

ТОПОГРАФИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ ДЛЯ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС

Серебряков А.В., Розенбаум М.М., Розенбаум М.А.
УрФУ, г.Екатеринбург

mmr@mtf.ustu.ru

Серебряков Ан.В.

Первоуральский новотрубный завод, г.Первоуральск

Andrey.Serebryakov@chelpipe.ru

Смирнов С.В.

ИМАШ УрО РАН, г.Екатеринбург

Высокий уровень безопасности и надежности АЭС является главным условием функционирования атомной энергетики. Проектный срок службы основного оборудования АЭС должен составлять 60 лет (вместо прежних 30 лет) [1].

В состав оборудования АЭС входят парогенераторы – установки для выработки пара, подаваемого на турбину.

Работоспособность парогенератора является одной из важнейших составляющих безопасной эксплуатации АЭС. Парогенераторы являются и наиболее повреждаемым оборудованием АЭС [2].

Теплообменные трубы – один из наиболее ответственных и металлоемких элементов, определяющих фактический срок службы парогенератора на АЭС. Исследования, проведенные Центральным научно-исследовательским институтом конструкционных материалов «Прометей» (Санкт-Петербург) и опытно-конструкторским бюро «Гидропресс» (Подольск) показали, что при эксплуатации парогенератора основной причиной выхода из строя теплообменных труб является зарождение и последующее развитие коррозионных дефектов. Это в конечном итоге может привести образованию на трубах сквозных трещин и, следовательно, к разгерметизации первого контура реакторной установки [3-5]. С целью обеспечения безопасной эксплуатации парогенераторов, в период проведения плановых ремонтных работ на АЭС, теплообменные трубы подвергают неразрушающему контролю. По результатам контроля осуществляют превентивное глушение труб с недопустимыми для дальнейшей эксплуатации дефектами. По достижению предельно допустимого числа заглушенных теплообменных труб требуется замена парогенератора, что приводит к длительной остановке всей АЭС и к значительным экономическим убыткам.

В основном повреждения металла теплообменных труб парогенератора вызываются коррозионными процессами под слоем локального скопления шлама состоящего преимущественно из окислов железа и меди. Наличие отложений приводит к созданию локальных условий коррозионной среды. Наиболее интенсивно отложения образуются на более шероховатой

поверхности теплообменных труб и в местах дефектов в виде продольных и поперечных рисок, царапин и т.п. Поэтому состояние поверхности оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства, в первую очередь на коррозионную стойкость. При изготовлении парогенератора для АЭС-2006 с реактором ВВР-1000 используют трубы бесшовные холоднодеформированные из стали марки 08X18H10T размером 16x1,5 мм с повышенным качеством поверхности. Трубы поставляют по ТУ 14-3Р-197-2001 со шлифованной наружной и электрохимполированной внутренней поверхностями, либо по ТУ 187-ТУ-039С со шлифованной наружной и внутренней после термообработки в среде особоочищенного водорода поверхностями. Шероховатость наружной и внутренней поверхности труб по параметру R_a ГОСТ 2789-73 по всей длине труб не должна превышать 1,0 мкм по средней величине и 1,5 мкм по максимальной величине.

Качество поверхности теплообменных труб характеризуется наличием дефектов и шероховатостью поверхности.

Шероховатость и дефекты поверхности теплообменных труб парогенератора predetermined технологией изготовления труб. Технология изготовления труб для парогенераторов АЭС включает совокупность горячей и холодной деформации, обточки и расточки, химической, термической и отделочных операций. Каждая из указанных операций определяет качество труб. Влияние технологических операций на качество труб рассмотрено в работах [6-8]. В работе [9] приведен обзор технологических схем производства труб для парогенераторов используемых основными заводами-поставщиками.

Поэтому практический интерес представляет провести исследования топографии и анализ шероховатости поверхности труб 16 x 1,5 мм из стали 08X18H10T в состоянии поставки по ТУ14-3Р-197 и ТУ187-ТУ-039С разных заводов-изготовителей*:

*Данная статья не является рекламной. Исследуемые образцы труб в состоянии поставки полностью соответствуют ТУ 14-3Р-197-2001, ТУ 187-ТУ-039С. Поэтому названия заводов-изготовителей не приводятся

- Предприятие №1, поставка труб в соответствии с ТУ 14-3Р-197-2001.
- Предприятие №2, поставка труб в соответствии с ТУ 187-ТУ-039С.
- Предприятие №3, поставка труб в соответствии с ТУ 187-ТУ-039С.

Определение топографии и параметров шероховатости поверхности, предоставленных образцов проводили на оптическом профилометре Optical profiling system Veeco WYKO NT1100.

Технические характеристики прибора приведены в таблице 1. Данный профилометр относится к классу бесконтактных оптических приборов, чей принцип действия основан на оптической интерференционной микроскопии — бесконтактном методе для быстрого получения трехмерного и двухмерного топографического изображения поверхности, позволяющем наглядно

представить и количественно оценить профиль поверхности от нанометрового до миллиметрового диапазона. Измерения проводились по методике «Вертикальная сканирующая интерферометрия» (Vertical scanning interferometry - VSI) в автоматическом режиме, позволяющая измерять поверхности с высокими значениями шероховатости, а также различные элементы рельефа высотой (глубиной) до нескольких миллиметров. Имеющееся программное обеспечение (Wyko Vision 32) позволяет строить трехмерные изображения рельефа поверхности, линейные профили поверхности в заданном направлении и гистограммы распределения пиков по высоте, а также позволяет рассчитывать объемные и линейные параметры шероховатости. Калибровку прибора производили по калибровочным плиткам из комплекта прибора.

Таблица 1 - Технические характеристики оптического профилометра WYKO NT1100

Тип измерения	Интерферометрия
Скорость измерения	до 100 мкм/с
Увеличение	от x1,25 до x100
Поле зрения	от 0,05 мм до 4,95 мм
Диапазон измерения по вертикали	2 мм
Разрешение по вертикали	< 1 нм
Разрешение в плоскости измерения	300 нм

Параметры шероховатости поверхности были рассмотрены для поверхности (3D), так и для конкретного выделенного профиля вдоль заданного отрезка (2D) следующие:

R_q – среднеквадратичная шероховатость, рассчитанная для всей измеренной матрице:

Для случая 3D:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N z_{jk}^2}$$

Для случая 2D:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2}$$

Z_{jk} , Z_i – высота каждого пикселя над средней линией.

Стандарты: ASME B46.1-1995, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997, ГОСТ 25142-82.

R_a – среднее арифметическое отклонение профиля, рассчитанное по всей измеренной матрице:

Для случая 3D:

$$R_a = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N |z_{jk}|$$

Для случая 2D:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i|$$

Z_{jk} , Z_i – высота каждого пикселя над средней линией.

Стандарты: ASME B46.1-1995, ASME B46.1-1985, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997, ГОСТ 25142-82.

R_t – максимальная высота профиля, максимальная высота от пика до пика впадины. Абсолютное значение разности между самым высоким и самым низким пиком. Стандарты: ASME B46.1-1995, ISO 4287-1997, ГОСТ 25142-82.

$$R_t = R_v / + / R_p /$$

R_v — максимальная глубина впадины профиля, самая глубокая впадина. Это глубина наиболее глубокой впадины на профиле шероховатости на длине оценки. Стандарты: ASME B46.1-1995, ASME B46.1-1985, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997, ГОСТ 25142-82.

R_p - максимальная высота пика профиля, наиболее высокий пик. Это высота наиболее

высокого пика на профиле шероховатости на длине оценки. Стандарты: ASME B46.1-1995, ASME B46.1-1985, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997, ГОСТ 25142-82.

Результаты исследований параметров шероховатости для случая 2D (вдоль линии) для образцов приведены в таблице 2, 3. Для случая 3D (вся измеренная поверхность) значения параметров шероховатости приведены в таблице 4.

Таблица 2 - Параметры шероховатости для случая 2D (по линии) в продольном направлении

№ образца (предприятие)	R_q , мкм	R_a , мкм	R_t , мкм
1 (предприятие 1)	1,52	1,12	8,76
2 (предприятие 1)	1,99	1,53	10,49
3 (предприятие 2)	1,03	0,82	5,35
4 (предприятие 2)	0,59	0,48	3,32
5 (предприятие 3)	0,6	0,43	4,23

Таблица 3 - Параметры шероховатости для случая 2D (по линии) в поперечном направлении

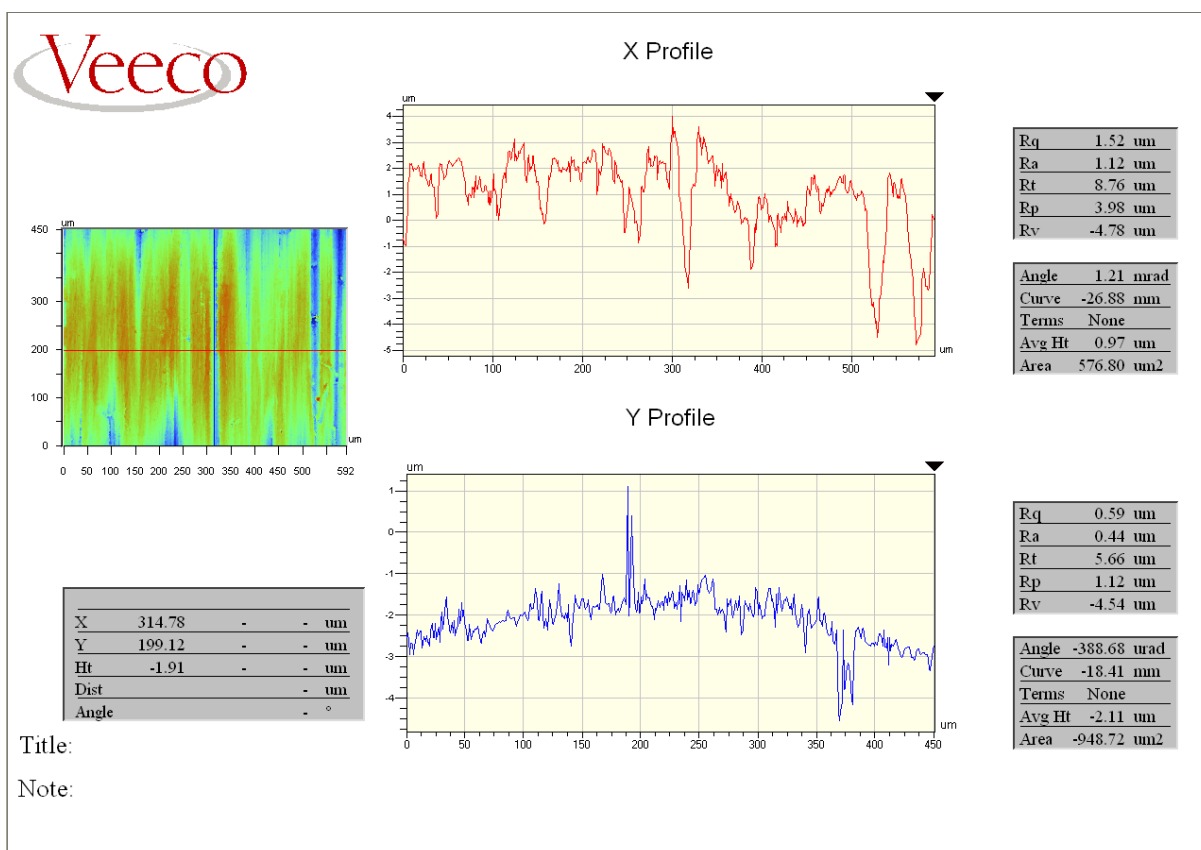
№ образца (предприятие)	R_q , мкм	R_a , мкм	R_t , мкм
1 (предприятие 1)	0,59	0,44	5,66
2 (предприятие 1)	0,77	0,66	3,93
3 (предприятие 2)	1,15	0,97	4,77
4 (предприятие 2)	1,08	0,84	5,54
5 (предприятие 3)	1,45	1,25	5,80

Таблица 4 - Параметры шероховатости для случая 3D (вся измеренная поверхность)

№ образца (предприятие)	R_q , мкм	R_a , мкм	R_t , мкм
1 (предприятие 1)	1,75	1,38	15,56
2 (предприятие 1)	2,11	1,63	15,533
3 (предприятие 2)	1,36	1,10	13,54
4 (предприятие 2)	1,42	1,10	12,69
5 (предприятие 3)	1,39	1,18	9,56

На рисунках 1 - 5 приведены двухмерное 2D (а) и трехмерное 3D (б) топографические изображения наружной поверхности для разных

образцов. Данные приведенные в таблице 2 проиллюстрированы на рисунке 6.



a

3-Dimensional Interactive Display

Surface Stats:

Ra: 1.38 um

Rq: 1.75 um

Rt: 15.56 um

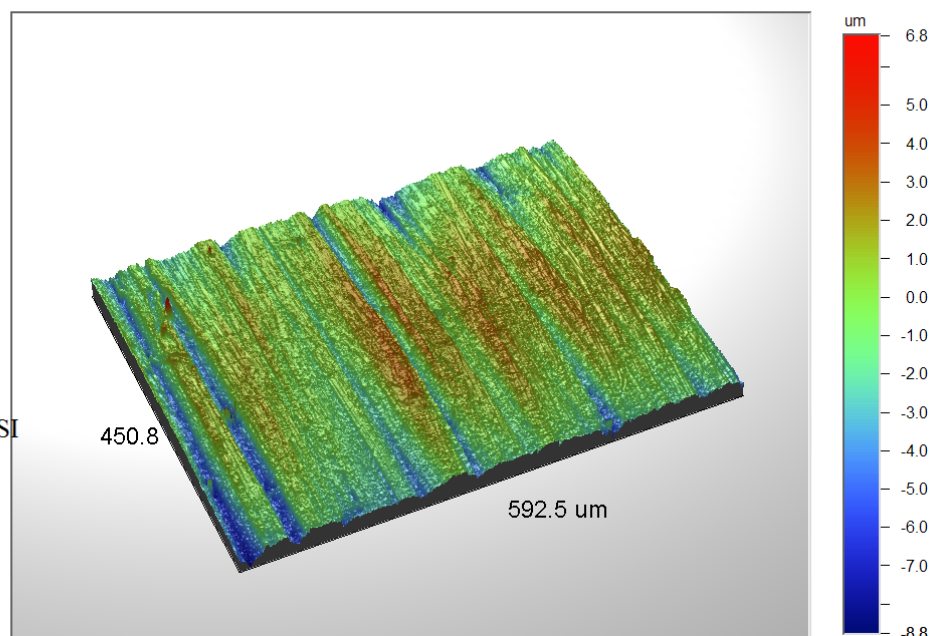
Measurement Info:

Magnification: 10.43

Measurement Mode: VSI

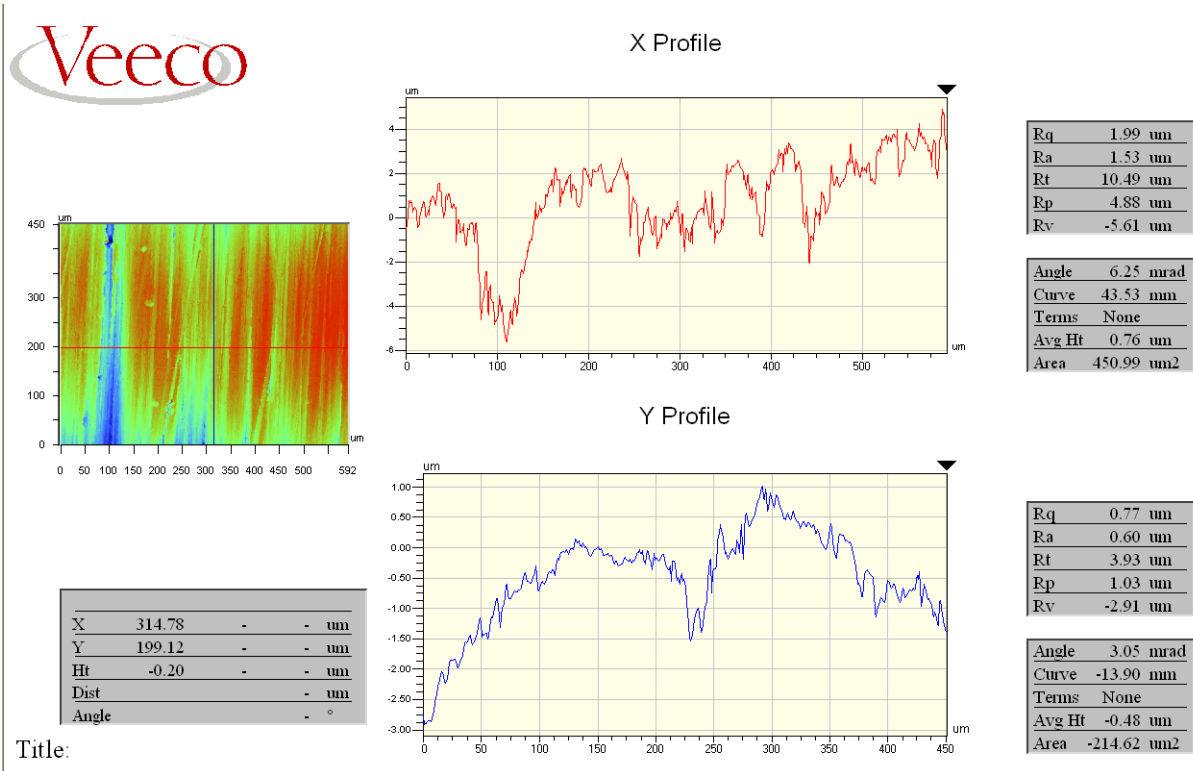
Sampling: 805.06 nm

Array Size: 736 X 480



б

Рис. 1. Топографическое изображение поверхности образца 1



a

Veeco 3-Dimensional Interactive Display

Surface Stats:

Ra: 1.63 um

Rq: 2.11 um

Rt: 15.53 um

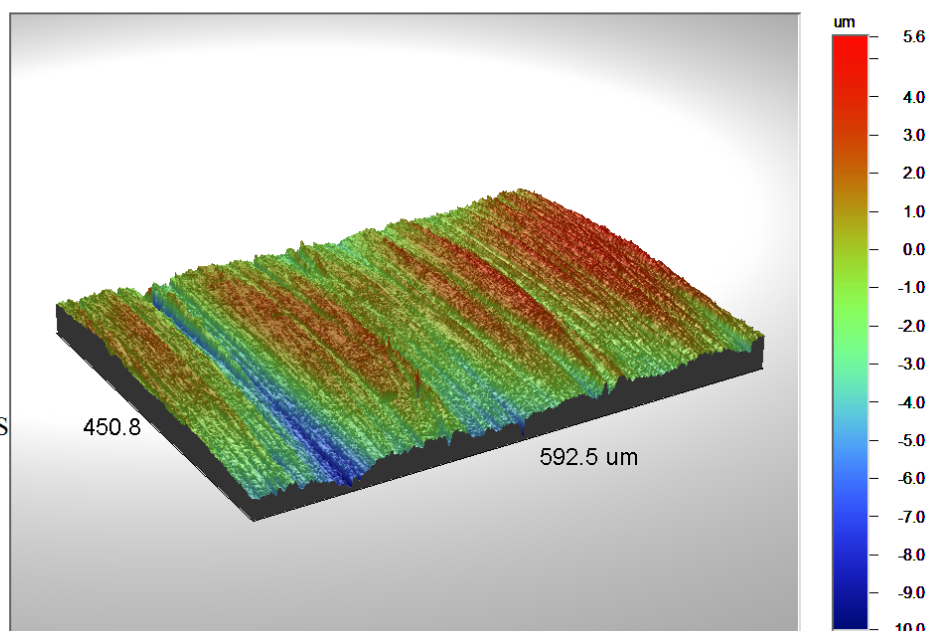
Measurement Info:

Magnification: 10.43

Measurement Mode: VS

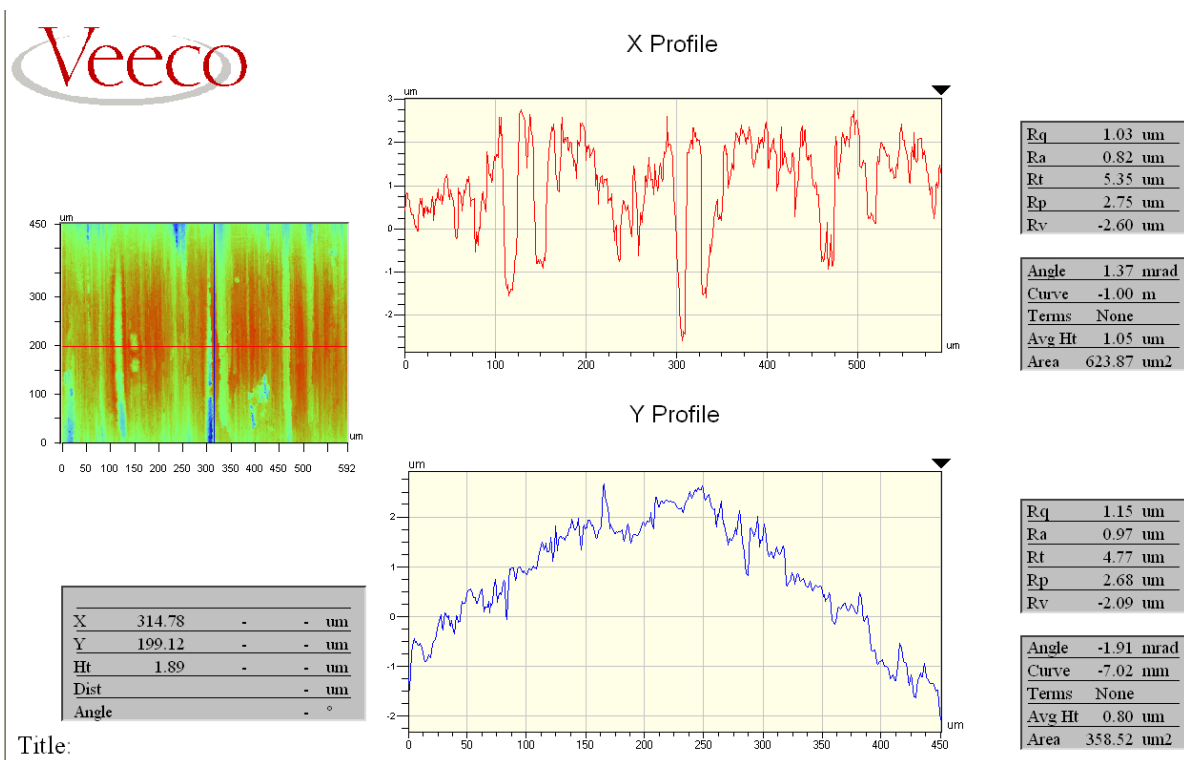
Sampling: 805.06 nm

Array Size: 736 X 480



6

Рис. 2. Топографическое изображение поверхности образца 2



a

3-Dimensional Interactive Display

Surface Stats:

Ra: 1.10 um

Rq: 1.36 um

Rt: 13.54 um

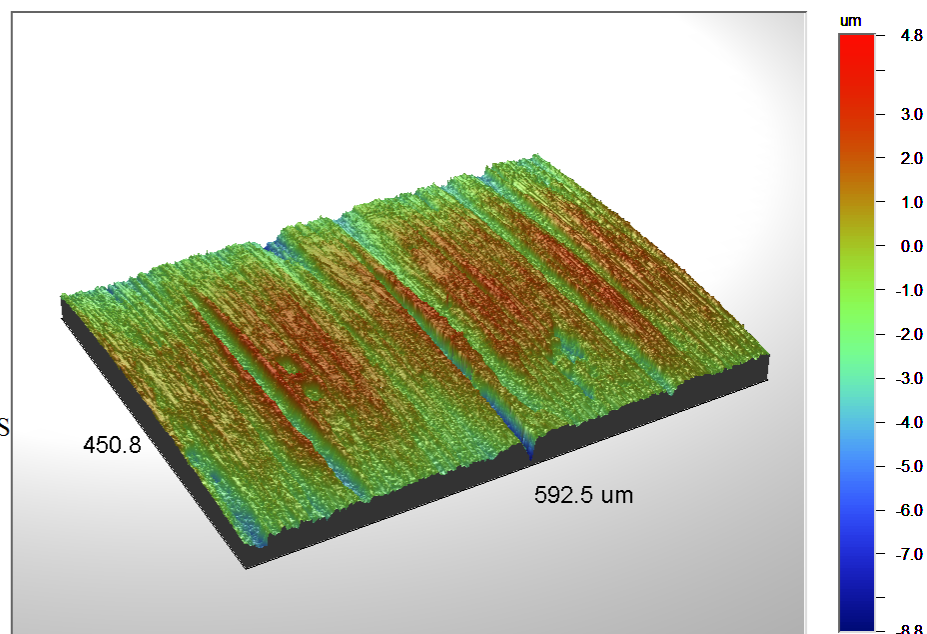
Measurement Info:

Magnification: 10.43

Measurement Mode: VS

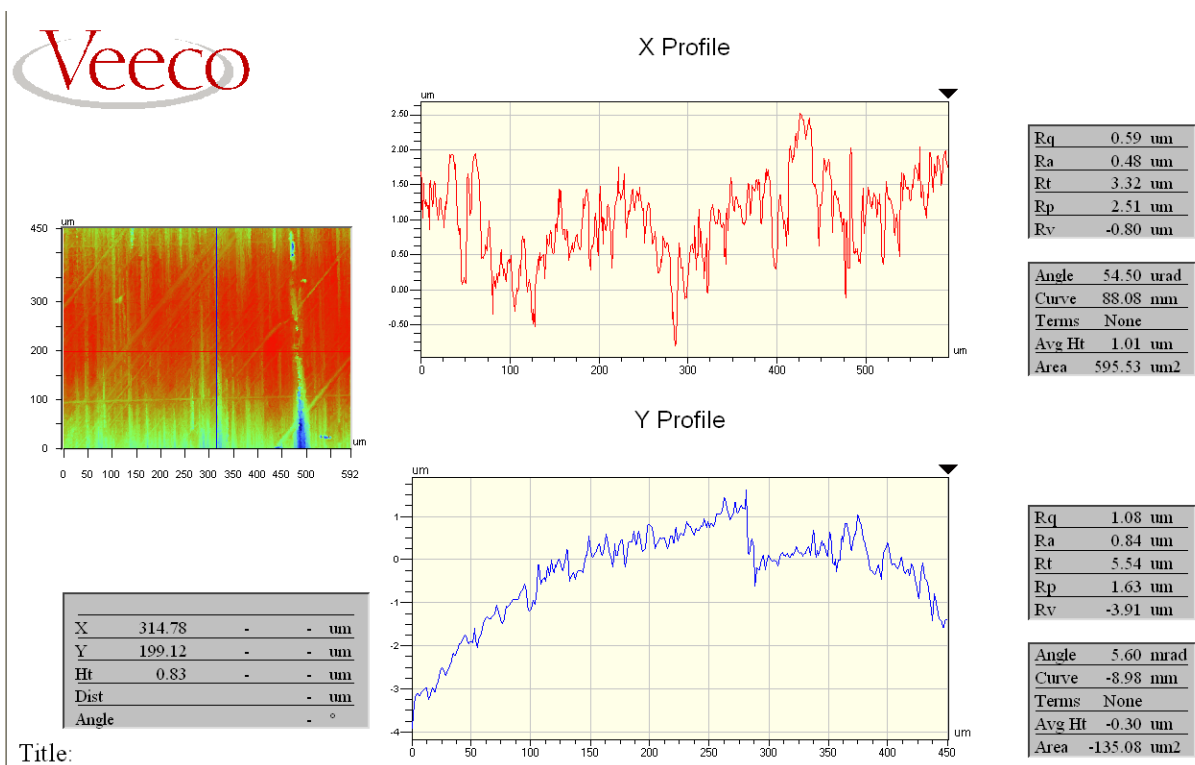
Sampling: 805.06 nm

Array Size: 736 X 480

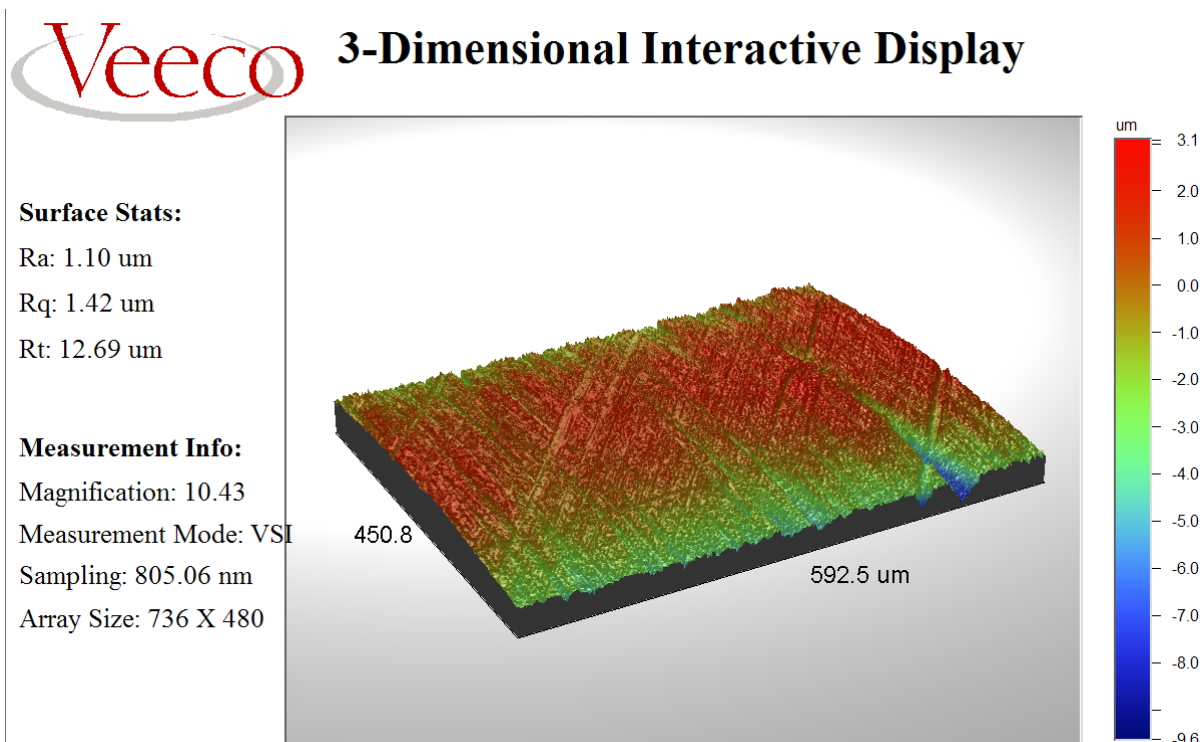


6

Рис. 3. Топографическое изображение поверхности образца 3

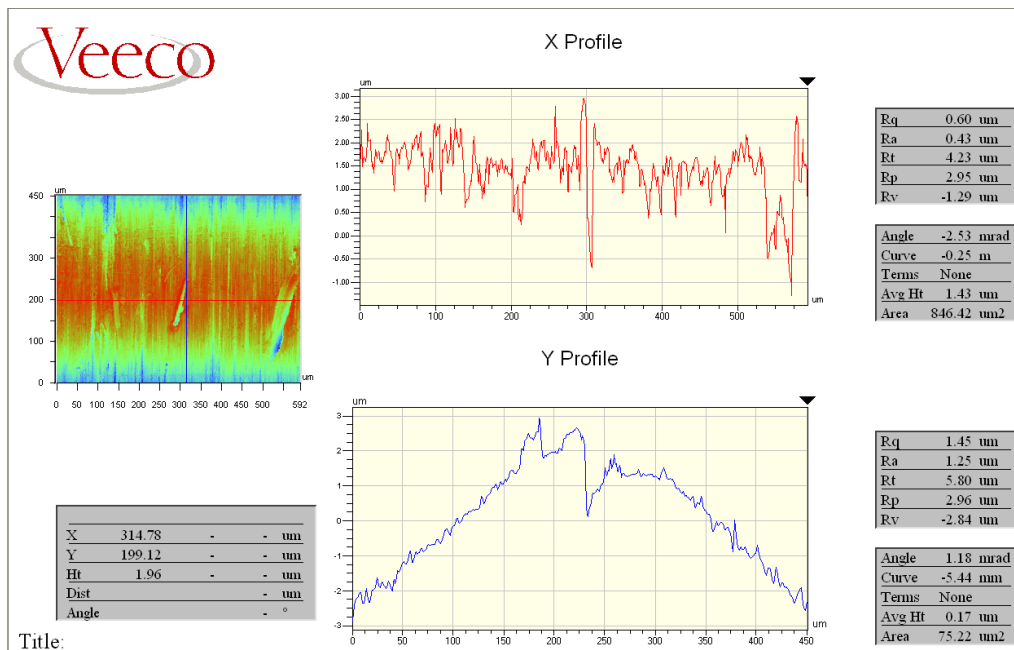


a



б

Рис. 4. Топографическое изображение поверхности образца 4



a

Veeco 3-Dimensional Interactive Display

Surface Stats:

Ra: 1.18 um

Rq: 1.39 um

Rt: 9.56 um

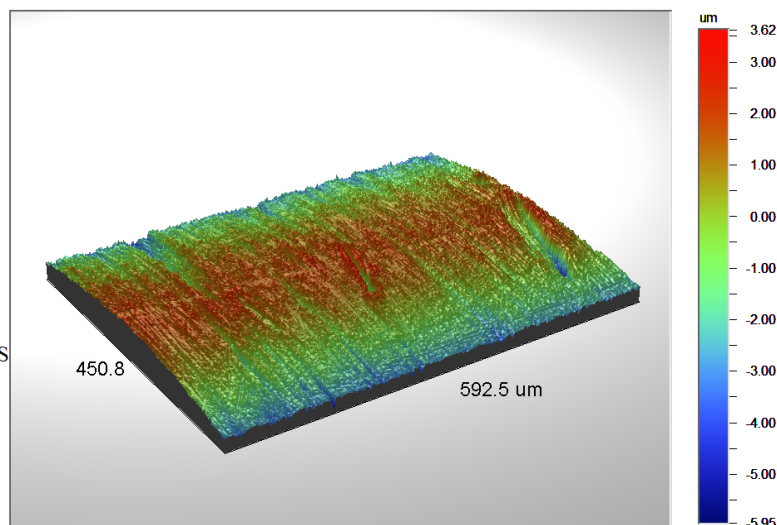
Measurement Info:

Magnification: 10.43

Measurement Mode: VS

Sampling: 805.06 nm

Array Size: 736 X 480



б

Рис. 5. Топографическое изображение поверхности образца 5

Результаты исследований позволяют констатировать следующее:

— шероховатость поверхности по параметру R_a в продольном направлении снижается (рисунок 6) в ряду образцов труб №1, 2(предприятие 1), 3,4 (предприятие 2), 5(предприятие 3), при этом параметр R_a одного порядка;

— шероховатость поверхности по параметру R_a в поперечном направлении и для всей измеренной поверхности одного порядка и

практически одинакова для всех образцов;

— оптический профилометр Optical profiling system Veeco WYKO NT1100 позволяет производить измерение параметров шероховатости, как в продольном, так и в поперечном направлении исследуемой поверхности. При этом в отличие от приборов, использующих щуповой метод, исключается получение ошибочных результатов измерений связанных с выбором направления трассы измерений, её длины и шага дискретизации.

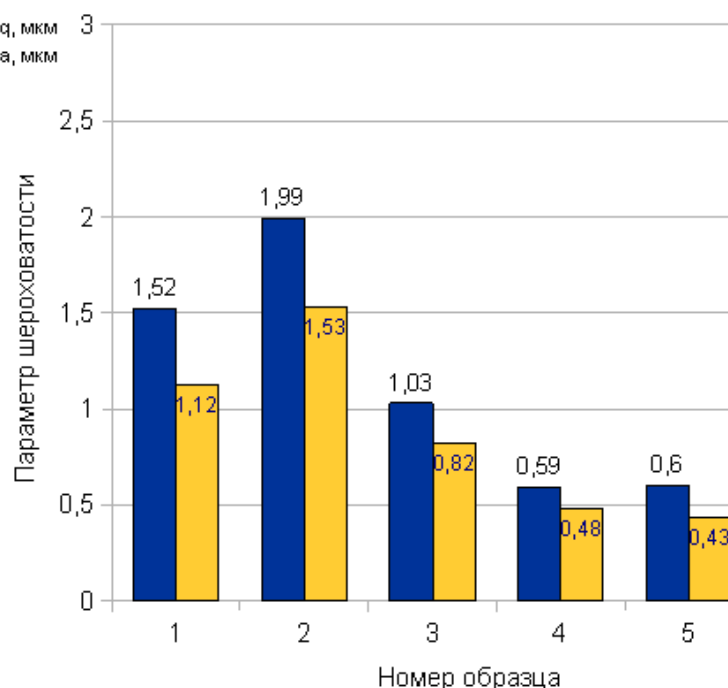


Рисунок 6 — Столбчатая диаграмма параметров шероховатости для случая 2D (по линии) в продольном направлении

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кириенко С.В. Развитие российской атомной отрасли / С.В. Кириенко // АТОМЭКСПО 2009: Международный форум, Москва, май 26-28, 2009.
2. Немытов, Д.С. Влияние эксплуатационных и конструктивных факторов на ресурс теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000: автореф. дисс. на соискание степени канд. техн. наук. / Д.С.Немытов; - Москва, 2009
3. Карзов, Г.П. Оценка динамики зарождения и развития повреждений теплообменных труб парогенераторов типа ПГВ-1000 в рабочих режимах / Г.П. Карзов, С.А. Суворов, В.А. Федорова и др. // 7-й Международный семинар по горизонтальным парогенераторам, ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 3-5 октября, 2006.
4. Карзов, Г.П. Анализ механизмов повреждения теплообменных труб на различных этапах эксплуатации парогенераторов типа ПГВ / Г.П. Карзов, С.А. Суворов, В.А.Федорова, А.В. Филиппов, Н.Б. Трунов // Proceeding of the Ninth International Conference on Material ISSUES in Design, Manufacturing and Operation of Nuclear Power Plants Equipment 6-8 June, 2006. Pushkin-St-Petersburg, Russia.
5. Неклюдов, И.М. Исследование причин образования коррозионных дефектов в теплообменных трубах парогенераторов ПГВ-1000 /И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, С.В. Гоженко // Коррозионные повреждения теплообменных труб парогенераторов Южноукраинской АЭС: сборник научных трудов СНИЯЭиП. Вып.8. – 2003. – С.50-63.
6. Серебряков Ан.В., Марков Д.В., Ладыгин С.А. и др. Новая технология производства прецизионных труб из коррозионно-стойкой стали // Сталь. 2006. №7. С. 61-65.
7. Буряк Т.Н., Вахрушева В.С., Тараненко А.А. Формирование качественной поверхности труб из коррозионно-стойких сталей и сплавов // Сталь. 2009. №8. С. 57-60.
8. Кузнецов Д.Е. Механизм формирования внутренней поверхности труб в процессе холодной прокатки // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2012. №2. С. 43-50.
9. Серебряков Ан.В. Исследования, разработка технологии и освоение производства прецизионных труб из коррозионностойкой стали. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.16.05-Обработка металлов давлением. Екатеринбург - 2007.