



Утверждаю

Директор ООО «ДИЦ «МОСТ»

Панков С.В.



## МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ

Лазерных сканеров с применением концевой меры длины.

МК 006- 09-23

Разработчики:                   ООО «ДИЦ «МОСТ»  
  ООО «НПП ПРИЗМА»  
  ООО «Техмашсервис»

Волгоград 2023

**Подписи исполнителей:**

Директор «ООО НПП» Призма



Крючков П.А.

Директор ООО «Техмашсервис», к.т.н.



Панков В.В.

Начальник отдела поверки средств измерений  
геометрических величин

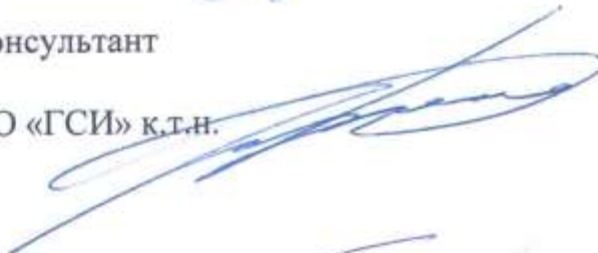
ФБУ Волгоградский ЦСМ



Волошин А.С.

Технический консультант

Гл. Сварщик АО «ГСИ» к.т.н.



Дукин В.П.

Научный консультант, к.э.н.



Богородский И.Г.

Программное обеспечение



Аникин Д.А.

## Содержание

1. Общие положения	4
2. Область применения	4
3. Нормативные ссылки	4
4. Термины и определения	5
5. Технические требования	6
5.1. Требования к неопределенностям измерений параметров, определяемых в процессе калибровки	6
5.2. Требования к средствам калибровки и вспомогательному оборудованию	6
5.3. Требования к условиям проведения калибровки	6
6. Требования к квалификации калибровщиков	7
7. Требования по обеспечению безопасности	7
8. Подготовка к процедуре калибровки	7
9. Процедура проведения измерений	10
10. Обработка результатов измерений. Неопределенность измерений.	13
11. Оформление результатов калибровки	14
Приложение 1. Алгоритм математической обработки первичных данных, поступающих от сканера в компьютер. Расчет высоты и ширины концевой меры.	15
Приложение 2. Рекомендуемая форма Сертификата о калибровке	26

## **1. Общие положения.**

Калибровка средства измерений — совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению средства измерений, не подлежащего государственному метрологическому контролю и надзору.

В рамках метрологии, метрологические характеристики — это характеристики средств измерений, определяющие возможность практического получения результатов измерений.

Для подтверждения действительных значений метрологических характеристик лазерных сканеров LSP, LSP-U, LSR, используемых для оценки квалификации сварщиков патент РФ № 2550673, РФ № 2569276 (далее по тексту сканер) пользователь собственными средствами или по договору с юридическими лицами, уполномоченными ООО «ДИЦ «МОСТ» или ООО «Техмашсервис», определяет и подтверждает сертификатом о калибровке действительные значения метрологических характеристик на данный момент времени. При этом выводов о пригодности сканера не делается. Установленные характеристики могут отличаться от паспортных и только в компетенции пользователя сканера определить в каких условиях и для каких целей можно и нужно его использовать.

## **2. Область применения**

Настоящая методика распространяется на лазерные сканеры моделей LSP, LSP-U, LSR, (патент РФ № 2550673) используемые для целей сканирования формы поверхностей сварных соединений, выполненных различными способами сварки плавлением, и устанавливает методы и средства их первичной и периодической калибровки.

Меж калибровочный интервал — не регламентирован, определяется пользователем сканера.

### **3. Нормативные ссылки**

В настоящей методике использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 9038-90. Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия

ГОСТ Р 50723-94 Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий.

ГОСТ Р 51350-99 (МЭК 61010-1-90) Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования, часть 1. Общие требования.

ГОСТ 12.2.007-75 Система стандартов безопасности труда. Изделия общетехнические. Общие требования безопасности.

Р РСК 002-06. Основные требования к методикам калибровки, применяемые в Российской системе калибровки.

ПР 50.2.006-94 ГСИ. Правила по метрологии. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения поверки средств измерений.

### **4. Термины и определения**

В настоящей методике используются следующие термины и определения:

*Калибровка* – добровольная процедура, включающая совокупность операций, выполняемых в целях определения реальных значений метрологических параметров средств измерений, не подлежащих государственному метрологическому контролю и надзору. Предприятие или физическое лицо самостоятельно решают вопрос о необходимости проведения калибровки.

*Апертура приемного объектива* - диаметр светового пучка на входе в объектив и целиком проходящего через края его оптической линзы.

*Вспомогательная мера* - мера длины концевая плоскопараллельная, фиксируемая неподвижно на поверхности стола является основанием для установки концевой меры длины, используемой при калибровке.

*Актюатор* – исполнительное устройство, обеспечивающее заданное программой Calibrate.exe перемещение сканера вдоль измеряемой концевой меры длины.

*Расстояние до объекта измерений* - расстояние от апертуры датчика до поверхности измеряемой концевой меры длины, при котором выполняются измерения.

## **5. Технические требования.**

5.1. Требования к неопределенности измерений параметров, определяемых в процессе калибровки.

Неопределенность измерения геометрических параметров, определяемых в процессе калибровки характеризуется среднеквадратическим отклонением математического ожидания измеряемой величины и должна быть в пределах значений для:

Высоты ( $h$ ) = 0,05мм;

Ширины ( $w$ ) = 5% от измеряемой ширины мм;

Определение неопределенности, характеризуемое среднеквадратическим отклонением измеряемой величины, при выполнении калибровки сканера, приведено в разделе 9.

5.2. Требования к средствам калибровки и к вспомогательному оборудованию.

Концевая меры длины по ГОСТ 9038-90 или аналог.

Вспомогательная металлическая пластина размером не менее 70мм 40мм 5мм (длина, ширина, толщина), на которую устанавливается концевая мера длины.

Сканер - разработчики и изготовители ООО «ДИЦ МОСТ», НПП «Призма»

5.3. Требования к условиям проведения калибровки.

При проведении калибровки должны соблюдаться следующие условия:

- температура окружающей среды  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
- вибрация должна отсутствовать;
- относительная влажность воздуха не более 80%.

## **6. Требования к квалификации калибровщиков**

К проведению калибровки допускаются 3DLD эксперты и 3DLD операторы, прошедшие инструктаж по технике безопасности, ознакомившиеся с настоящей методикой калибровки, «Инструкцией сканирования поверхности сварного шва сканером LSP, LSP-U, LSR» и владеющие навыками работы со сканером.

## **7. Требования по обеспечению охраны труда.**

При проведении калибровки необходимо соблюдать требования техники безопасности, указанные в ГОСТ Р 50723, ГОСТ Р 51350, руководстве по эксплуатации ЛД.5.001 РЭ (далее РЭ) и общие требования безопасности по ГОСТ 12.2.007.

**Внимание!** *При выполнении работ по калибровке сканера необходимо избегать попадания прямого лазерного излучения в глаза.*

## **8. Подготовка к процедуре калибровки.**

Перед калибровкой средства калибровки и сканер, подлежащий калибровке, должны быть выдержаны при условиях, указанных в п. 5.3. не менее 2 часов.

Средства калибровки и сканер, подлежащий калибровке, должны быть подготовлены к работе в соответствии с эксплуатационной документацией на них.

**ЗАПРЕЩАЕТСЯ КАЛИБРОВАТЬ СКАНЕР В МЕСТАХ ПОПАДАНИЯ ПРЯМЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЛУЧЕЙ ИЛИ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ В АПЕРТУРУ ПРИЁМНОГО ОБЪЕКТИВА.**

Провести внешний осмотр, при котором должно быть установлено соответствие сканера следующим требованиям:

- комплектность сканера должна соответствовать Техническому описанию;
- актюатор, лазерный датчик LS2D, коммутатор и изоляция интерфейсного кабеля не должны иметь механических повреждений и дефектов;
- каждый сканер должен иметь на корпусе логотип предприятия изготовителя;

Установить сканер на ровную, гладкую поверхность рис.1.



Рис.1. Внешний вид сканера LSP-U.

Подготовить сканер к работе в соответствии с инструкцией пользователя и загрузить программный интерфейс. На плоскости стола будет отчетливо видна яркая красная линия от лазерного датчика.

На стол под линию лазерного датчика положить вспомогательную пластину.

В центр вспомогательной пластины положить калибровочную меру, таким образом, чтобы линия лазерного луча находилась на поверхности калибровочной меры и полностью ее охватывала. При такой ориентации калибровочной меры относительно лазерного луча будет оцениваться абсолютная погрешность и неопределенность сканера по высоте измерения. Важно, чтобы концевая мера плотно прилегала к плоскости вспомогательной металлической пластины и находилась в ее границах, как показано на рис 2.





Рис.2. Расположение вспомогательной пластины и концевой меры


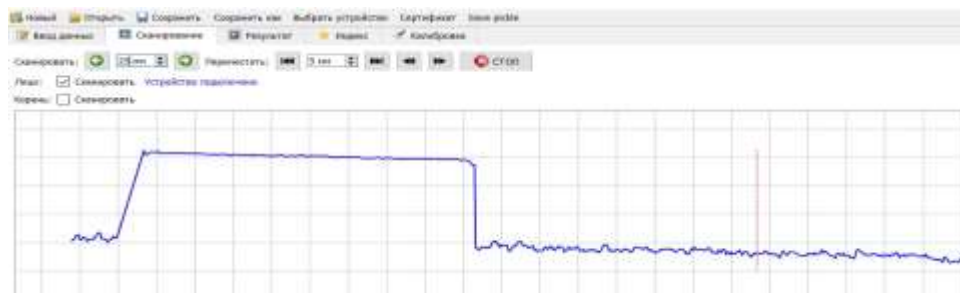
В окне программного интерфейса нажать значок  Сканирование и задать длину сканирования в интервале 20-25мм. Контролировать и ориентировать ручную КМД относительно лазерной линии используя изображение сечения КМД на экране ПК. Добиться расположения КМД относительно лазерной линии в начальном сечении, как показано на рис. 3.



Рис 3. Копия экрана с окном «Сканирование»

Используя отображение сечения КМД на экране ПК, правильно ориентировать концевую меру относительно лазерного луча таким образом, чтобы она находилась в середине экрана, а луч сканера охватывал КМД симметрично с двух сторон, как показано на рис. 3. На рис 4 (а,б) приведены отображения КМД неправильно ориентированной относительно лазерного луча.



а)



б)

Рис.4. Копия экрана с отображением концевой меры неправильно ориентированной относительно лазерного луча.

а) не допустимо смещена влево, б) не допустимо смещена вправо.

Система готова к измерениям.

### 9. Процедура проведения измерений.

Направления сканирования КМД вправо или влево определяются калибровщиком при его взгляде на фронтальную плоскость сканера (рис. 1). Сканирование инициируется калибровщиком нажатием виртуальной клавиши стрелки вправо или влево, отображаемых на экране программным интерфейсом.

Сканер осуществит перемещение относительно КМД на 25 мм, выполнит сканирование и остановиться. После этой процедуры на экране ПК отобразится 3D реплика (изображение) КМД рис. 5.

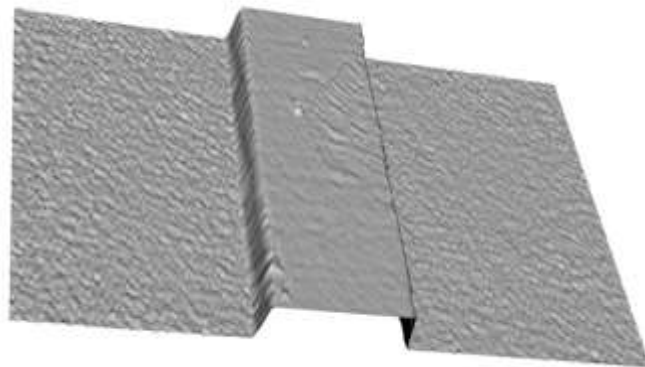


Рис.5. 3D реплика КМД

Для определения параметров калибровки следует нажать значок



экране компьютера отобразиться окно интерфейса рис.6.

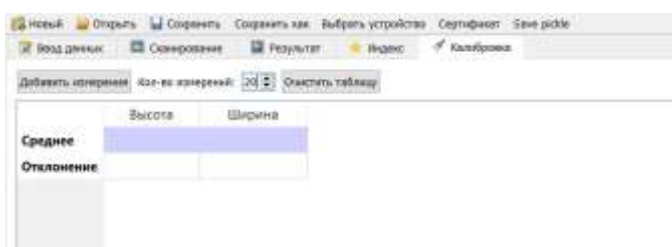
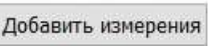


Рис. 6. Окно интерфейса «Калибровка»

По умолчанию параметр Количество измерений = 20. Рекомендуемое количество измерений от 10 до 50. Нажатием значка  автоматически будут выполнены расчеты параметров калибровки и записаны в таблицу результаты 20 измерений высоты и ширины КМД, их среднее значение, и средне квадратическое отклонение (рис. 7).

	Высота	Ширина
1	4.50451	8.52346
2	4.50512	8.36838
3	4.49384	8.46974
4	4.50189	8.48474
5	4.49349	8.50975
6	4.49833	8.50297
7	4.49772	8.55793
8	4.49575	8.51815
9	4.49194	8.48554
10	4.48940	8.55720
11	4.48522	8.51364
12	4.48385	8.49567
13	4.48330	8.47840
14	4.48144	8.39314
15	4.48537	8.59939
16	4.48100	8.43428
17	4.48235	8.50761
18	4.48170	8.39651
19	4.47838	8.58953
20	4.48244	8.55841
21	4.48312	8.58525
<b>Среднее</b>	<b>4.48953</b>	<b>8.50141</b>
<b>Отклонение</b>	<b>0.00822</b>	<b>0.06249</b>

Рис. 7. Результаты измерений и калибровки по высоте КМД

При необходимости выполнить расчет параметров калибровки с другим значением Количества измерений, необходимо очистить таблицу нажатием значка **Очистить таблицу** задать значение количества измерений от 10 до 50 и нажать значок **Добавить измерения**.

В связи с применением в методике КМД по ГОСТ 9038-90 или аналогов, имеющих только один калиброванный размер  $h^0$ , для оценки абсолютной погрешности и неопределенности измерения сканера по ширине КМД, необходимо повернуть концевую меру вокруг оси по длине на  $90^0$ , очистить таблицу, и выполнить сканирование КМД. При такой ориентации относительно луча сканера КМД будет определять калибр для оценки абсолютной погрешности и неопределенности сканера при измерении по ширине КМД. На экране компьютера будут отражены результаты заданного количества измерений КМД, их средние значения, и среднее квадратическое отклонение КМД (рис. 8).

	Высота	Ширина
1	8.77106	4.20429
2	8.78651	3.96600
3	8.79616	4.29463
4	8.74559	4.30328
5	8.74507	4.31453
6	8.77022	4.30510
7	8.77582	4.28084
8	8.77097	4.18801
9	8.77874	3.85217
10	8.76645	4.41644
11	8.78128	4.22624
12	8.74806	4.26894
13	8.78351	4.36649
14	8.77014	4.17240
15	8.74947	4.37770
16	8.74105	4.28427
17	8.74225	4.19908
18	8.76185	4.31809
19	8.75139	4.38946
20	8.72560	4.34493
21	8.73981	4.27553
<b>Среднее</b>	<b>8.76195</b>	<b>4.25469</b>
<b>Отклонение</b>	<b>0.01835</b>	<b>0.13082</b>

Рис. 8 Результаты измерений и калибровки по ширине КМД.

Процедура калибровки включает сканирование концевой меры вправо, программный расчет средних значений и среднеквадратических отклонений измеряемых величин поворот концевой меры относительно продольной оси на  $90^0$  очистку таблицы, сканирование концевой меры влево, программный расчет средних значений и среднеквадратических отклонений измеряемых величин. Выбор размера концевой меры по ГОСТ 9038-90 определяет калибровщик, учитывая технические возможности сканера, указанные в техническом описании, в интервале значений высоты КМД от 2,0мм до 20мм.

## **10. Обработка результатов измерений. Неопределенность измерений.**

Абсолютная погрешность измерения сканера концевой меры по высоте и ширине (в миллиметрах), определяется калибровщиком по формулам:

$$Err_h = |\bar{h} - h^0| \quad (1)$$

$$Err_w = |\bar{w} - h^0| \quad (2)$$

где  $h^0$  - истинный размер концевой меры (калибр), мм;

$\bar{h}$  - среднее значение измеренных высот концевой меры, мм;

$\bar{w}$  - среднее значение измеренных ширин концевой меры, мм;

Неопределенность результатов измерений характеризуется среднеквадратическим отклонением повторных измерений от средних значений высоты и ширины рассчитывается программой Calibrate.exe по формулам:

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (h_k - \bar{h})^2} \quad (3)$$

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (w_k - \bar{w})^2} \quad (4)$$

Измерение высоты  $h_k$  и ширины  $w_k$  концевой меры для целей калибровки производится сканером автоматически 20 раз (программный

интерфейс позволяет изменять количество измерений). Распознавание концевой меры и расчет промежуточных данных для целей калибровки выполняется по алгоритму, изложенному в Приложении 1

Средние измеренные значения высоты и ширины, рассчитываются по формулам:

$$\bar{h} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K h_k \quad (5)$$

$$\bar{w} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K w_k \quad (6)$$

где  $K$  - количество повторных измерений

$k$ - номер измерения ( $k=1, \dots, K$ )

$h_k$  - измеренная сканером высота концевой меры при  $k$ -том измерении, мм

$w_k$  - измеренная сканером ширина концевой меры при  $k$ -том измерении, мм.

### 11. Оформление результатов калибровки.

Результаты калибровки оформляют сертификатом калибровки лазерного сканера с указанием абсолютных погрешностей и неопределенностей. Ниже приведены значений величин, которые заносятся в таблицу.

Таблица

Результаты калибровки сканера с применением концевой меры 4,5 мм

№ Изм.	Кол-во измерен.	$h^0$ , mm	$\bar{h}$ , mm	$\bar{w}$ , mm	Err <sub>h</sub> , mm	Err <sub>w</sub> , mm	$\sigma_h$ , mm	$\sigma_w$ , mm
1.	20	4,5	4,4895	4,2547	0,01	0,24	0,008	0,131

Рекомендуемая форма сертификата калибровки лазерного сканера приведена в Приложении 2.

Алгоритм математической обработки первичных данных, поступающих от лазерного сканера в компьютер. Расчет высоты и ширины концевой меры.

Начальный этап любой обработки первичных данных - регуляризация потока данных, поступающих от сканера в компьютер.

Поток первичных данных от сканера содержит облако нерегулярно расположенных точек скана. Каждая точка характеризуется тремя числами  $(x, y, z)$ :

$x$  - координата поперек шва, отсчитывается от середины сканера, положительная в одну сторону от середины и отрицательная в другую сторону, мм

$y$  - координата вдоль шва, определяемая механикой перемещения сканера, мм

$z$  - расстояние от считывающего устройства сканера до поверхности, мм

Нужно знать заранее, в каких пределах может быть первичное значение  $x$  для любого скана, например  $-25 < x < 25$ , то есть ширина диапазона изменения  $x$  не превышает 50. назовем его  $x_{MAX}$ . Можно его уточнить по фактическим характеристикам лазерного сканера.

Нужно также определиться с максимальной возможной длиной скана по  $y$  и диапазоном изменения  $y$ , например установим пока  $0 < y < 200 = y_{MAX}$ .

Берем прямоугольник размером  $(x_{MAX}, y_{MAX})$  и разбиваем его на равные прямоугольники - кластеры с интересующим нас шагом  $(\Delta x, \Delta y)$ .

Количество кластеров по  $y$ :  $m = y_{MAX} / \Delta y$ , нумерация  $i = 1, \dots, m$ , центры  $Y_i = (i - 1/2) \Delta y$

Количество кластеров по  $x$ :  $n = x_{MAX} / \Delta x$ , нумерация  $j = 1, \dots, n$ , центры  $X_j = (j - 1/2) \Delta x$

Обнуляем матрицы:  $K_{i,j} = 0$  - счетчики попаданий в кластеры,  $Z_{i,j} = 0$  - высоты в кластерах.

В потоке точек первичного скана  $(x,y,z)$  пропускаем без обработки точки с  $z < 0$ ,

а точки с  $z > 0$  распределяем по кластерам с индексами  $(i,j)$ .

$$i = y/\Delta y + 1 \quad \text{с округлением до целого вниз}$$

$$j = (x+x_{\text{MAX}}/2)/\Delta x + 1 \quad \text{с округлением до целого вниз}$$

$$K_{i,j} := K_{i,j} + 1$$

$$Z_{i,j} := Z_{i,j} + z$$

Из большого прямоугольника  $(x_{\text{MAX}}, y_{\text{MAX}})$  вычеркиваем неинформативные строки и столбцы пустых кластеров с  $K_{i,j} := 0$ .

Если в строке  $i$  есть хотя бы один пустой кластер, вычеркиваем всю строку кластеров.

Если в столбце  $j$  есть хотя бы один пустой кластер, вычеркиваем весь столбец кластеров.

Получился прямоугольник поменьше, содержащий только информативные непустые кластеры. Количество кластеров по  $x$  теперь стало равно  $N$ , количество кластеров по  $y$  равно  $M$

Перенумеровываем заново только информационные кластеры  $i=1,\dots,M$   
 $j=1,\dots,N$

и сдвигаем весь прямоугольник информационных кластеров в сторону начала координат, так, чтобы центр левого нижнего кластера оказался в точке  $(0,0)$ :

$$X_j := X_j - \Delta x / 2 \quad Y_i := Y_i - \Delta y / 2$$

Вычисляем средние расстояния от сканера до поверхности по кластерам:

$$Z_{i,j} := Z_{i,j} / K_{i,j}$$

Теперь центры кластеров образуют регулярную сетку. Левый нижний узел сетки находится в начале координат  $(0,0)$ . Значения  $Z_{i,j}$  - воздушные зазоры между считывающим устройством сканером и поверхностью подложки.



Следует иметь в виду, что плоскость подложки может быть наклонена относительно плоскости перемещения считывающего устройства, и в таком случае в разных углах зоны сканирования зазоры получатся разными. Это вносит систематическое искажение в результаты сканирования эталона или иного объекта, лежащего на подложке. Уберем наклон реплики скана подложки так, чтобы воздушные зазоры между сканером и подложкой выровнялись.

Для этого возьмем крайнюю левую и крайнюю правую полосу кластеров, проведем через них плоскость  $Z^0 = aX + bY + c$ , и наклоним эту плоскость вместе со значениями  $Z$  так, чтобы реплика скана подложки легла горизонтально.

Вычисление коэффициентов уравнения  $Z^0 = aX + bY + c$  для плоскости основного металла - стандартная задача построения линейного уравнения регрессии в пространстве. Для ее решения используем формулы метода наименьших квадратов с небольшим изменением: вместо суммирования по всему ряду индексов  $j=1, \dots, N$  производится суммирование только по двум индексам  $j=1$  и  $j=N$  :

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{1}{2} \sum_{j=1, N} X_j = \frac{X_1 + X_N}{2} & \overline{X^2} &= \frac{1}{2} \sum_{j=1, N} X_j^2 = \frac{X_1^2 + X_N^2}{2} \\ \bar{Y} &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_i & \overline{Y^2} &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_i^2 \\ \bar{Z} &= \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, N} Z_{i,j} = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M (Z_{i,1} + Z_{i,N}) \\ \bar{Z}_1 &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Z_{i,1} & \bar{Z}_N &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Z_{i,N} & \bar{Z}_i &= \frac{1}{2} \sum_{j=1, N} Z_{i,j} = \frac{Z_{i,1} + Z_{i,N}}{2} \quad i=1, \dots, M \\ a &= \frac{\frac{1}{2} \sum_{j=1, N} X_j \bar{Z}_j - \bar{X} \bar{Z}}{X^2 - (\bar{X})^2} = \frac{\frac{X_1 \bar{Z}_1 + X_N \bar{Z}_N}{2} - \bar{X} \bar{Z}}{X^2 - (\bar{X})^2} = \frac{X_1 \bar{Z}_1 + X_N \bar{Z}_N - 2\bar{X} \bar{Z}}{2(X^2 - (\bar{X})^2)} \end{aligned}$$

$$b = \frac{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_i \bar{Z}_i - \bar{Y} \bar{Z}}{Y^2 - (\bar{Y})^2} \quad c = -\bar{X}a - \bar{Y}b + \bar{Z}$$

Теперь реплика скана поверхности подложки базирована по координате  $z=0$  и приведена в горизонтальное положение вместе с репликой скана лежащего на подложке эталона или иного объекта сканирования (например, объект сканирования - выпуклость сварного шва, а подложка - поверхность основного металла).

Заключительная операция - переворачивание реплики скана в естественное положение: подложка лежит внизу в плоскости  $z=0$ , а объект сканирования выступает вверх над подложкой.

$$Z_{i,j} := aX_i + bY_j + c - Z_{i,j} \quad i=1, \dots, M \quad j=1, \dots, N$$

Вся дальнейшая обработка выполняется на регуляризованной реплике скана.

Опишем подробно расчетные формулы, используемые для распознавания высоты и ширины эталона.

Исходные данные регуляризованного скана:

$i = 1, \dots, M$  - нумерация и количество сечений;

$j = 1, \dots, N$  - нумерация и количество точек в сечении;

$x_{i,j}$  - горизонтальная координата точки скана в сечении;

$y_{i,j}$  - вертикальная координата точки скана в сечении;

$\Delta z$  - шаг сканера при переходе от сечения к сечению.

*Сканер выдает координаты точек  $(x, y)$  отсканированного  $i$ -го сечения эталона, находящегося на подложке. Находим среднюю высоту  $h_m$  всех точек сечения. Все точки, лежащие ниже средней ( $y < h_m$ ) считаем поверхностью подложки, проводим через них прямую  $y = m_1x + b_1$ , используя метод медианной регрессии.*

Средняя высота точек в  $i$ -м сечении:

$$h_i^m = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_{i,j} \quad i = 1, \dots, M$$

Из общего множества точек в  $i$ -м сечении выделяем подмножество  $A_i$  - это подмножество точек  $i$ -го сечения, лежащих на подложке, и подсчитываем количество точек в подмножестве  $A_i$ .

Алгоритм выделения подмножества  $A_i$  и подсчета точек в нем:

$N_i^A = 0 \quad i = 1, \dots, M$  - счетчик точек на подложке в  $i$ -м сечении

$$\left\{ \text{Если } y_{i,j} < h_i^m \quad \text{то} \quad \begin{pmatrix} N_i^A = N_i^A + 1 \\ x_{N_i^A}^A = x_{i,j} \\ y_{N_i^A}^A = y_{i,j} \end{pmatrix} \right\} \quad j = 1, \dots, N \quad i = 1, \dots, M$$

В каждом сечении через точки подмножества  $A_i$ , лежащие на подложке, проводим прямую  $y = m1_i x + b1_i$  методом Тейла-Сена. Эта прямая описывает поверхность подложки. Значения коэффициентов  $m1_i$  и  $b1_i$  определяются по формулам:

$$m1_i = \frac{2}{N_i^A(N_i^A - 1)} \sum_{j=1}^{N_i^A-1} \sum_{k=j+1}^{N_i^A} \frac{y_{i,j}^A - y_{i,k}^A}{x_{i,j}^A - x_{i,k}^A} \quad b1_i = \frac{1}{N_i^A} \sum_{j=1}^{N_i^A} (y_{i,j}^A - m1_i x_{i,j}^A)$$

$i = 1, \dots, M$

Комментарий: Метод Тейла-Сена (Theil-Sen Estimator) - один из методов решения задачи нахождения коэффициентов линейной регрессии  $y = ax + b$ . Вначале вычисляется наклон прямой  $a$  как медиана множества наклонов отрезков, соединяющих все пары точек. Затем вычисляется константа  $b$  как медиана множества величин  $b = y - ax$  для всех точек.

*Далее находим наибольший интервал  $[x0_1, x0_2]$ , в котором все точки лежат выше найденной поверхности подложки ( $y > m1x + b1$ ), и через них аналогично проводим прямую линию  $y = m2x + b2$ , которая должна соответствовать поверхности концевой меры.*

Из общего множества точек в  $i$ -м сечении выделяем подмножество точек  $B_i$ , которое будем использовать для построения прямой, описывающей

поверхность концевой меры в первом приближении. Точки подмножества  $B_i$  удовлетворяют трем условиям:

1) все точки подмножества  $B_i$  лежат выше прямой  $y = m1_i x + b1_i$ ,

2) точки подмножества  $B_i$  образуют непрерывный ряд точек сканирования

3) если на скане есть несколько рядов точек, удовлетворяющих условиям 1 и 2,

то в качестве подмножества  $B_i$  выбирается самый длинный ряд.

Алгоритм выделения подмножества точек  $B_i$  и определения границ:

Цикл  $i = 1, \dots, M$

$l_i^{MAX} = 0$  - длина самого длинного ряда выше прямой  $y = m1_i x + b1_i$ ,

$N_i^{LB} = 0$  - номер левой точки в самом длинном ряду в  $i$ -м сечении

$N_i^{RB} = 0$  - номер правой точки в самом длинном ряду в  $i$ -м сечении

$l = 0$  - текущий счетчик непрерывного ряда точек выше прямой

Цикл  $j = 1, \dots, N$

Если  $y_{i,j} > m1_i x_{i,j} + b1_i$  то  $l = l + 1$  иначе  $l = 0$

Если  $l > l_i^{MAX}$  то  $(l_i^{MAX} = l, N_i^{RB} = j, N_i^{LB} = N_i^{RB} - l + 1)$

Конец цикла  $j$

Конец цикла  $i$

Определили для каждого сечения наибольший непрерывный интервал, в котором все точки скана лежат выше поверхности подложки:

$$[x01_i, x02_i] = [x_{i,N_i^{LB}}, x_{i,N_i^{RB}}] \quad i = 1, \dots, M$$

В каждом сечении через точки подмножества  $B_i$ , лежащие на концевой мере, проводим прямую  $y = m2_i x + b2_i$  методом Тейла-Сена. Эта прямая описывает поверхность концевой меры в первом приближении. Значения коэффициентов  $m2_i$  и  $b2_i$  определяются по формулам:

$$m2_i = \frac{2}{(N_i^{RB} - N_i^{LB} + 1)(N_i^{RB} - N_i^{LB})} \sum_{j=N_i^{LB}}^{N_i^{RB}-1} \sum_{k=j+1}^{N_i^{RB}} \frac{y_{i,j} - y_{i,k}}{x_{i,j} - x_{i,k}} \quad i = 1, \dots, M$$

$$b2_i = \frac{1}{N_i^{RB} - N_i^{LB} + 1} \sum_{j=N_i^{LB}}^{N_i^{RB}} (y_{i,j} - m2_i x_{i,j}) \quad i = 1, \dots, M$$

Уточняем интервал  $[x0_1, x0_2]$ , отбрасывая с обоих концов все точки, лежащие ниже поверхности меры ( $y < m2x + b2$ ), получаем интервал  $[x_1, x_2]$ . Еще раз строим прямую  $y = m2x + b2$  через точки интервала  $[x_1, x_2]$ , уточняя положение поверхности меры.

Из подмножества точек  $B_i$  в  $i$ -м сечении исключаем с обоих концов все точки, лежащие ниже поверхности меры в первом приближении  $y = m2_i x + b2_i$  и получаем подмножество точек  $C_i$ , которое будем использовать для построения прямой, описывающей поверхность концевой меры во втором приближении.

Алгоритм выделения подмножества точек  $C_i$  и определения границ:

$N_i^{LC} = N_i^{LB}$  - номер левой точки подмножества  $C_i$

$N_i^{RC} = N_i^{RB}$  - номер правой точки подмножества  $C_i$

{ Если  $(y_{i,j} < m2_i x_{i,j} + b2_i$  и  $y_{i,j+1} \geq m2_i x_{i,j+1} + b2_i)$  то  $N_i^{LC} = j+1$  }  $j = N_i^{LB}, \dots, N_i^{RB} - 1$   
 { Если  $(y_{i,j} < m2_i x_{i,j} + b2_i$  и  $y_{i,j-1} \geq m2_i x_{i,j-1} + b2_i)$  то  $N_i^{RC} = j-1$  }  $j = N_i^{RB}, \dots, N_i^{LB} + 1$

Определили для каждого сечения уточненный непрерывный интервал точек, лежащих на концевой мере:

$$[x1_i, x2_i] = [x_{i,N_i^{LC}}, x_{i,N_i^{RC}}] \quad i = 1, \dots, M$$

В каждом сечении через точки подмножества  $C_i$ , лежащие на концевой мере, проводим еще раз прямую  $y = m2_i x + b2_i$  методом Тейла-Сена. Эта прямая описывает поверхность концевой меры во втором приближении.

Уточненные значения коэффициентов  $m2_i$  и  $b2_i$  :

$$m2_i = \frac{2}{(N_i^{RC} - N_i^{LC} + 1)(N_i^{RC} - N_i^{LC})} \sum_{j=N_i^{LC}}^{N_i^{RC}-1} \sum_{k=j+1}^{N_i^{RC}} \frac{y_{i,j} - y_{i,k}}{x_{i,j} - x_{i,k}} \quad i = 1, \dots, M$$

$$b2_i = \frac{1}{N_i^{RC} - N_i^{LC} + 1} \sum_{j=N_i^{LC}}^{N_i^{RC}} (y_{i,j} - m2_i x_{i,j}) \quad i = 1, \dots, M$$

*Дополнительно определяем интервал  $[x'_1, x'_2]$ , который задает ширину концевой меры: из интервала  $[x0_1, x0_2]$  с обоих концов отбрасываем точки, для которых  $y - y_1 > x - x_1$ , т.е. лежащие ниже прямой, проведенной под углом  $45^\circ$  от краев интервала  $[x_1, x_2]$ . Таким образом, учитывается наличие фаски на ребрах концевой меры.*

Из подмножества точек  $V_i$  в  $i$ -м сечении исключаем с обоих концов все точки, лежащие ниже фаски концевой меры. Для этого на концах интервала  $[x1_i, x2_i] = [x_{i,N_i^{LC}}, x_{i,N_i^{RC}}]$  проводим прямые под углом  $45^\circ$  и исключаем из интервала  $[x01_i, x02_i] = [x_{i,N_i^{LB}}, x_{i,N_i^{RB}}]$  точки, лежащие ниже этих прямых. Получается подмножество точек  $D_i$ , характеризующее ширину концевой меры, включая фаски.

Алгоритм выделения подмножества точек  $D_i$  и определения границ:

$$N_i^{LD} = N_i^{LB} \quad \text{- номер левой точки подмножества } D_i$$

$$N_i^{RD} = N_i^{RB} \quad \text{- номер правой точки подмножества } D_i$$

$$\left\{ \text{Если } y_{i,j_i^{LC}} - y_{i,j} > x_{i,j_i^{LC}} - x_{i,j} \quad \text{то } N_i^{LD} = j+1 \right\} \quad j = N_i^{LB}, \dots, N_i^{RB} - 1$$

$$\left\{ \text{Если } y_{i,j_i^{LC}} - y_{i,j} > x_{i,j} - x_{i,j_i^{LC}} \quad \text{то } N_i^{RD} = j-1 \right\} \quad j = N_i^{RB}, \dots, N_i^{LB} + 1$$

Определили для каждого сечения интервал точек, лежащих на поверхности концевой меры и характеризующих ширину концевой меры с учетом фасок:

$$[x'1_i, x'2_i] = [x_{i,N_i^{LD}}, x_{i,N_i^{RD}}] \quad i = 1, \dots, M$$

*Еще раз строим прямую  $y = m_1x + b_1$  через все точки сечения за исключением интервала  $[x0_1, x0_2]$ , уточняя положение подложки.*

Уточняем положение подложки. Для этого из общего множества точек в  $i$ -м сечении исключаем точки интервала  $[x_{01_i}, x_{02_i}] = [x_{i,N_i^{LB}}, x_{i,N_i^{RB}}]$ . Получается подмножество  $E_i$  -это подмножество точек  $i$ -го сечения, используемых для уточнения положения подложки, и подсчитываем количество точек в подмножестве  $E_i$ .

Алгоритм выделения подмножества точек  $E_i$  и подсчета точек:

$N_i^E = 0 \quad i = 1, \dots, M$  - счетчик точек подмножества  $E_i$  на подложке в  $i$ -м сечении

$$\left. \begin{array}{l} \left( \begin{array}{l} N_i^E = N_i^E + 1 \\ x_{i,N_i^E}^E = x_{i,j} \\ y_{i,N_i^E}^E = y_{i,j} \end{array} \right) \quad j = 1, \dots, N_i^{LB} - 1 \\ \left( \begin{array}{l} N_i^E = N_i^E + 1 \\ x_{i,N_i^E}^E = x_{i,j} \\ y_{i,N_i^E}^E = y_{i,j} \end{array} \right) \quad j = N_i^{RB} + 1, \dots, N \end{array} \right\} \quad i = 1, \dots, M$$

В каждом сечении через точки подмножеств  $E_i$ , лежащие на подложке, проводим уточненную прямую  $y = m1_i x + b1_i$  методом Тейла-Сена. Эта прямая описывает уточненную поверхность подложки. Значения уточненных коэффициентов  $m1_i$  и  $b1_i$ :

$$m1_i = \frac{2}{N_i^E(N_i^E - 1)} \sum_{j=1}^{N_i^E-1} \sum_{k=j+1}^{N_i^E} \frac{y_{i,j}^E - y_{i,k}^E}{x_{i,j}^E - x_{i,k}^E} \quad b1_i = \frac{1}{N_i^E} \sum_{j=1}^{N_i^E} (y_{i,j}^E - m1_i x_{i,j}^E)$$

$i = 1, \dots, M$

*Находим крайние точки поверхности концевой меры:  $(x'_1, t_2 x'_1 + b_2)$  и  $(x'_2, t_2 x'_2 + b_2)$ . Высоту меры в данном сечении считаем, как среднее расстояний от крайних точек до прямой  $y = t_1 x + b_1$ . После получения данных по всем сечениям, окончательную высоту определяем, как медиану высот во всех сечениях.*

Координаты крайних точек прямых отрезков, аппроксимирующих поверхность концевой меры в каждом сечении:

$$(x'1_i, m2_i x'1_i + b2_i) = (x_{i,N_i^{LD}}, m2_i x_{i,N_i^{LD}} + b2_i) \quad \text{левая точка} \quad i = 1, \dots, M$$

$$(x'2_i, m2_i x'2_i + b2_i) = (x_{i,N_i^{RD}}, m2_i x_{i,N_i^{RD}} + b2_i) \quad \text{правая точка} \quad i = 1, \dots, M$$

Расстояния от этих крайних точек до прямых  $y = m1_i x + b1_i$ , описывающих поверхность подложки:

$$h_i^L = \frac{|m1_i x_{i,N_i^{LD}} - m2_i x_{i,N_i^{LD}} - b2_i + b1_i|}{\sqrt{(m1_i)^2 + 1}} \quad h_i^R = \frac{|m1_i x_{i,N_i^{RD}} - m2_i x_{i,N_i^{RD}} - b2_i + b1_i|}{\sqrt{(m1_i)^2 + 1}} \quad i = 1, \dots, M$$

Средняя высота концевой меры в  $i$ -м сечении:

$$h_i = \frac{h_i^L + h_i^R}{2} \quad i = 1, \dots, M$$

Окончательно, высота концевой меры - средняя высота по всем сечениям:

$$h = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M h_i$$

*Далее проводим две прямые через крайние точки концевой меры во всех сечениях (соответствуют ребрам меры). Окончательную ширину определяем, как медиану расстояний между этими прямыми во всех сечениях.*

Позиция  $i$ -го сечения поперек ширины концевой меры характеризуется поперечной координатой:

$$z_i = (i - 1)\Delta z \quad i = 1, \dots, M$$

Уравнения двух прямых, аппроксимирующих положение крайних точек по ширине концевой меры (ребер меры) во всех сечениях, с учетом фаски:

$$x = a_L z + b_L \quad x = a_R z + b_R$$

Методом Тейла-Сена находим значения коэффициентов  $a_L, b_L, a_R, b_R$ :

$$a_L = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{k=j+1}^M \frac{x_{i,N_i^{LD}} - x_{k,N_k^{LD}}}{z_i - z_k} \quad b_L = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M-1} (x_{i,N_i^{LD}} - a_L z_i)$$

$$a_R = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{k=j+1}^M \frac{x_{i,N_i^{RD}} - x_{k,N_k^{RD}}}{z_i - z_k} \quad b_R = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M-1} (x_{i,N_i^{RD}} - a_R z_i)$$



Ширина концевой меры в  $i$ -м сечении - расстояние между точками пересечения плоскости сечения с прямыми, аппроксимирующими ребра концевой меры:

$$w_i = a_R z_i + b_R - a_L z_i - b_L$$

Окончательно, ширина концевой меры - это средняя ширина по всем сечениям:

$$w = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M w_i$$

**СЕРТИФИКАТ КАЛИБРОВКИ ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА № \_\_\_\_\_**

I. Наименование, тип, заводской номер лазерного сканера \_\_\_\_\_

II. Дата поступления на калибровку \_\_\_\_\_

III. Наименование и адрес заказчика \_\_\_\_\_

IV. Место проведения калибровки \_\_\_\_\_

V. Дата проведения калибровки \_\_\_\_\_

VI. Методика калибровки (наименование, номер, кем утверждена) \_\_\_\_\_

VII. Условия проведения калибровки \_\_\_\_\_

VIII. Доказательства прослеживаемости измерений (сведения об используемых при калибровке концевых мерах длины) \_\_\_\_\_

IX. Результаты калибровки

№ Изм.	Кол-во измерен.	$h^0$ , mm	$\bar{h}$ , mm	$\bar{w}$ , mm	Err <sub>h</sub> , mm	Err <sub>w</sub> , mm	$\sigma_h$ , mm	$\sigma_w$ , mm

Должность, Ф.И.О. лица,  
проводившего калибровку \_\_\_\_\_

Подпись