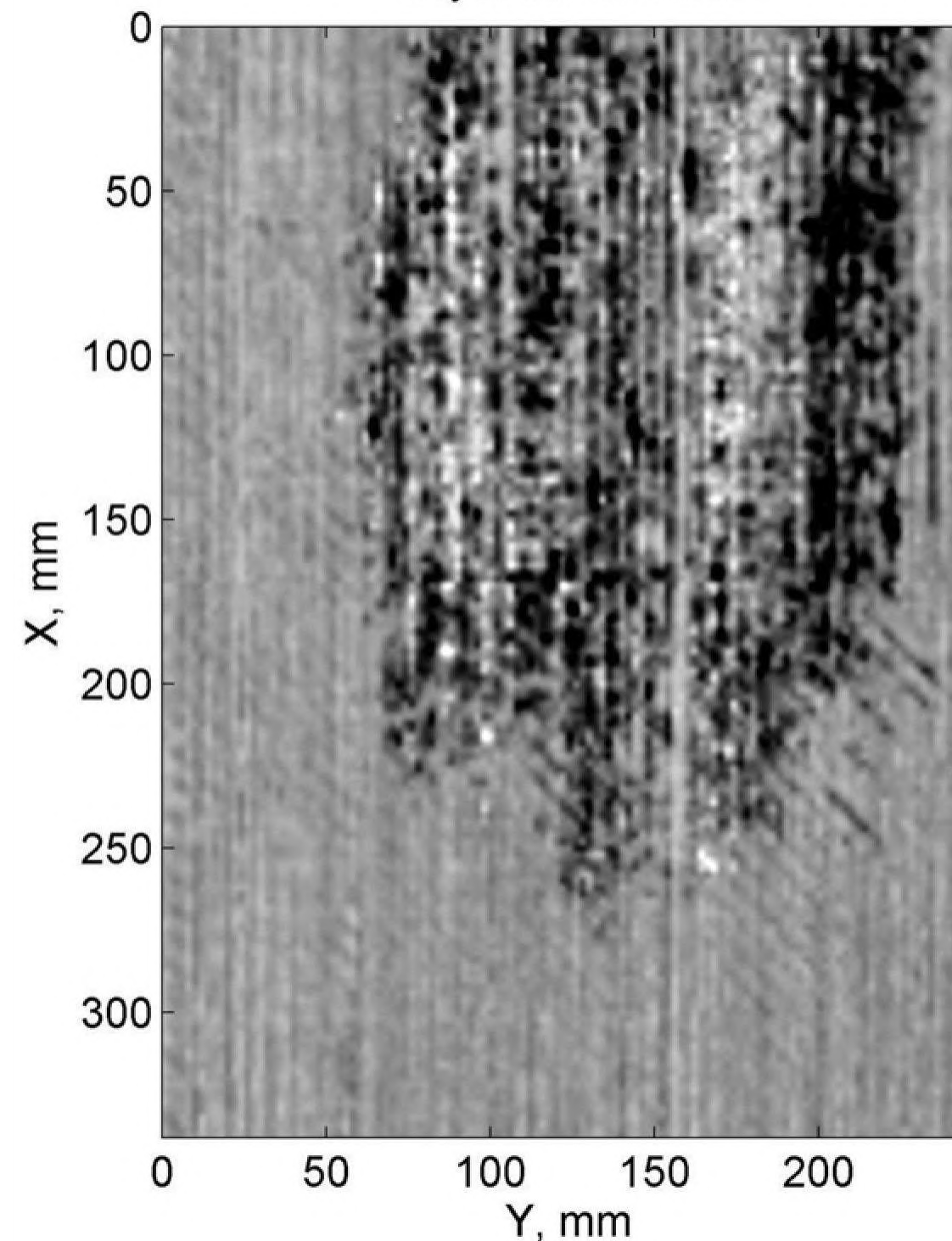
Лазерно-ультразвуковая структуроскопия позволяет получать картину внутренних неоднородностей композитных конструкций. Представлена лазерно-ультразвуковая структурограмма зоны разрушения при низкоскоростном ударе.

Структуроскопия углепластиковой панели

Глубина 3.81 мм



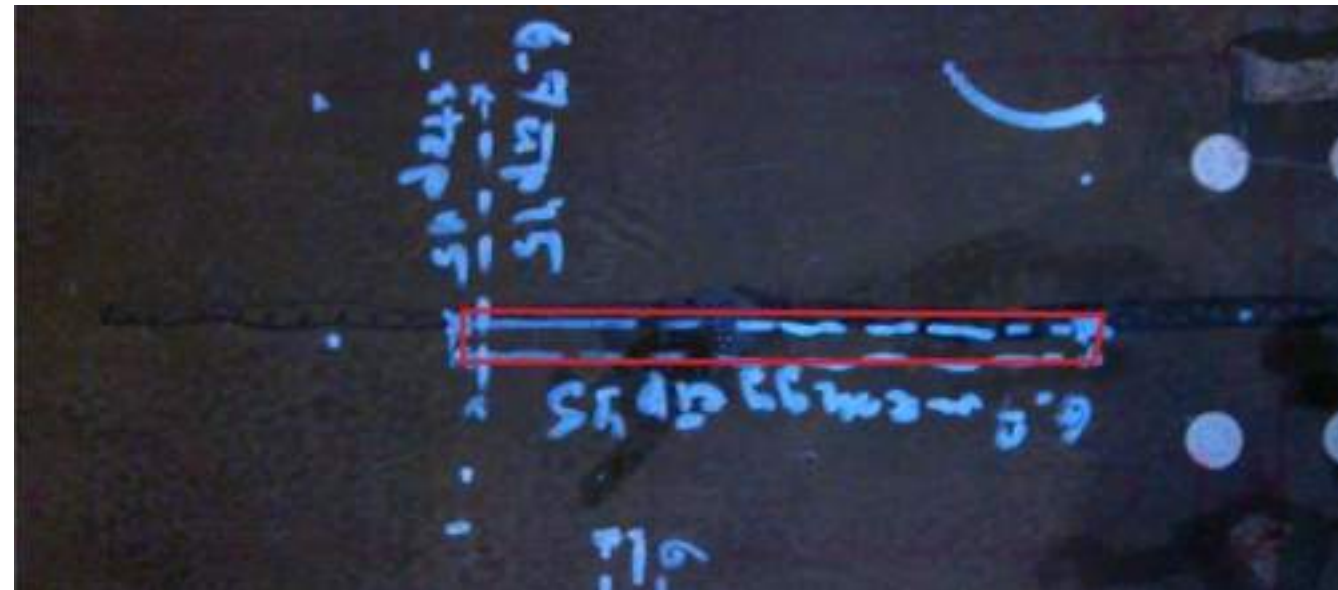
Глубина 3.50 мм



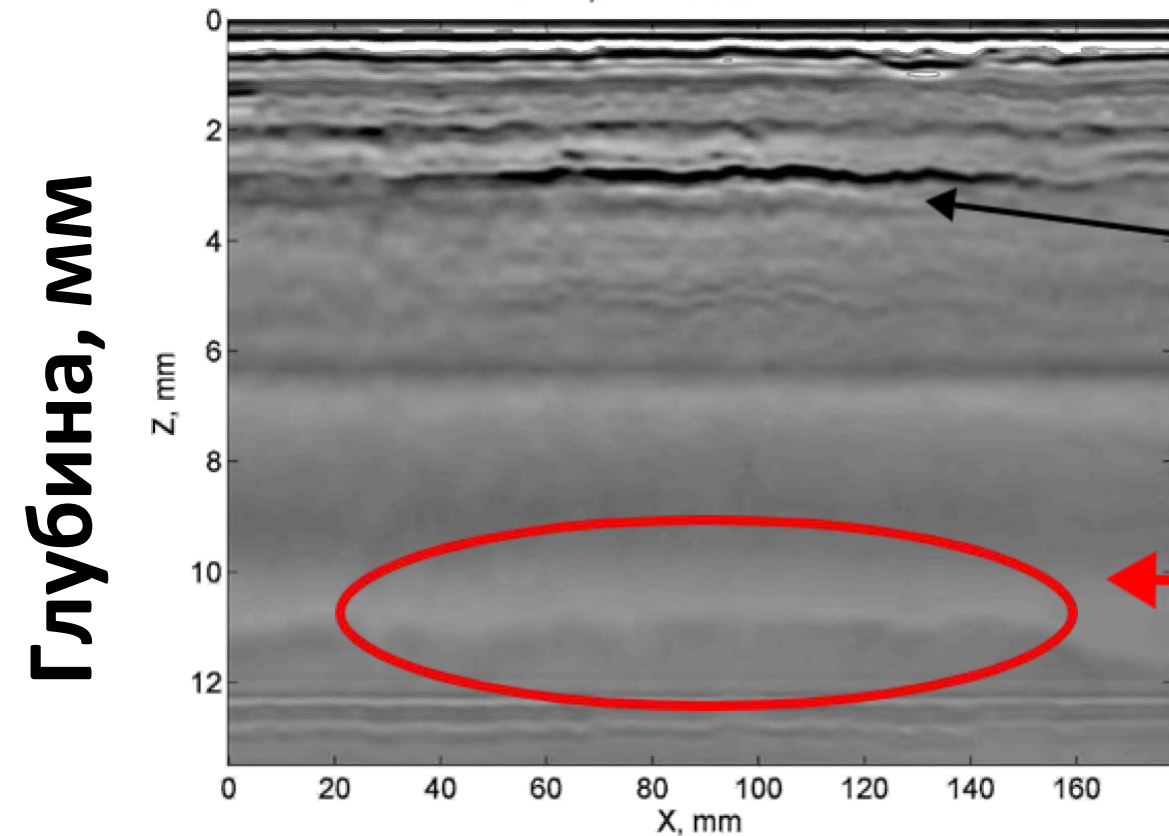
Лазерно-ультразвуковая структуроскопия ПКМ позволяет проводить послойный анализ состояния материала с практическим разрешением порядка 50 мкм. Визуализируются укладка и нарушения структуры.

На структурограммах отчетливо видны области повышенной пористости.

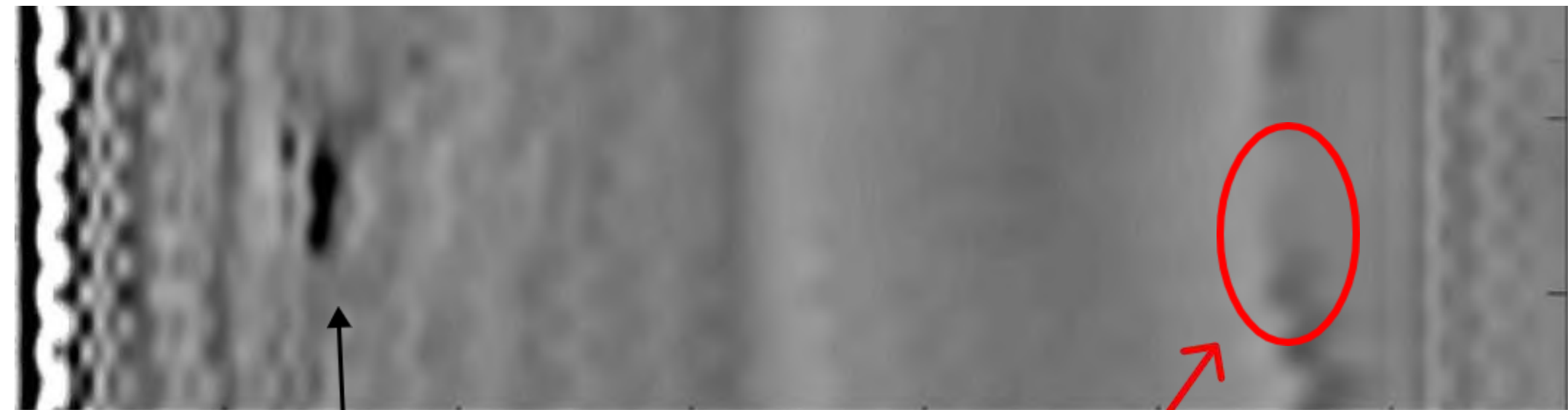
КЛУС структуры композитной конструкции



Смещение по оси Y: 8.0 мм



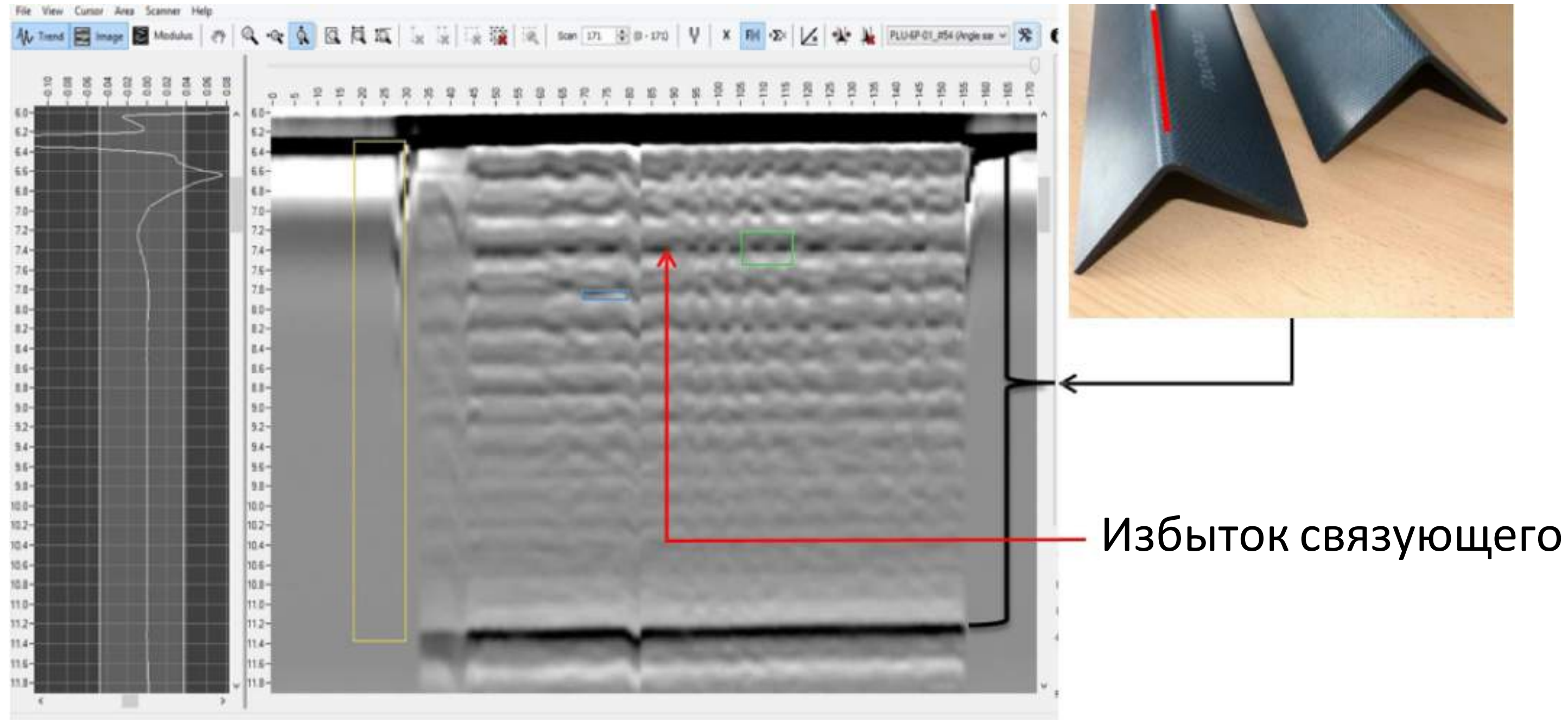
Глубина



Расслоение
на глубине 3 мм

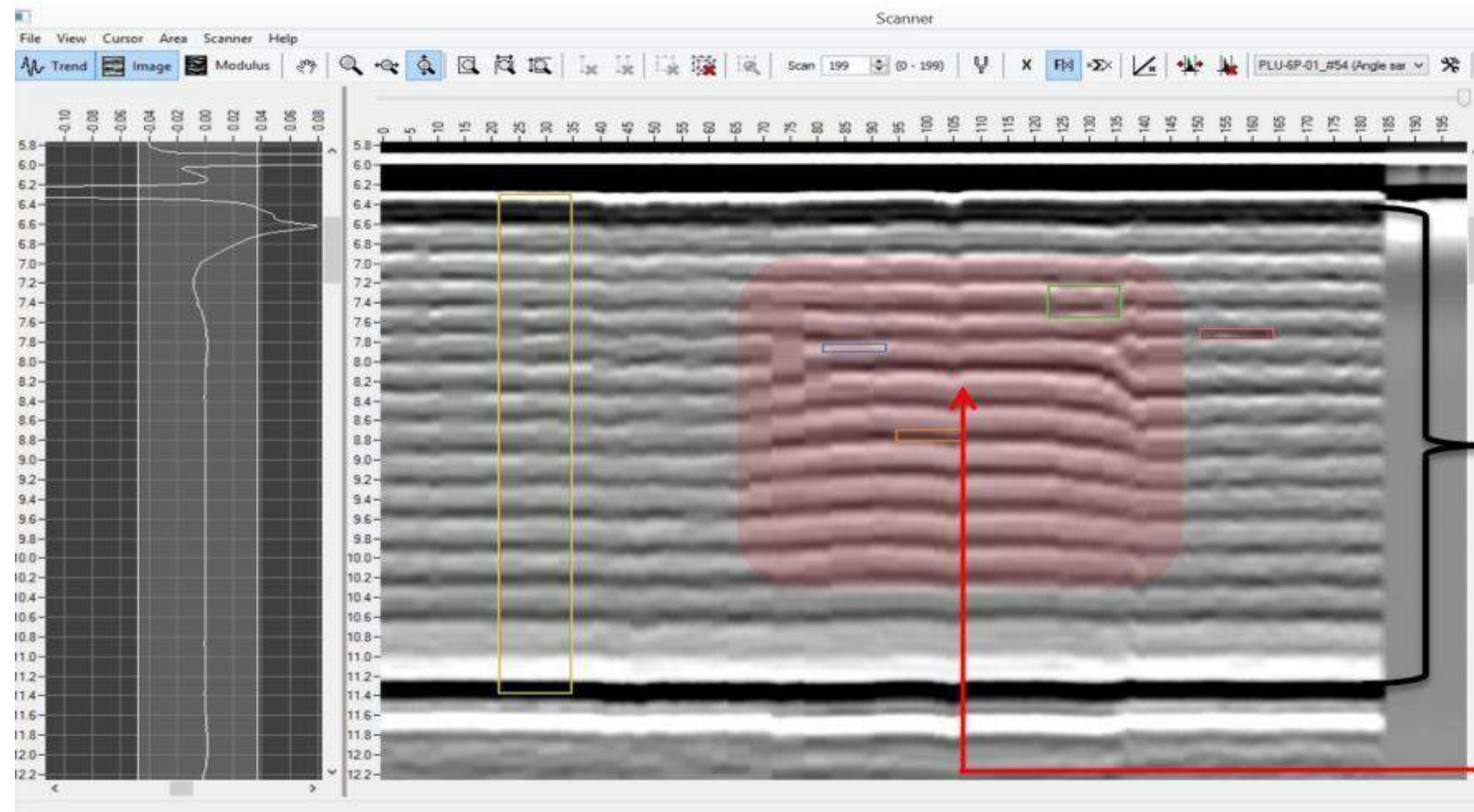
Уменьшение амплитуды донного сигнала

КЛУС деталей из ПКМ



В области вдоль вершины угла изделия просматривается избыток связующего между третьим и четвертым слоями.

КЛУС деталей из ПКМ

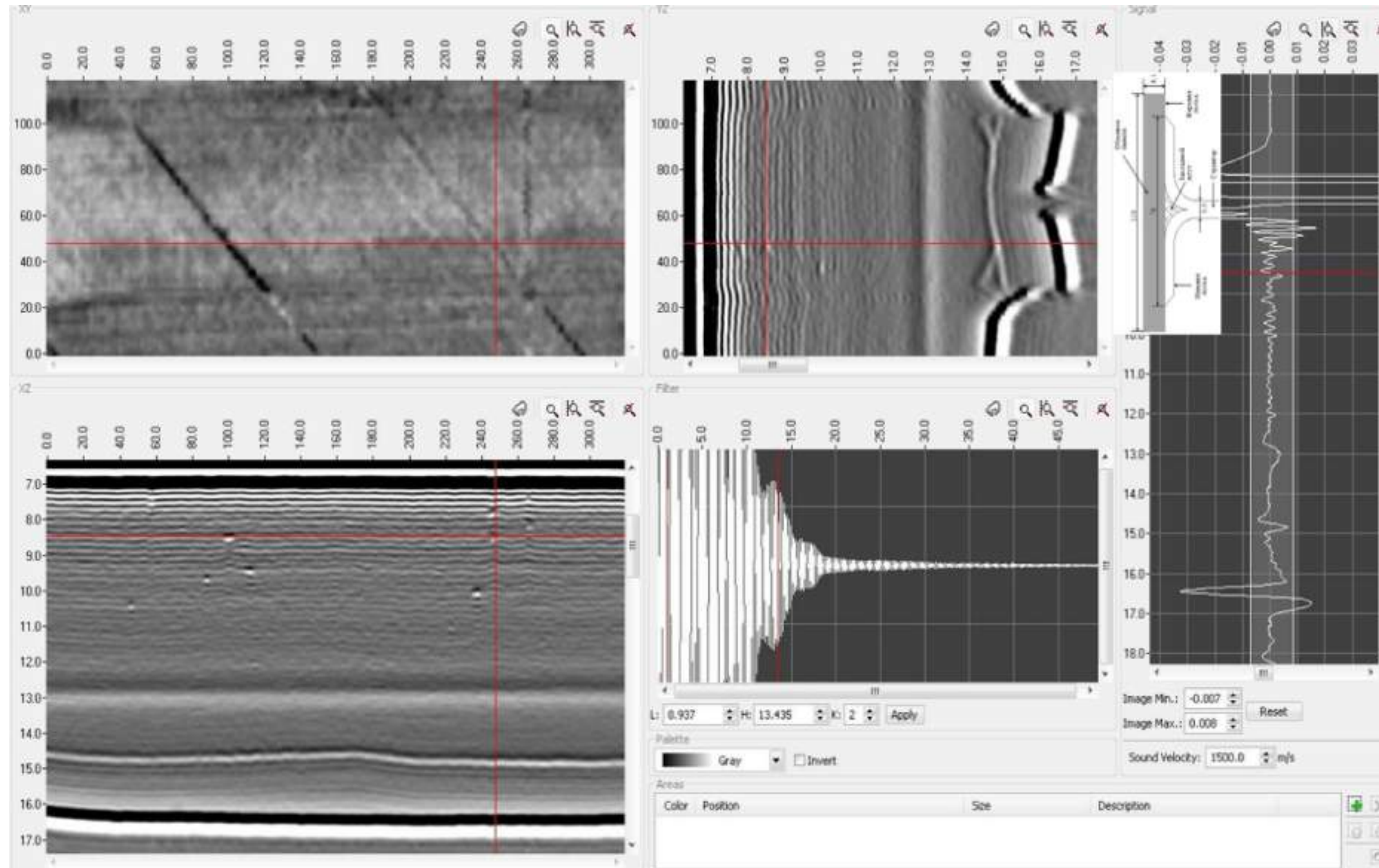


Структура ПКМ

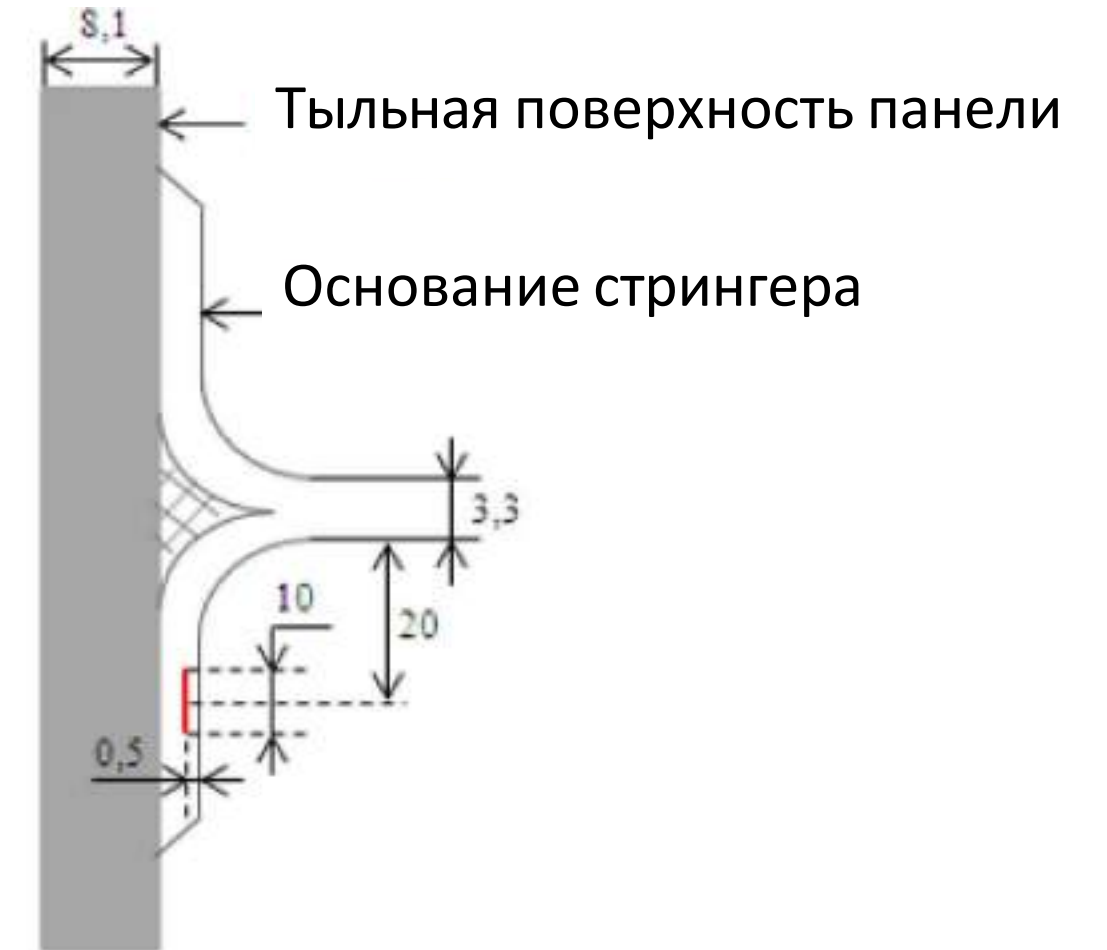
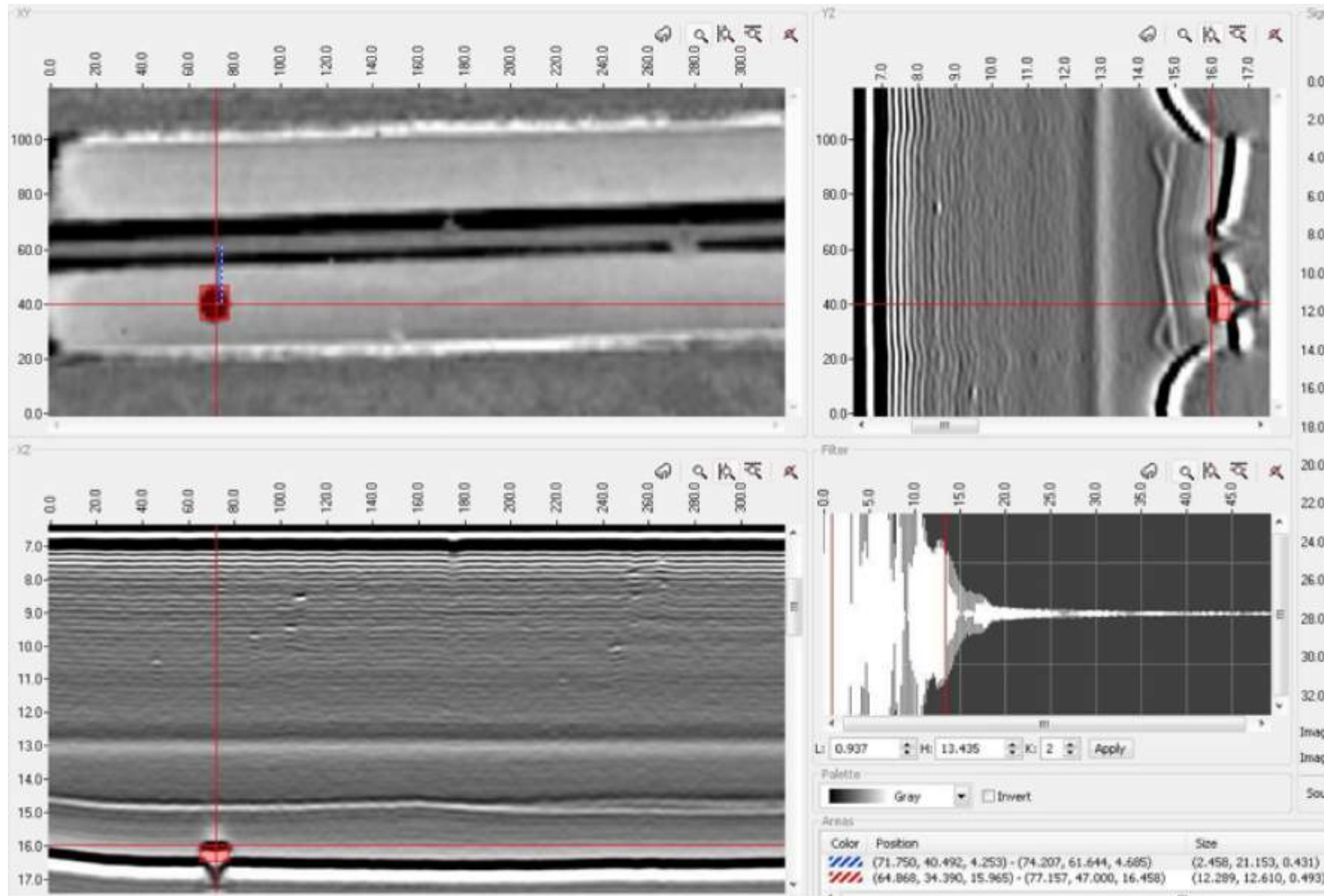
Расслоение
после 6го слоя

Утолщение с затемнением слоя ПКМ и частичная потеря или искривление отраженного сигнала по глубине после прохождения неоднородности, вследствие наличия воздушной полости, квалифицируется как расслоение

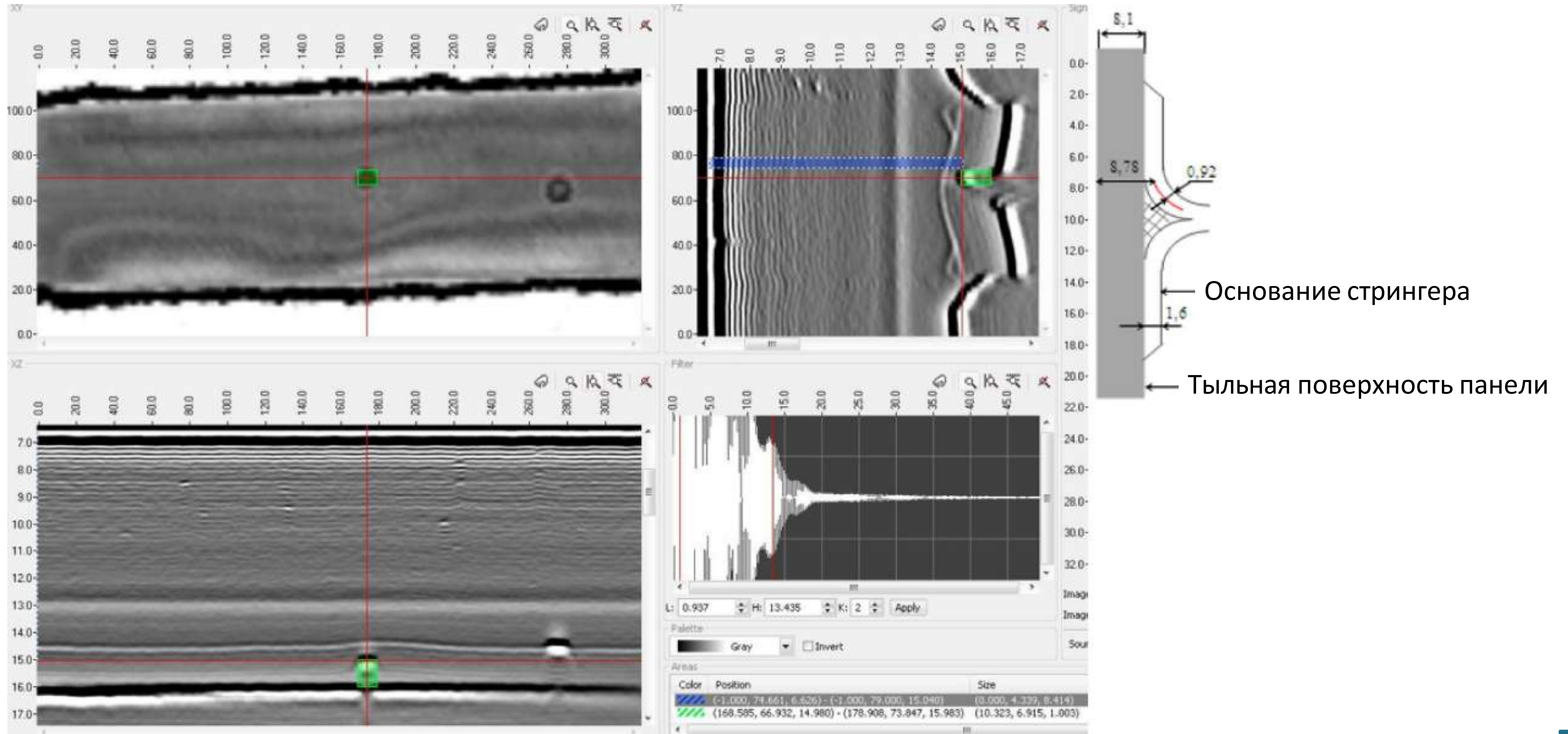
КЛУС стрингерной панели



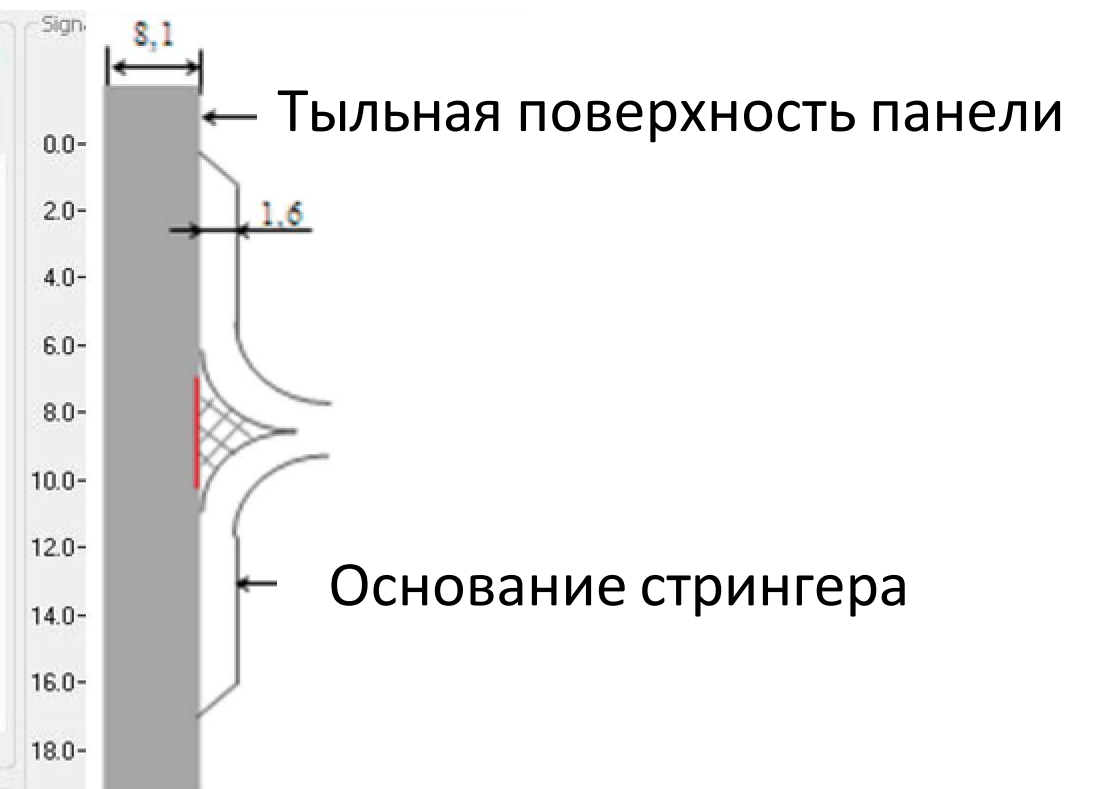
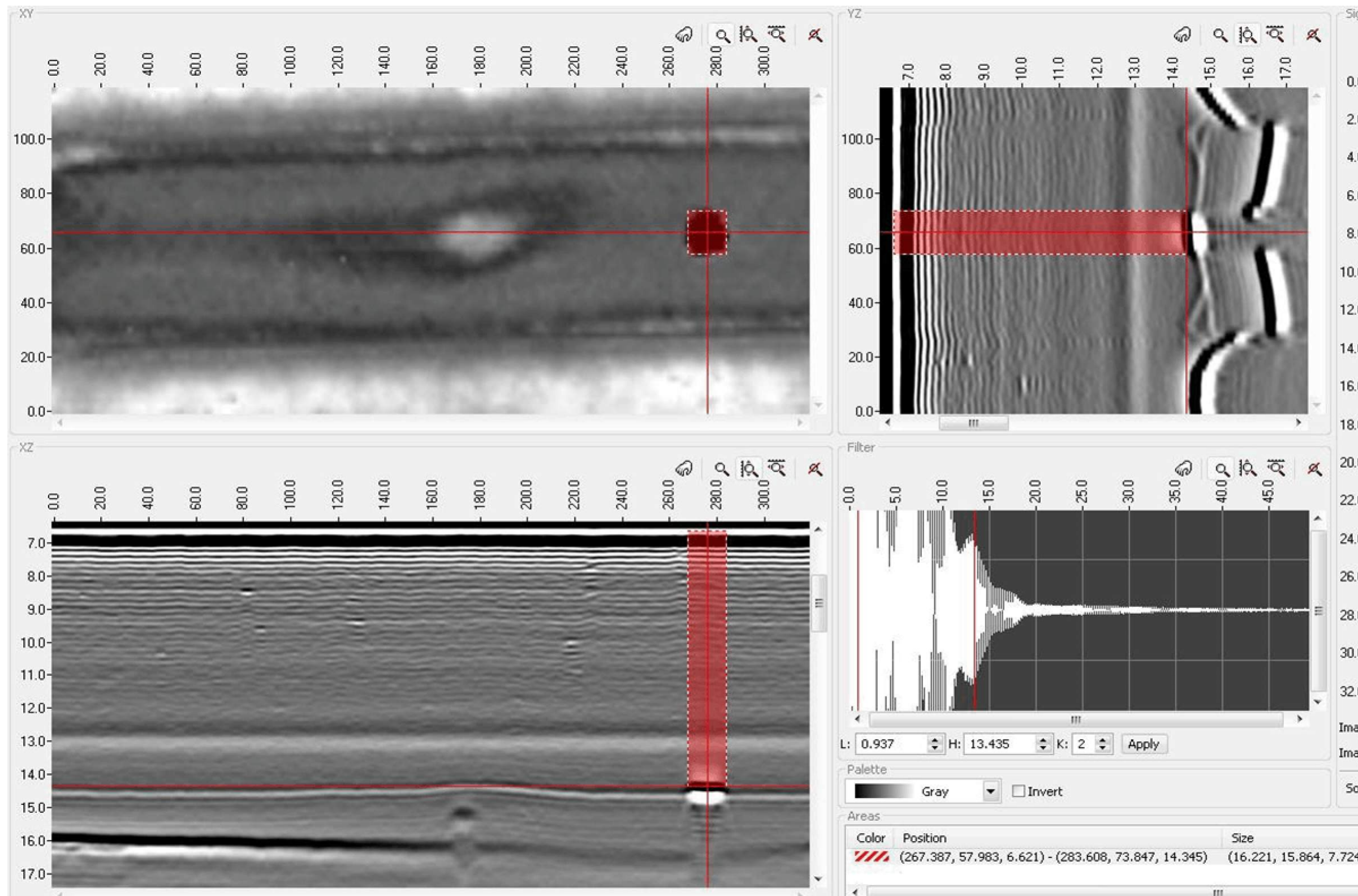
КЛУС стрингерной панели



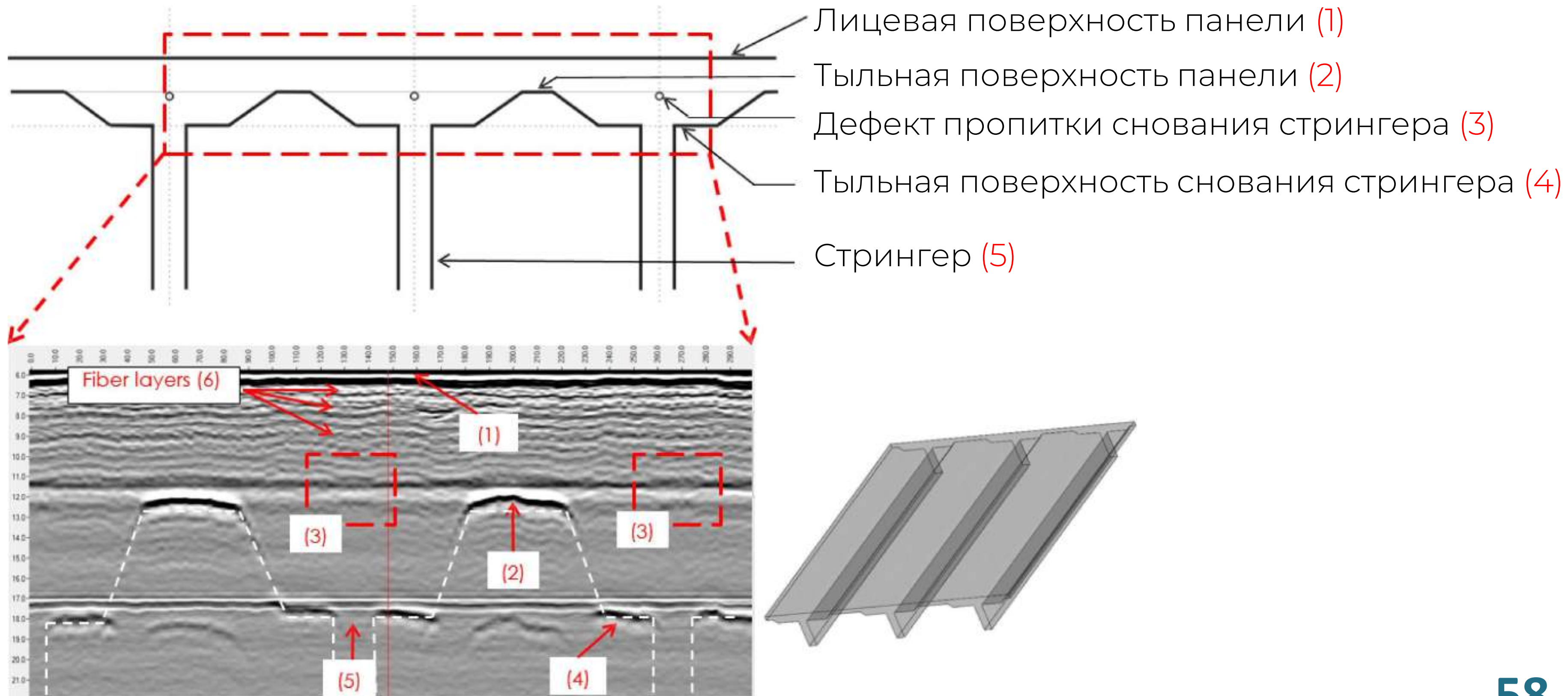
КЛУС стрингерной панели



КЛУС стрингерной панели

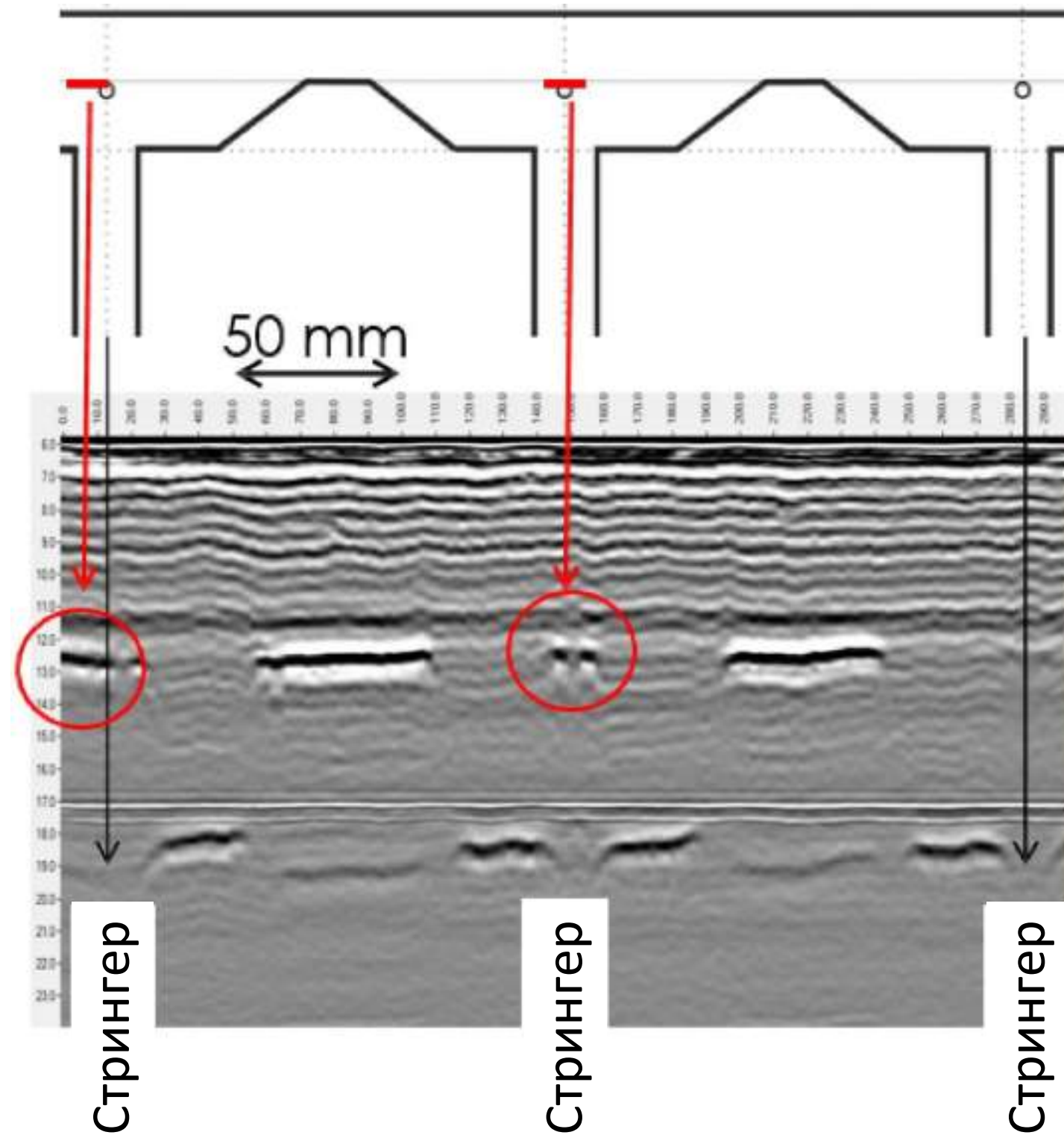


КЛУС стрингерной панели

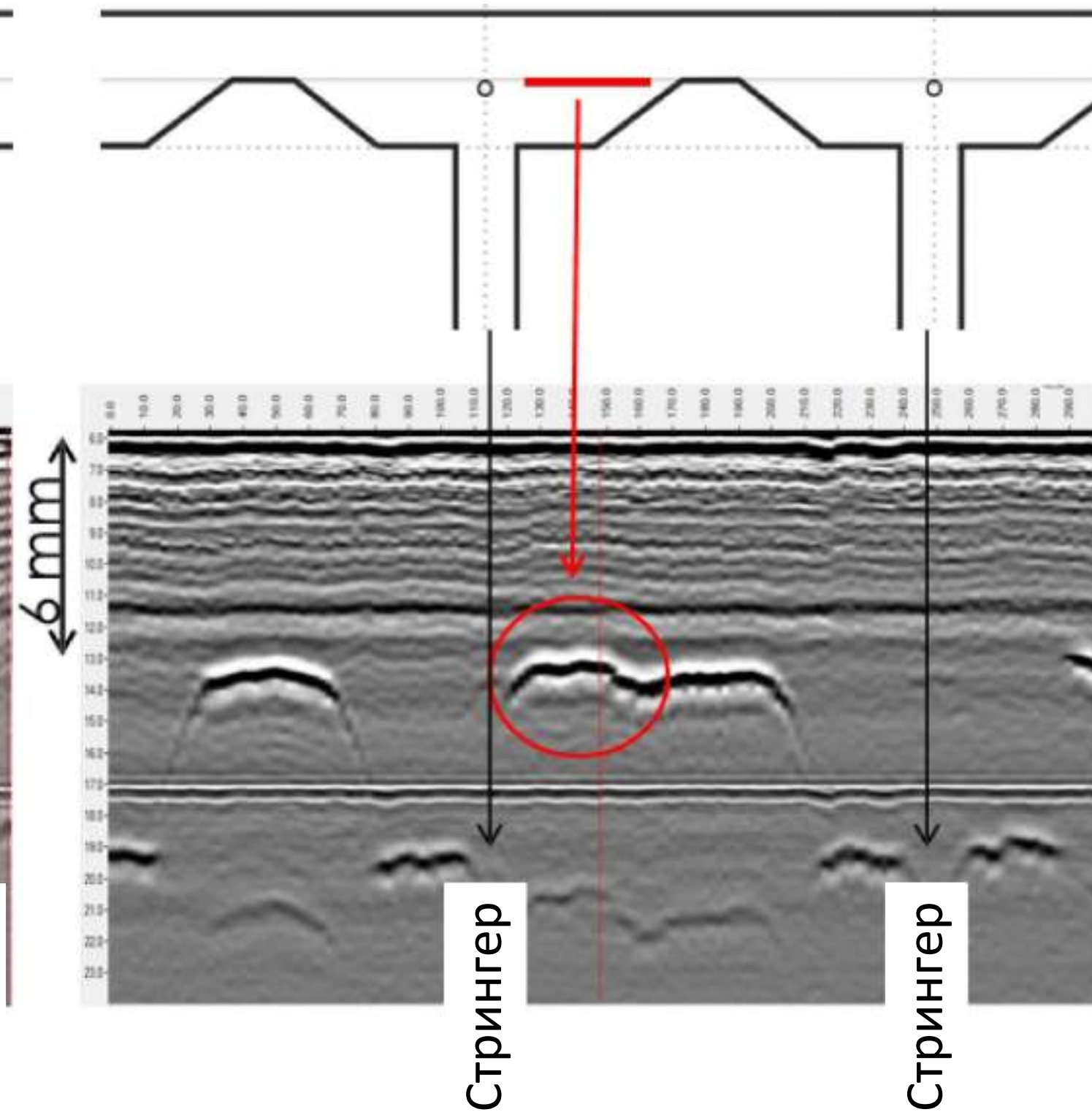


КЛУС стрингерной панели

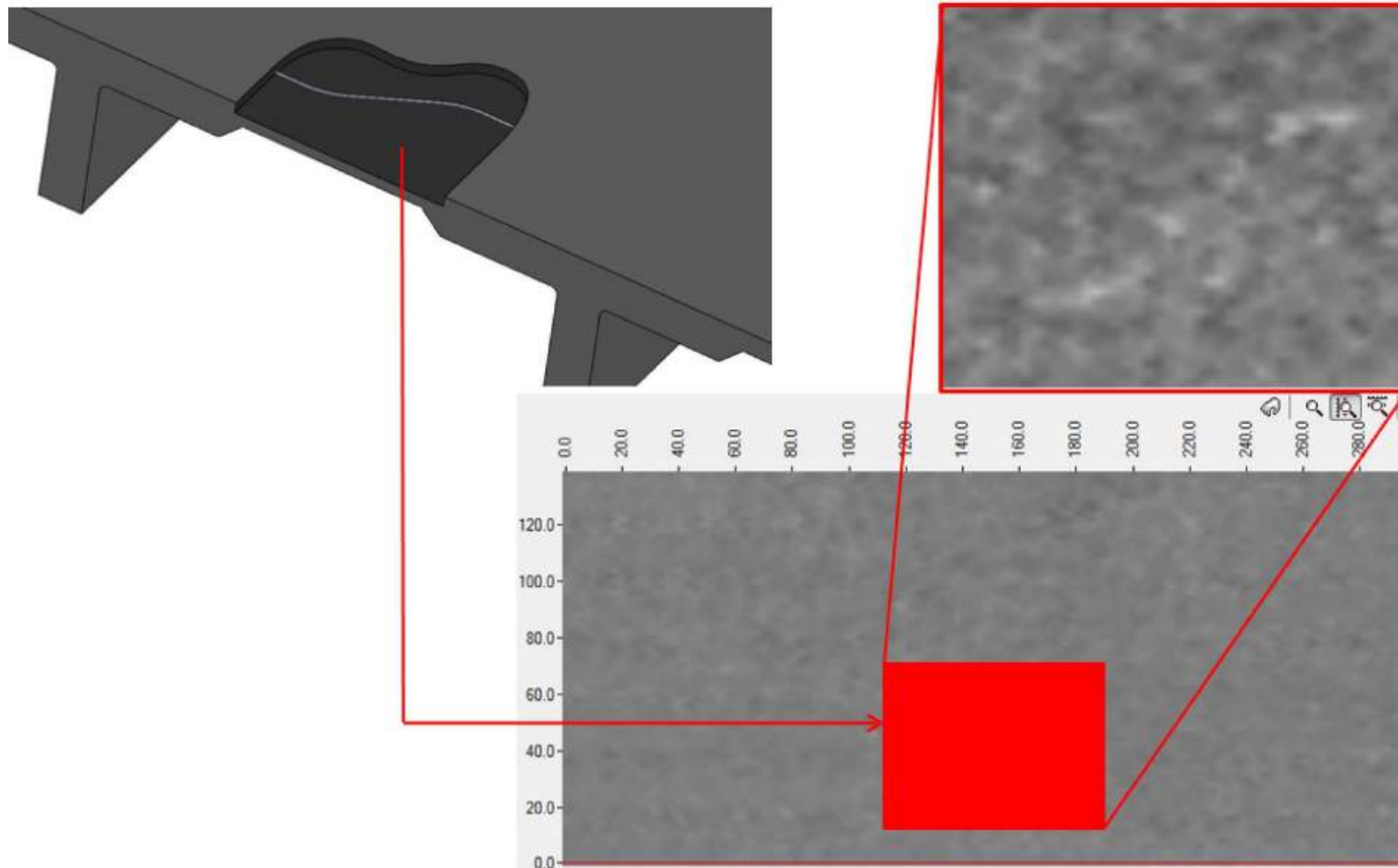
Дефект пропитки основания стрингера



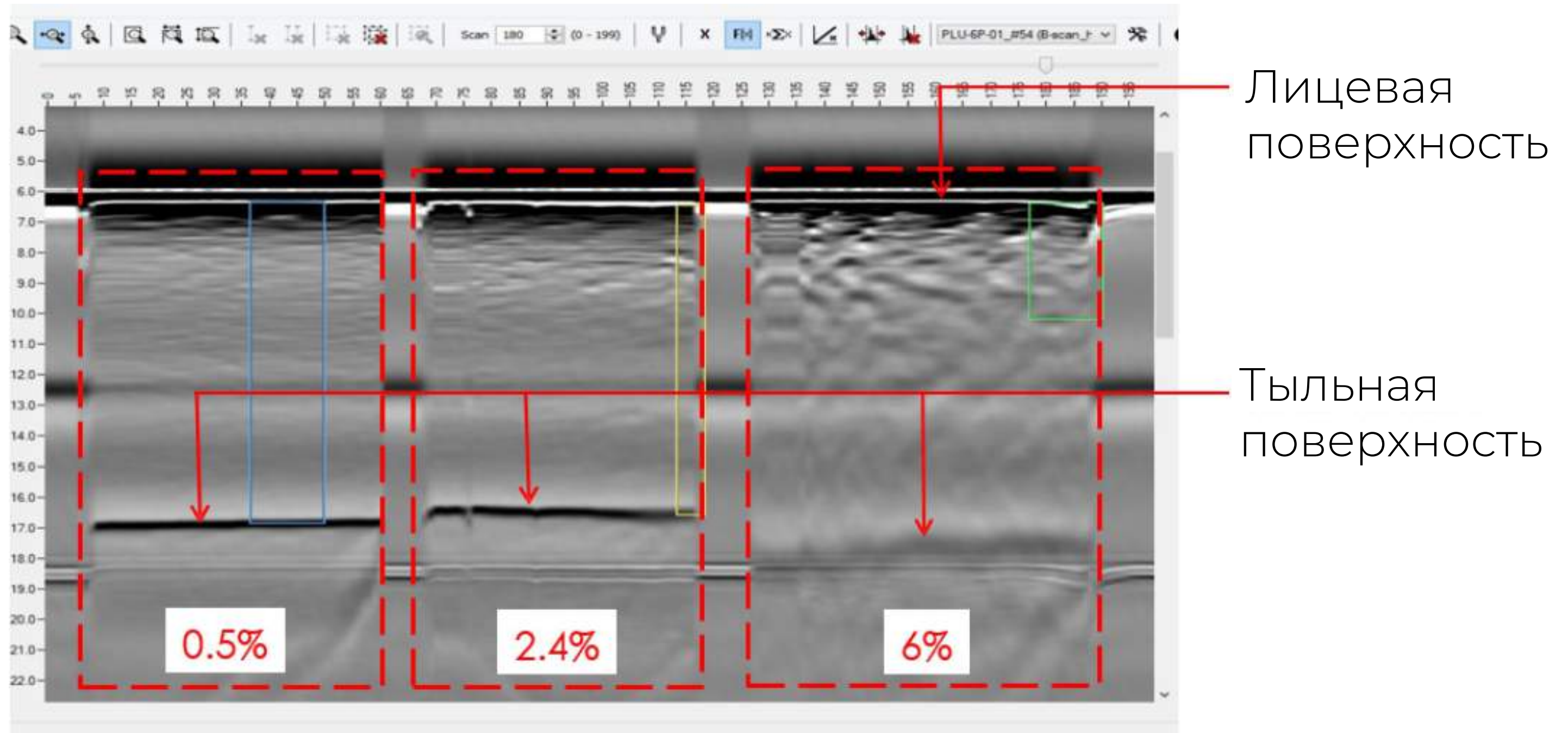
Расслоение основания стрингера



КЛУС закладного волоконно-оптического датчика



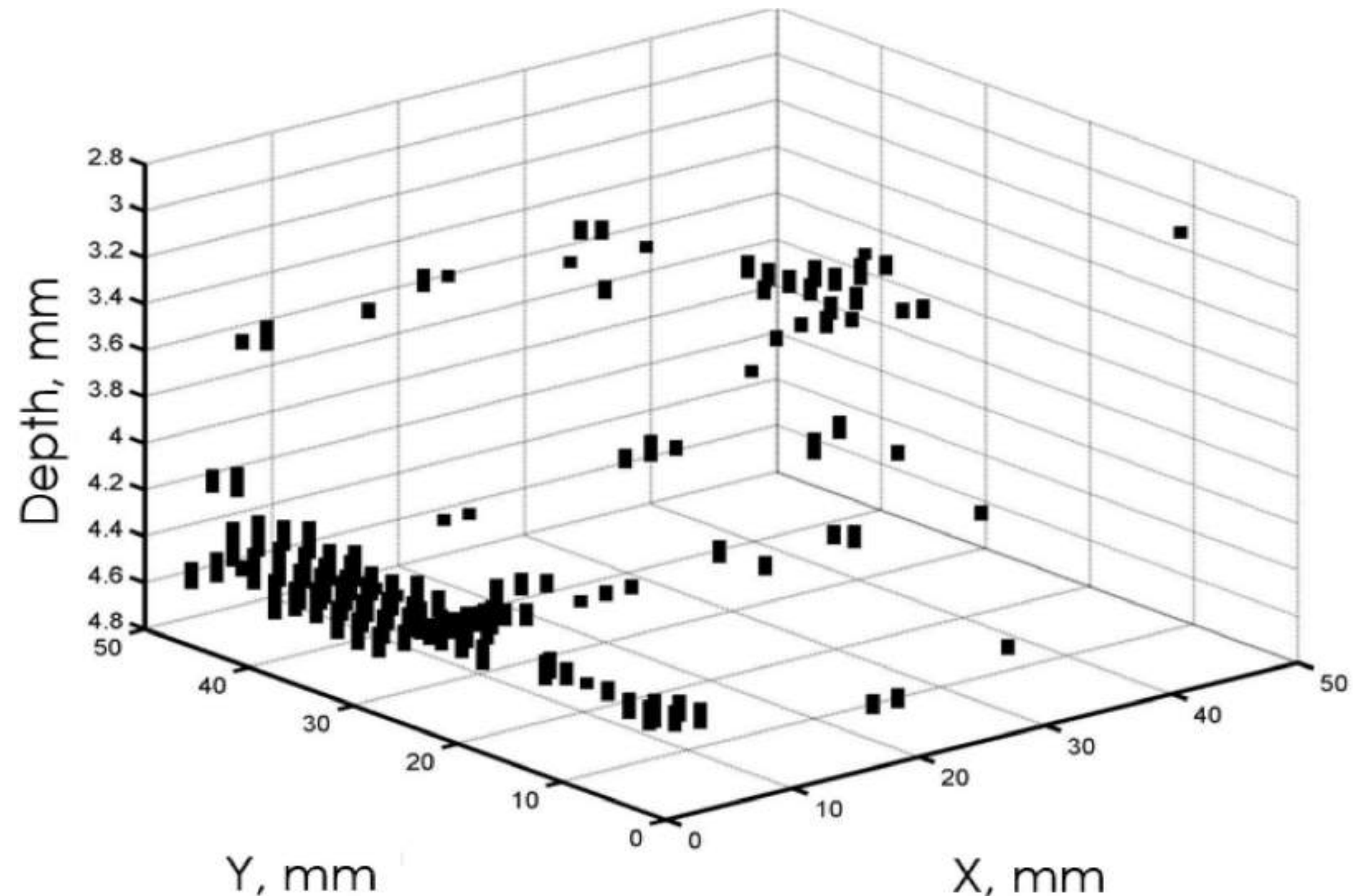
КЛУС диагностика пористости ПКМ



Б-скан образцов ПКМ с пористостью 0.5%, 2.4%, 6%

КЛУС диагностика пористости ПКМ

Пространственное
распределение пор
с эффективным
размером
> 120 мкм в изделии





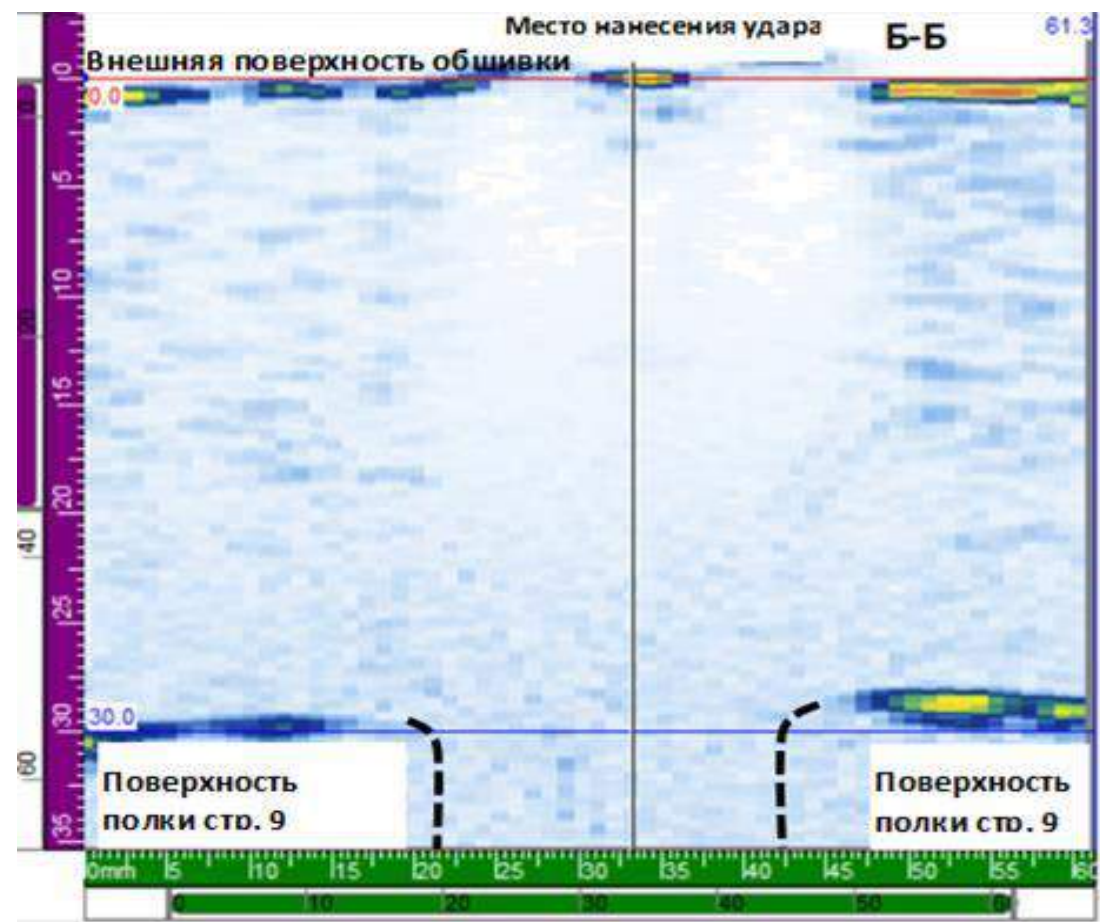
KEENETICA

Сравнение с
конкурентами

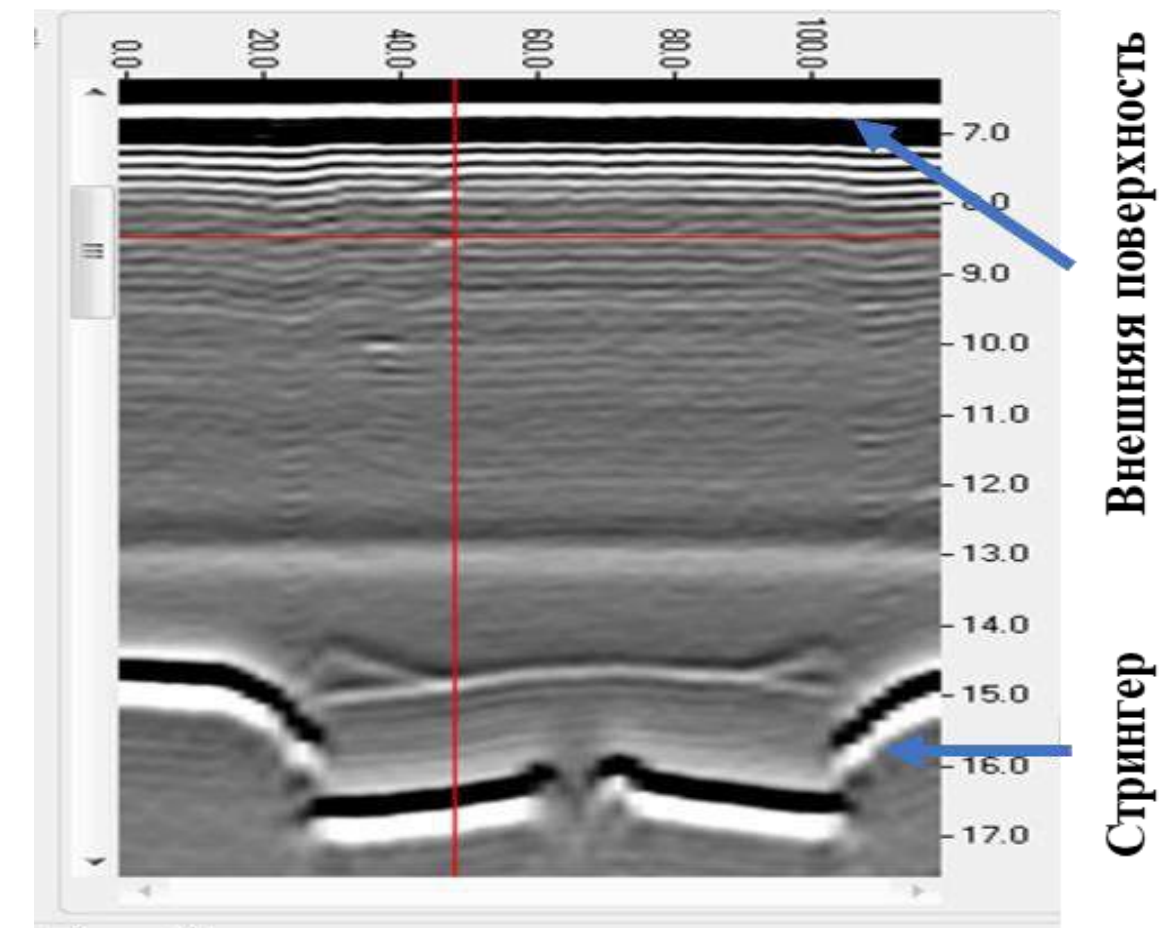
РАЗДЕЛ ВОСЬМОЙ

Сравнение дефектоскопов ЛУС-01 и OMNISCAN при оценке структуры стрингера

OMNISCAN



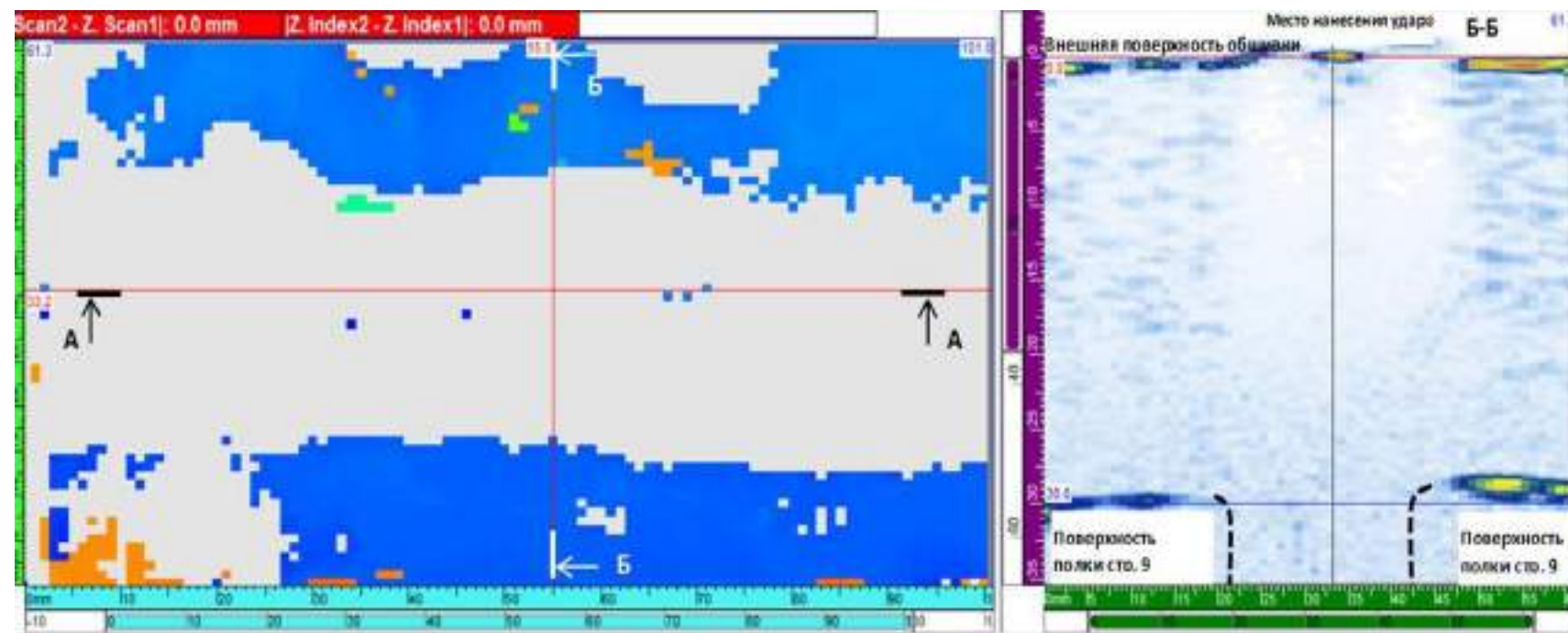
Кинетик ЛУС-01



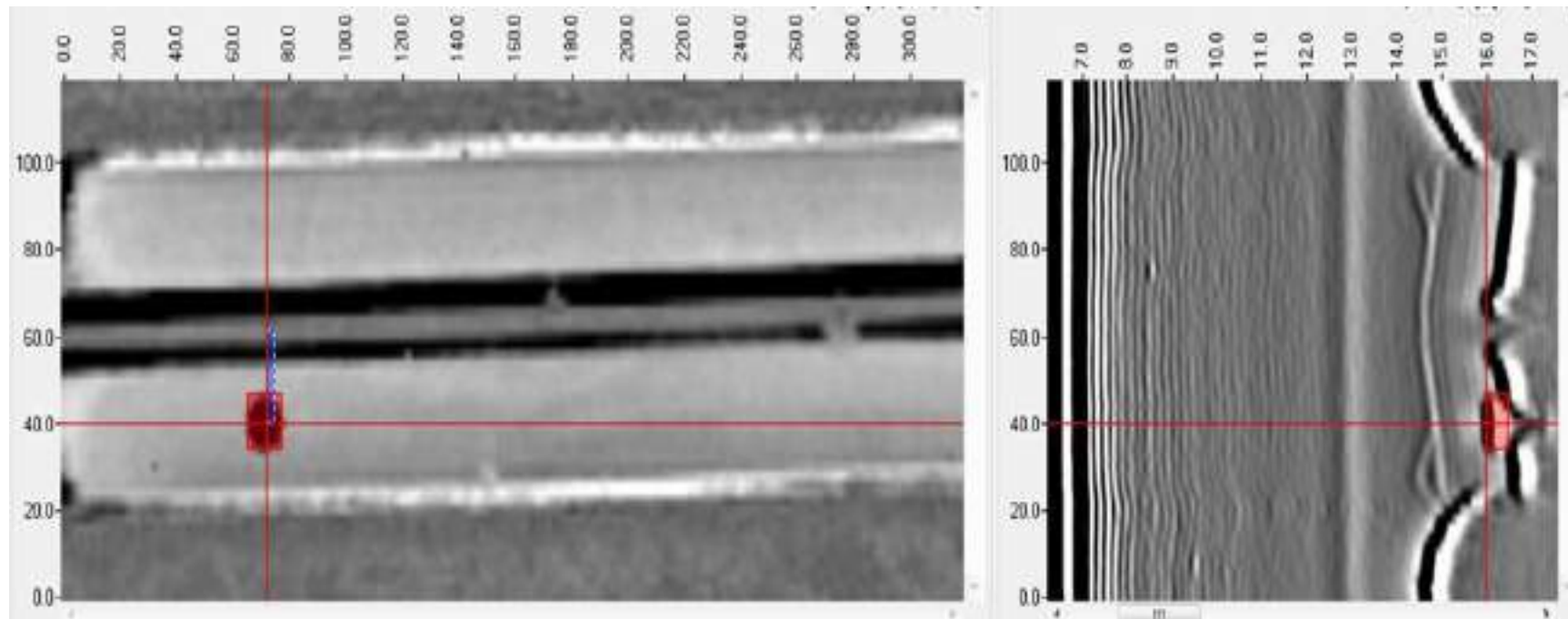
Представлены вертикальные срезы структуры типичной интегральной конструкции – Т-образного сочленения композитной пластины оболочки и вертикального стрингера, контактирующего с оболочкой отогнутыми под прямым углом полками. Формирование стрингера происходит на почти полностью отвержденной оболочке путем закладки формирующего стык жгута и формование тела стрингера и полок композитными лентами. Окончательно проводится совместная полимеризация конструкции. Как показывают исследования, практически всегда на границе полки стрингера и панели образуется избыток связующего, который отчетливо выявляется на лазерно-ультразвуковой структурограмме. Именно это сочленение может проявлять наименьшую стойкость при нерасчетных (например, скручивающих) нагрузках. На лазерно-ультразвуковой структурограмме также видна фактура армирования и связующего и ее нарушения на краях полок связующего. Все эти детали внутреннего строения композитной конструкции не выявляются стандартной фазированной антенной. Можно сказать, что область применения использованной фазированной антенны ограничивается почти плоскими конструкциями и выявлением дефектов типа трещина, крупная пористость или расслоение.

Сравнение дефектоскопов ЛУС-01 и OMNISCAN при оценке структуры стрингера

OMNISCAN



Кинетик ЛУС-01



Представлены горизонтальные срезы структуры типичной интегральной конструкции – Т-образного сочленения композитной пластины оболочки и вертикального стрингера, контактирующего с оболочкой отогнутыми под прямым углом полками. Формирование стрингера происходит на почти полностью отвержденной оболочке путем закладки формирующего стык жгута и формование тела стрингера и полок композитными лентами. Окончательно проводится совместная полимеризация конструкции.

Представленные УЗ изображения нижней границы верхней панели показывают геометрию и качество контакта стрингера и оболочки. Качественный контакт стрингера и оболочки имеет большую яркость, чем свободные зоны нижней поверхности оболочки.

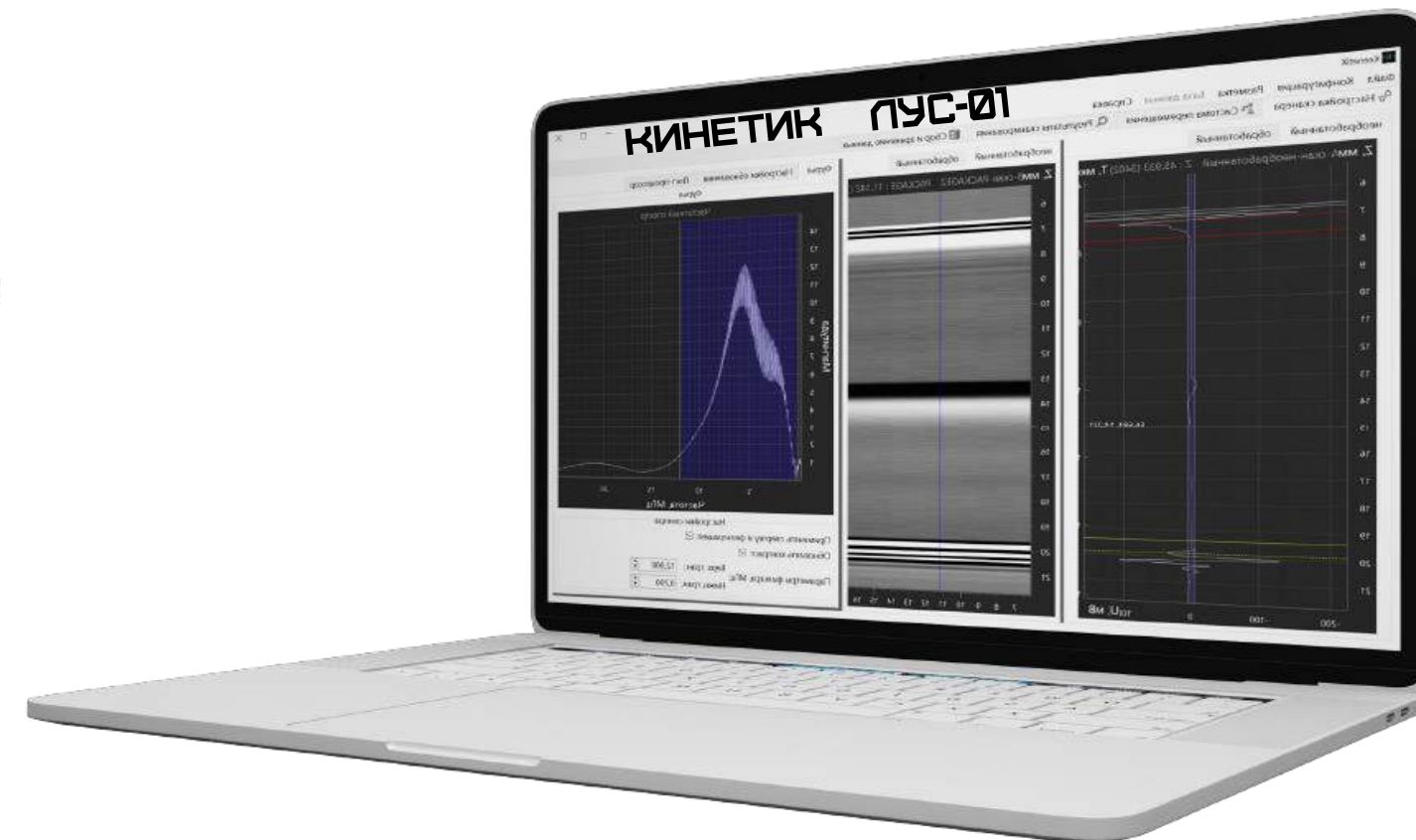
На лазерно-ультразвуковой структурограмме также видны детали внутреннего строения этого стыка – темная полоса отображает формирующий жгут конструкции, который не выявляются стандартной фазированной антенной.

Можно сказать, что область применения использованной фазированной антенны ограничивается почти плоскими конструкциями и выявлением дефектов типа трещина, крупная пористость или расслоение.

Сравнение дефектоскопов ЛУС-01 и OMNISCAN при оценке структуры стрингера

Характеристики	Olympus omniscan X3	Кинетик ЛУС-01
Размеры (Ш x В x Г)	335 x 221 x 151 мм	289x155x125 мм
Масса	5,7 кг с одной батареей	3,5 кг
Частота полос	До 100 МГц	0,1-15 МГц (что обеспечивает более высокую точность)
Предел допустимой погрешности дефектоскопа	±5% (2-100 мм) Не видит эту область (0,2-2 мм)	±1% (2-100 мм) ±3% (0,2-2 мм)
Внутренне программное обеспечение позволяет	Получать картинку и аналоговый сигнал	Получать картинку и аналоговый сигнал Рассчитывать плотность, пористость, размеры дефектов, модуль упругости материала и др.
Внешнее программное обеспечение	отсутствует	На основе ИИ позволяет в автоматическом режиме находить и проводить анализ дефектов по заранее заданным параметрам и методикам
Цена	5 млн. руб.	4 млн. руб.
Диагональ дисплея / разрешение	26,9 см (10,6") / 1280x768	7,5" / 1280x768
Степень защиты корпуса	IP65	IP65
Диапазон рабочих температур	от 0°C до 45°C	От 0 до 50C

Сравнение дефектоскопов ЛУС-01 и OMNISCAN при оценке структуры стрингера



Вывод: Предлагаемый нами прибор дешевле импортного аналога почти на 30%, а также показывает более четкую картину исследования, при этом в рамках проекта предлагается автоматизировать процесс выявления дефектов за счет применения программного обеспечения на основе ИИ, что позволит снизить квалификацию специалистов (что как уже указывалось является большой проблемы для отрасли) и повысить скорость и качество проведения исследований.

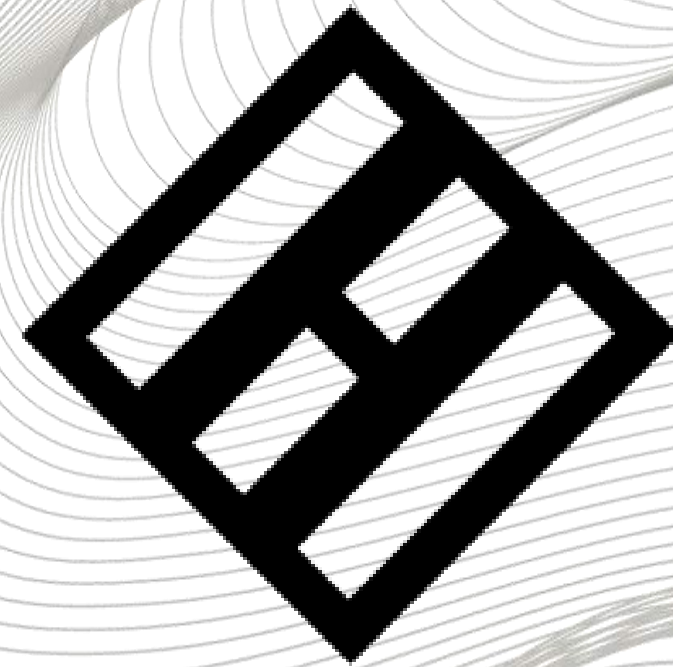
КИНЕТИКА

СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ

www.keenetica.ru

Телефон: 8 (925) 000-444-3

Почта: info@keenetica.ru



KEENETICA