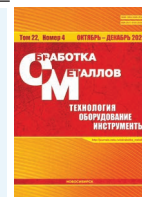




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Разработка и исследование профилографа для измерения отклонений формы поверхности изделий методом лазерного спиралевидного сканирования

Сергей Васильев^{a, *}, Виктор Алексеев^b, Михаил Васильев^c, Алена Федорова^d

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр. Московский, 15, г. Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0003-3346-7347>,  vsa_21@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>,  av77@list.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0001-7275-9751>,  mishawasilev@mail.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-0257-9197>,  e_a_a@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 620.1.08

История статьи:

Поступила: 12 сентября 2020

Рецензирование: 19 сентября 2020

Принята к печати: 01 октября 2020

Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Профилограф

Измерение отклонения

Форма поверхности

Спиралевидное сканирование

Лазерный метод

Изделие

Гофрированный профиль

Финансирование:

Результаты были получены в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МД-1198.2020.8, соглашение № 075-15-2020-228.

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются вопросы разработки профилографа и реализации с его помощью измерения отклонений формы поверхности изделий методом лазерного спиралевидного сканирования. Обзор научной литературы показывает, что в настоящее время вопрос контроля и оценки отклонений формы поверхности изделий требует дальнейших исследований, поскольку применение известных приборов и методов не всегда обеспечивает необходимую точность, технологичность и достаточную информативность измерений. **Цель работы:** разработка нового метода оценки трехмерного профиля путем реализации метода лазерного спиралевидного сканирования и исследование профилографа для повышения точности и производительности измерения отклонений формы поверхности изделия. **Методы.** В работе предложен новый метод оценки трехмерного профиля поверхности, чтобы непосредственно установить форму поверхности изделий для контроля качества поверхности изделий вне зависимости от ее расположения. Для реализации метода разработан и исследован профилограф оригинальной конструкции, обеспечивающий измерение двух параметров по спирали Архимеда. Выполнена оптимизация конструкции и метода представления информации для измерения отклонений формы поверхности изделий. **Результаты и обсуждение.** Предложена методика статистической оценки уравнений для описания формы металлических поверхностей, основанная на использовании классических законов. В случае гофрированной поверхности реализована оценка отклонений от плоскостности, установлена возможность определения отклонений формы поверхности изделий: волнистости, выпуклости, вогнутости и др. Апробация работы автоматизированного мехатронного устройства и предложенной методики проведена на гофрированных поверхностях. Полученные в результате статистической обработки различные уравнения сравнивались между собой, и выбиралось уравнение с наибольшим коэффициентом детерминации. Исследована профилограмма в виде развертки в декартовых координатах с целью получения достоверных и точных данных для оценки отклонений формы. Методом лазерного спиралевидного сканирования установлены величины прогиба и размер гофр по высоте гофрированного листа С-9.

Для цитирования: Разработка и исследование профилографа для измерения отклонений формы поверхности изделий методом лазерного спиралевидного сканирования / С.А. Васильев, В.В. Алексеев, М.А. Васильев, А.А. Федорова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 71–81. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22-4-71-81.

Введение

За последние десятилетия существенно повысились производительность труда и качество выпускаемой продукции. В производственном процессе контроль качества изделий является важным этапом. Одним из перспективных на-

правлений повышения уровня технологичности и производительности измерительного оборудования является создание приборов с оптимальными профилограммами и возможностями представления наглядной и точной информации об исследуемом объекте. В условиях увеличения производительности технологических линий в машиностроении при соблюдении высокой точности поверхностей изделий предъявляются существенные требования к точности и удобству эксплуатации устройств и методов для измерения отклонений формы поверхностей.

*Адрес для переписки

Васильев Сергей Анатольевич, д.т.н., доцент

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,

пр. Московский, 15,

428015, г. Чебоксары, Россия

Тел. +7 (927) 843-22-90, e-mail: vsa_21@mail.ru

Существует несколько методов проверки качества изделий, одним из таких видов операций в производственном процессе является контроль качества поверхности деталей. Известно несколько методов измерения шероховатости и волнистости поверхности, например контактный тип: атомно-силовая микроскопия, стилусная профилометрия и т. д. [1, 2]. К бесконтактным методам относят способы, реализуемые с помощью лазерной измерительной техники, методы обработки изображений, бинарный спекл-анализ изображений и др. [3–10]. Например, такие технологические параметры, как волнистость и отклонение формы поверхности, являются ключевыми в различных отраслях экономики. Так, в работах [11, 12] учитывается волнистость и морфология металлических листов, а гребнистость и волнистость подстилающей поверхности – в сельском хозяйстве [13–15]. Известен полевой профилограф С.А. Васильева, сканирующий исследуемую поверхность по окружности и измеряющий одновременно два параметра – угол поворота и расстояние до поверхности [16–18].

В настоящее время существует множество методик установления геометрических форм поверхностей и их отклонений [19–22], однако большинство из них являются либо медленными, способными работать только в лабораторных условиях, либо способными оценить лишь определенные параметры волнистости и позволяющими проводить измерения только в одной плоскости. Как правило, оборудование контактного типа, например стилусный профилометр, имеет невысокую производительность при измерениях по сравнению с бесконтактными [3]. У лазерной техники тоже есть недостатки, которые требуют определенных условий и пространства, свободного от вибраций, пыли и тепла [23]. Многие устройства не имеют автоматизации измерений, особенно устройства, представленные в ГОСТ. Поэтому разработка и исследование универсального портативного устройства, позволяющего измерять трехмерную волнистую поверхность в автоматизированном режиме, является актуальной задачей.

Традиционная проверка качества изделия производится путем отбора одного образца из партии, чтобы обеспечить качество конкретной партии. Такой метод проверки качества может привести к отбраковке всей партии или даже

приемке дефектных деталей. Для того чтобы обеспечить качество изделия, в современном цифровом мире каждый компонент должен пройти проверку качества, что повышает необходимость контроля в процессе производства. Контроль формы поверхности в процессе производства может обеспечить высокоскоростную проверку качества, снизить затраты квалифицированной рабочей силы и тем самым повысить производительность труда в современных производственных условиях [24, 25].

Отклонение формы реального профиля от формы номинального профиля называется отклонением формы. Для измерения отклонений формы изделий используют различные универсальные измерительные приборы, которые прошли государственные приемочные испытания. Можно использовать другие средства измерительных приборов, которые не выпускаются серийно, но прошли соответствующую аттестацию согласно ГОСТ 26877–2008 «Металлопродукция. Методы измерений отклонений формы».

К универсальным средствам измерения отклонений формы относятся поверочные линейки, поверочные и разметочные плиты, различных типов угольники 90°, линейки синусные со столиком, угломеры механические, уровни для контроля горизонтального и вертикального размещения поверхности.

К основным видам отклонений формы металлопродукции согласно ГОСТ 26877–2008 относят:

- отклонение от плоскостности и прямолинейности на длине 1 м;
- волнистость в поперечном сечении;
- прогиб в поперечном сечении;
- коробоватость в поперечном сечении;
- скручивание на нормируемом расстоянии от базового поперечного сечения в любой плоскости;
- разнотолщинность изделия или его элементов;
- выпуклость и вогнутость в поперечном сечении;
- кривизну (серповидность) поверхности изделия;
- перекося полок изделия;
- отклонение от величины заданного угла изделия;
- косину реза торца изделия.

Отмеченные виды отклонений формы металлопродукции довольно сложно одновременно замерить и рассчитать существующими методами. Приходится подбирать соответствующие средства измерительной техники под каждый вид или небольшую группу отклонений формы, что в промышленных масштабах создает определенную проблему.

С учетом вышесказанного сформулируем **цель исследований**: разработка нового метода оценки трехмерного профиля путем реализации метода лазерного спиралевидного сканирования и исследование профилографа для повышения точности и производительности измерения отклонений формы поверхности изделия.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1) на основе обзора методов и средств измерительной техники предложить подход и конструкцию профилографа для измерения отклонений формы поверхности изделий;

2) изготовить конструкцию профилографа и провести исследования его работы при получении и обработке информации о профиле поверхности изделий в 2D и 3D;

3) проанализировать профилограмму на возможность получения максимального количества видов отклонений формы для экспериментального образца и установить качество регрессионной модели через коэффициент детерминации.

Методика исследований

В качестве объекта исследования предлагается автоматизированное мехатронное устройство – профилограф для спирального сканирования поверхностей изделий (рис. 1). Разрабатываемый прибор предназначен для измерения отклонений формы и профиля поверхности металлопродукции, а также определения в измеренных профилях различных геометрических показателей и морфологических параметров поверхностей. Он может использоваться в машиностроении, электротехнике, в производстве листовых изделий, для измерения деталей сложной формы.

Профилограф для спирального сканирования содержит основание с различными адаптерами. На него установлена неподвижная ось, в ее верхней части размещены энкодер, водило и два

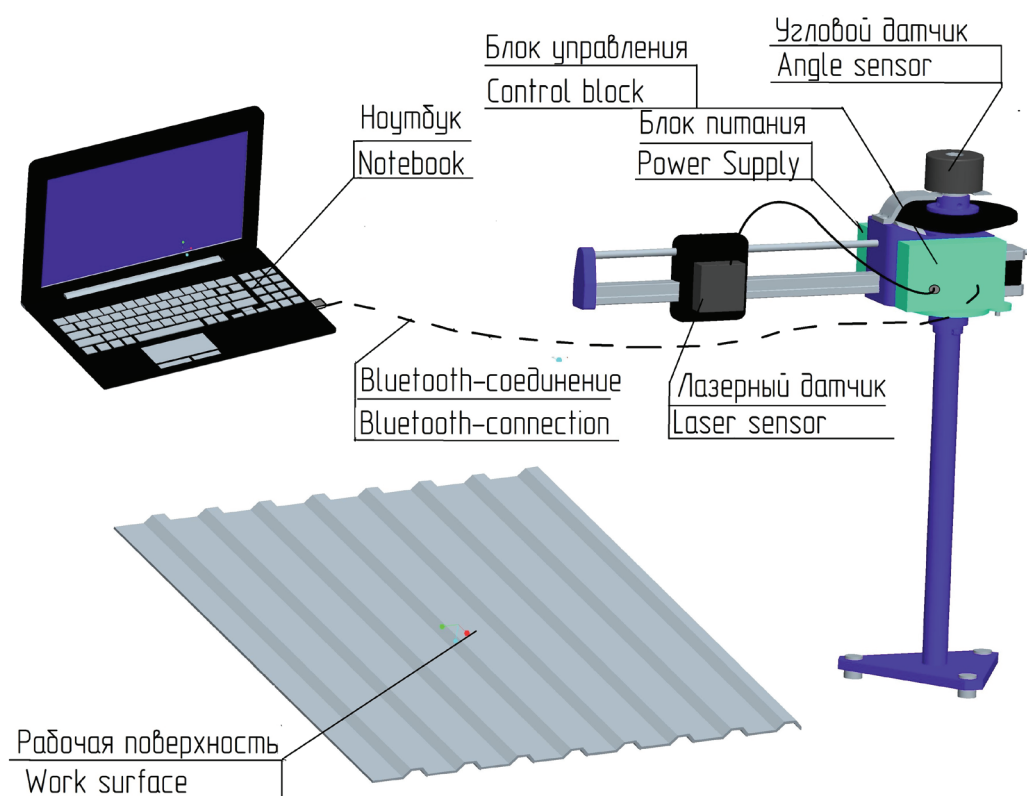


Рис. 1. Общий вид профилографа

Fig. 1. General view of the Profile recorder

опорных колеса – коническое и цилиндрическое, при обкатке по которым сателлитами и происходит вращение водила. На водиле установлена направляющая, где движется каретка с лазерным датчиком, движение которой в радиальном направлении передается винтовым механизмом. Перемещение каретки и вращение водила задается двигателем, установленным на водиле и передающим крутящий момент через цилиндрическую и коническую планетарные передачи для перемещения каретки и вращения подвижного плеча. На водиле также размещен электронный блок, который обрабатывает сигналы и подает питание, он соединен кабелями с датчиками, а также с ноутбуком посредством Bluetooth. В верхней части прибора установлен уровень.

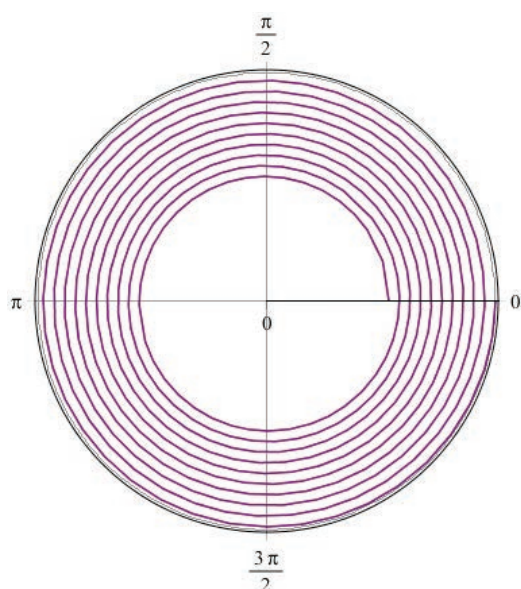
Принцип действия прибора основан на работе триангуляционного лазерного датчика, который вращается и сканирует исследуемую поверхность по спирали Архимеда (рис. 2).

Вначале профилограф размещается вертикально с помощью уровня вращением водила по окружности. Далее, используя беспроводную связь, соединяем компьютер и профилограф: включаем электрическое питание установки, вставляем Bluetooth-модуль в USB-порт на компьютере и ждем, пока частота мигания светодиода

достигнет одного раза в секунду. Запускаем компьютерную программу, и двигатель начнет передавать движение водилу при обкатке сателлитом опорного колеса. Водило передает движение сателлиту, обкатываемому по опорному колесу и жестко закрепленному с винтом, который в свою очередь передает поступательное движение в радиальном направлении каретке. За один оборот водила каретка перемещается на радиальный шаг, значение которого зависит от шага винта и передаточного отношения конической передачи. При вращении лазерный датчик измеряет расстояние до поверхности замерываемого объекта h и мгновенные значения угла поворота датчика γ , которые после обработки в электронном блоке сигналов передаются на ноутбук.

Изучение форм некоторых поверхностей можно проводить путем анализа коэффициентов описывающего его уравнения. В общем случае это может быть уравнение n -й степени. Однако в большинстве случаев можно ограничиться уравнениями 2-й и 3-й степени.

Статистическая обработка реальных данных, получаемых от датчика расстояния, производится с целью построения и анализа регрессионно-корреляционных моделей поверхности металла. Выбирается модель $z = f(x, y)$, описывающая по-



а



б

Рис. 2. Траектория движения датчика по спирали:

а – схема перемещения (вид сверху); б – общий вид

Fig. 2. The trajectory of the sensor in a spiral:

а – movement diagram (top view); б – general view

верхность. Затем производится оценка ее параметров и проверка модели на адекватность.

Рассмотрим уравнение поверхности второго порядка, которое представляет собой геометрическое место точек в трехмерном пространстве:

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{23}yz + 2a_{13}xz + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0, \quad (1)$$

где по крайней мере один из коэффициентов a_{11} , a_{22} , a_{33} , a_{12} , a_{23} , a_{13} отличен от нуля, т. е. значим. При рассмотрении плоскости все коэффициенты a_{11} , a_{22} , a_{33} , a_{12} , a_{23} , a_{13} равны нулю – незначимы (аналогично с уравнениями 3-й степени).

Коэффициенты получают оценку и проходят проверку на статистическую значимость при обработке массива экспериментальных данных, полученных от датчика расстояния. Для получения коэффициентов можно использовать как готовые электронные таблицы (MS Excel, Libre Office и т. п.), так и самостоятельно разработанные программные продукты, реализующие известные формулы математической статистики. Данные для статистической обработки поступают в компьютер с шины датчика расстояния. Они представляют собой массив данных, полученных путем сканирования исследуемой поверхности по спирали (см. рис. 2). Затем при необходимости осуществляется перерасчет для перевода данных в декартову систему координат. В зависимости от конкретной ситуации выбирается направление поляной оси и «привязывается» к оси абсцисс. После этого данные разбиваются на блоки, отвечающие ячейкам декартовой системы в зависимости от интересующего случая и, следовательно, соответствующего линейного размера ячейки $\Delta x_i \Delta y_j$.

Датчик расстояния имеет достаточно высокую частоту передачи экспериментальных данных, и поэтому их число пропорционально длине кривой, пересекающей ту или иную ячейку. Поскольку эти длины разные, то и количество экспериментальных пар данных для каждой ячейки различно. Согласно математической статистике это может привести к искажению итоговых оценок уравнения (1) и статистическим ошибкам первого и второго рода. Поэтому данные внутри каждой ячейки усредняются, и оставляется

только одно среднее значение $z_{cp} = (\sum z_k) / n$, соответствующее координатам середины данной ячейки. Это необходимо для того, чтобы у каждой ячейки был одинаковый «вес» при статистическом оценивании коэффициентов уравнения.

Оценка отклонения от заданных форм. В случае, когда априори известна форма металлической поверхности и необходимо проверить ее соответствие реальным данным, логично использовать критерий согласия Пирсона χ^2

$$\chi^2 = \sum \frac{(z_0 - z_t)^2}{z_t}, \quad (2)$$

где z_0 – фактическое значение; z_t – ожидаемые значения, рассчитываются по формуле (1) после оценки коэффициентов.

В случае, когда форма поверхности заранее не известна, составляется несколько моделей поверхности. Для них рассчитываются коэффициенты детерминации R^2 и сравниваются, поскольку чем ближе значение R^2 к единице, тем в большей мере уравнение отвечает статданным.

В случае плоской поверхности уравнение (1) принимает вид

$$2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0, \quad (3)$$

или общеизвестное

$$Ax + By + Cz + D = 0. \quad (4)$$

Тогда можно изучить отклонения от прямолинейности. Для этого следует оценить отклонения всех экспериментальных значений от рассчитанных по уравнению (4) и выбрать среди них максимальное:

$$d = \max \left\{ \left| Ax_i + By_i + Cz_i + D \right| \right. \\ \left. + D \left| (Ax + By) - \frac{1}{2} \right| \right\} = 0. \quad (5)$$

Аналогичный подход возможен для оценки прогиба, выпуклости и вогнутости.

Волнистость определяется как длина волны и высота неровностей. При выборе полярной оси вдоль или поперек волн и переходе к декартовой системе координат можно рассмотреть срезы развертки волн вдоль одной из осей. При этом можно проводить усреднения параметров волны при изменении координаты как вдоль перпенди-

кулярной оси, так и оси, направленной под задаваемым углом.

Коробоватость оценивается не только по величине наибольшего отклонения от плоскости (5), но и по площади прогнутой части. Она может быть определена построением контура-границы между плоской и прогнутой частью согласно условию

$$z_1 = z_2. \quad (6)$$

Скручивание выражается в миллиметрах или градусах на нормируемую длину. Если величина отклонения измеряется как в предыдущих случаях, то угол скручивания можно измерить по изменению угла нормали поверхности на нормируемую длину.

Результаты и их обсуждение

В случае гофрированной поверхности основные механизмы измерений остаются неизменными, однако производится поправка на периодичность и высоту гофр и т. п. В данном случае при относительно постоянных характеристиках складок на поверхности металла (высота, ширина и пр.) удобнее рассматривать аддитивную модель, в которой экспериментально полученные значения представлены как суммы:

$$z_i = T + S + E, \quad (7)$$

где T – компонента, формирующая общую форму поверхности (без гофр); S – периодически меняющаяся компонента, путем трансляции с некоторым периодом формирующая сами складки (гофры); E – случайная составляющая.

Если же характеристики складок начинают существенно меняться при перемещении по изучаемой поверхности, то правильнее использовать мультипликативную модель:

$$Y = TSE. \quad (8)$$

Статистическая обработка позволяет получить закономерность для каждой компоненты. Изучая на максимум тесноту связи $r(\tau)$ между последовательностями сдвинутых относительно друг друга на τ единиц данных $z_1, z_2, \dots, z_{n-\tau}$ и $z_{1+\tau}, z_{2+\tau}, \dots, z_n$, определяют значения τ , которые связаны с периодичностью следования складок-гофр. Это позволяет

разделить общий массив данных и по отдельности изучать как саму базовую поверхность, так и строение складок, а также их эволюцию по мере изменения координат вдоль какой либо оси.

Процесс построения модели поверхности состоит из выравнивания экспериментальных данных методом скользящей средней, расчета числовых характеристик T - и S -компонент и составления итоговой модели. После этого возможно рассчитать абсолютные отклонения модельных значений от экспериментальных. При наличии альтернативных моделей поверхности анализ абсолютных ошибок методами математической статистики позволяет сделать обоснованный выбор в пользу той или иной модели.

Наиболее подходящие варианты моделей прогиба гофрированного листа в поперечном сечении: эллиптический цилиндр

$$\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (9)$$

или гиперболический цилиндр

$$\frac{y^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1. \quad (10)$$

После статистической обработки данных прогиба гофрированного листа в поперечном сечении вверх получаем эмпирическую формулу гиперболического цилиндра с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,946$ (рис. 3):

$$y^2 - 38,39z^2 + 2 \cdot 2184,82z - 122\,501,02 = 0. \quad (11)$$

Предполагаемая форма поверхности прогиба гофрированного листа в поперечном сечении вниз будет иметь вид гиперболического параболоида, описываемого формулой

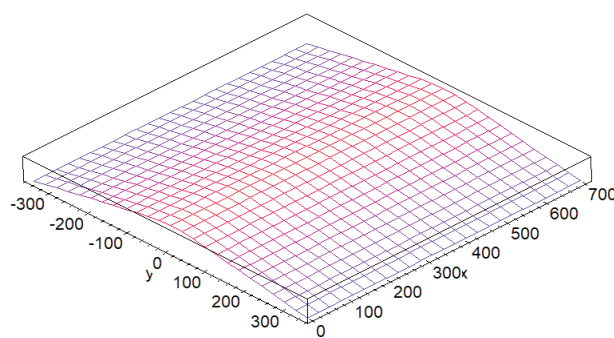
$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 2z. \quad (12)$$

Статистическая обработка экспериментальных данных подтверждает это предположение по эмпирической формуле с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,962$ (рис. 4):

$$0,0002041x^2 + 0,0008163y^2 + 9,8946621 = 2z. \quad (13)$$



а



б

Рис. 3. Прогиб гофрированного листа в поперечном сечении вверх:

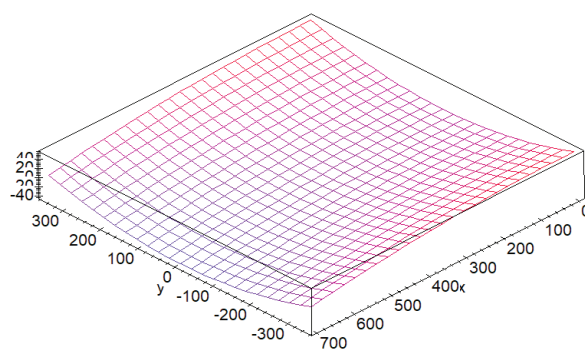
а – объект исследования; б – поверхность отклика

Fig. 3. Deflection of the corrugated sheet in the cross section upward:

а – the object of study; б – the response surface



а



б

Рис. 4. Прогиб гофрированного листа в поперечном сечении вниз:

а – объект исследования; б – поверхность отклика

Fig. 4. Deflection of the corrugated sheet in the cross section downward:

а – the object of study; б – the response surface

Полученные данные о профиле поверхности гофрированного листа по спирали Архимеда сформировывались в табличной форме в программе MS Excel. На рис. 5 представлена информация в виде развертки для первого витка спирали при прогибе гофрированного листа в поперечном сечении вниз.

Анализ полученных данных позволил установить величины прогиба гофрированного листа в поперечном сечении вверх и вниз, которые составили 11,8 и 13,8 мм соответственно. Величина гофр по высоте гофрированного листа С-9 составила 8,9 мм, что допустимо по требованиям контроля качества изделия (см. рис. 2, б).

Таким образом, в процессе исследования разработанного профилографа установлена воз-

можность измерить и определить отклонения формы поверхности изделий, используя метод лазерного спиралевидного сканирования.

Выводы

1. Разработан новый метод оценки трехмерного профиля путем реализации метода лазерного спиралевидного сканирования и проведено исследование профилографа для повышения точности и производительности измерения отклонений формы поверхности изделия.

2. В процессе исследования предложена методика статистической оценки уравнений для описания формы металлических поверхностей, основанная на использовании классических законов. Полученные в результате статистической

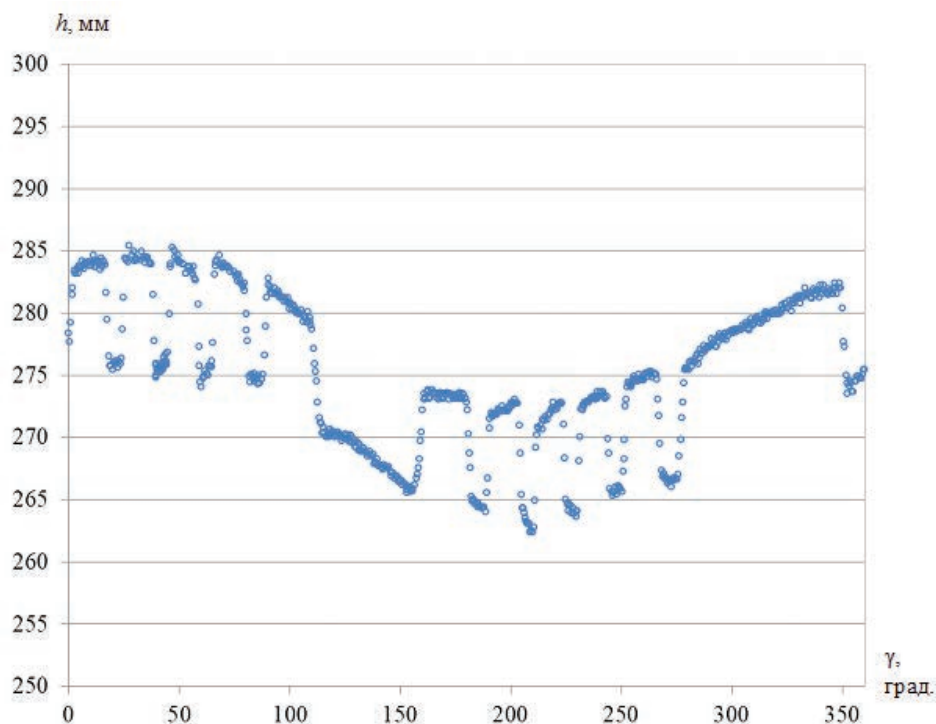


Рис. 5. Профиль поверхности гофрированного листа по первому витку спирали Архимеда

Fig. 5. Profile of the corrugated sheet surface along the first turn of the Archimedean spiral

обработки различные уравнения сравнивались между собой, и выбиралось уравнение с наибольшим коэффициентом детерминации в пределах 6 %.

3. Апробация работы автоматизированного устройства и предложенной методики проведения на гофрированных поверхностях металлопродукции. В случае гофрированной поверхности реализована оценка отклонений от плоскостности, установлена возможность определения отклонения форм поверхности изделий: волнистости, коробоватости, скручивания, выпуклости, вогнутости, кривизны и др.

4. Методом лазерного спиралевидного сканирования установлены величины прогиба гофрированного листа С-9 в поперечном сечении вверх и вниз, которые составили 11,8 и 13,8 мм соответственно, а размер гофр по высоте составил 8,9 мм.

Список литературы

1. Jeyapoovan T., Murugan M. Surface roughness classification using image processing // Measurement. – 2013. – Vol. 46, iss. 7. – P. 2065–2072. – DOI: 10.1016/j.measurement.2013.03.014.
2. Lushnikov N., Lushnikov P. Methods of assessment of accuracy of road surface roughness measurement with profilometer // Transportation Research Procedia. – 2017. – Vol. 20, pp. 425–429. – DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.069.
3. Non-contact surface roughness measurement of crankshaft journals using a super-continuum laser / V.V. Alexander, H. Deng, M.N. Islam, F.L. Terry // Conference on Lasers and Electro-Optics. – San Jose, 2010. – DOI: 10.1364/CLEO_APPS.2010.AFA3.
4. Babu R.A., Baldev R.A. Study of engineering surfaces using laser-scattering techniques // Sadhana. – 2003. – Vol. 28, pt. 3–4. – P. 739–761. – DOI: 10.1007/BF02706457.
5. Abidin F.Z., Hung J., Zahid M.N. Portable non-contact surface roughness measuring device // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 469. – P. 012074. – DOI: 10.1088/1757-899X/469/1/012074.
6. Kiran R., Amarendra H.J., Lingappa S. Vision system in quality control automation // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 144. – P. 03008. – DOI: 10.1051/mateconf/201814403008.
7. Shih F.Y. Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques. – Hoboken, NJ: Wiley, 2010. – 537 p. – ISBN 978-0-470-40461-4.

8. Lee B.Y., Tarng Y.S. Surface roughness inspection by computer vision in turning operations // *International Journal of Machine tools and Manufacture*. – 2001. – Vol. 41. – P. 1251–1263. – DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00023-2.

9. Spagnolo G.S., Cozzella L., Leccese F. Viability of an optoelectronic system for real time roughness // *Measurement*. – 2014. – Vol. 58. – P. 537–543.

10. Measurement of surface roughness of metal using binary speckle image analysis / E. Kayahana, H. Oktemb, F. Hacizadeb, H. Nasibovb // *Tribology International*. – 2010. – Vol. 43. – P. 307–311. – DOI: 10.1016/j.triboint.2009.06.010.

11. Wang T., Groche P. Sheet metal profiles with variable height: numerical analyses on flexible roller beading // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2019. – Vol. 3 (1). – P. 19. – DOI: 10.3390/jmmp3010019.

12. Stoudt M., Hubbard J.B. Analysis of deformation-induced surface morphologies in steel sheet // *Acta Materialia*. – 2005. – Vol. 53 (16). – P. 4293–4304. – DOI: 10.1016/j.actamat.2005.05.038.

13. Васильев С.А., Максимов И.И., Алексеев В.В. Методика и устройство для профилирования поверхности почвы и определения направления стока атмосферных осадков в полевых условиях // *Вестник АПК Ставрополя*. – 2015. – № 3. – С. 22–26.

14. Васильев С.А., Алексеев В.В., Речнов А.В. Экспресс-метод количественной оценки пожнивных остатков на поверхности почвы // *Аграрный научный журнал*. – 2015. – № 9. – С. 11–13.

15. Hockauf R., Grove T., Denkena B. Prediction of ground surfaces by using the actual tool topography // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2019. – Vol. 3 (2). – P. 40. – DOI: 10.3390/jmmp3020040.

16. Vasiliev S., Kirillov A., Afanasieva I. Method for controlling meliorative technologies on sloping cultivated lands using large scale profilometer // *Engineering for Rural Development. Proceedings*. – 2018. – Vol. 17. – P. 537–542.

17. Васильев С.А. Разработка метода и профилографа для оценки мелиоративных технологий на

склоновых агроландшафтах // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. – 2016. – № 3. – С. 220–226.

18. Васильев С.А. Обоснование конструктивно-технологических параметров профилографов для контроля мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. – 2016. – № 4. – С. 40–54.

19. Image-based inspection technique of a machined metal surface for an unmanned lapping process / D. Ravimal, H. Kim, D. Koh, J.H. Hong, S.K. Lee // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*. – 2019. – DOI: 10.1007/s40684-019-00181-7.

20. Application of laser profilometry to evaluation of the surface of the workpiece machined by abrasive water jet technology / G. Mital, J. Dobránský, J. Ružbarský, Š. Olejárová // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9. – P. 21–34. – DOI: 10.3390/app9102134.

21. Liu C.-Y., Tzu-Ping Y. Digital multi-step phase-shifting profilometry for three-dimensional ballscrew surface imaging // *Optics and Laser Technology*. – 2015. – Vol. 79. – P. 115–123. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.12.001.

22. Bračun D., Perdan B., Diaci J. Surface defect detection on power transmission belts using laser profilometry // *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. – 2011. – Vol. 57 (3). – P. 257–266. – DOI: 10.5545/sv-jme.2010.176.

23. Campana C., Moslehpour S. Non contact surface roughness measurement instrumentation // *American Society for Engineering Education*. – 2007. – AC 2007-2557. – P. 12.1107.

24. Development and verification of a one-step-model for the design of flexible roll formed parts / P. Groche, A. Zettler, S. Berner, G. Schneider // *International Journal of Material Forming*. – 2010. – Vol. 4 (4). – DOI: 10.1007/s12289-010-0998-3.

25. Schilling R.J. Fundamentals of robotics: analysis and control. – New Delhi: Prentice Hall, 2005. – ISBN 81-203-1047-0.

Конфликт интересов

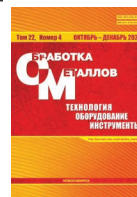
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Development and Research of a Profile Recorder for Measuring Deviations in the Shape of the Surface of Products by Laser Spiral Scanning

Sergey Vasiliev ^{a, *}, Viktor Alekseev ^b, Mikhail Vasiliev ^c, Alyona Fedorova ^d

I. N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-3346-7347>, vsa_21@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>, av77@list.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0001-7275-9751>, mishawasiliev@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-0257-9197>, e_a_a@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 12 September 2020

Revised: 19 September 2020

Accepted: 01 October 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Profile recorder

Deviation measurement

Surface shape

Spiral scanning

Laser method

Product

Corrugated profile

Funding

The results were obtained under the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists MD-1198.2020.8, agreement No. 075-15-2020-228.

ABSTRACT

Introduction. The paper deals with the development of a Profile recorder and measurement of deviations in the shape of the surface of products by laser spiral scanning. Analysis of the scientific literature shows that at present, the issues of monitoring and evaluating deviations in the shape of the surface of products require further research, since the use of well-known devices and methods does not always provide the necessary accuracy, manufacturability and sufficient information content of measurements. The research urgency is caused by the fact that existing methods of measuring form deviations of the surfaces does not allow to define a set of parameters with the required accuracy and submit it to two-dimensional and three-dimensional form. **Objective:** to develop a new method for evaluating a three-dimensional profile by implementing the method of laser spiral scanning and study the Profile recorder to improve the accuracy and productivity of measuring deviations in the shape of the product surface. **Methods.** The paper proposes a new method for evaluating a three-dimensional surface profile in order to directly determine the shape of the surface of products, to control the quality of the surface of products, regardless of its location. To implement the method, a Profile recorder of an original design is developed and investigated, which provides measurement of two parameters along the Archimedean spiral. Optimization of the design and the method of presenting information for measuring deviations in the shape of the surface of products are performed. **Results and discussion.** A method of statistical estimation of equations for describing the shape of metal surfaces based on the use of classical laws is proposed. In the case of a flat surface, deviations from flatness are evaluated: undulation, warping, twisting, convexity, concavity, curvature, etc. A Profile recorder is developed to implement the proposed method. The automated mechatronic device and the proposed method are tested on corrugated surfaces. Various equations obtained as a result of statistical processing were compared with each other, and the equation with the highest coefficient of determination is selected. The Profile recorder in Cartesian coordinates is studied in order to obtain reliable and accurate data for estimating shape deviations. The values of the deflection and the size of the corrugation along the height of the C-9 corrugated sheet are determined by laser spiral scanning.

For citation: Vasiliev S.A., Alekseev V.V., Vasiliev M.A., Fedorova A.A. Development and research of a profile recorder for measuring deviations in the shape of the surface of products by laser spiral scanning. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 71–81. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-71-81. (In Russian).

References

1. Jeyapoovan T., Murugan M. Surface roughness classification using image processing. *Measurement*, 2013, vol. 46, iss. 7, pp. 2065–2072. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.03.014.
2. Lushnikov N., Lushnikov P. Methods of assessment of accuracy of road surface roughness measurement with profilometer. *Transportation Research Procedia*, 2017, vol. 20, pp. 425–429. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.069.
3. Alexander V.V., Deng H., Islam M.N., Terry F.L. Non-contact surface roughness measurement of crankshaft journals using a super-continuum laser. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, San Jose, 2010. DOI: 10.1364/CLEO_APPS.2010.AFA3.
4. Babu R.A., Baldev R.A. Study of engineering surfaces using laser-scattering techniques. *Sadhana*, 2003, vol. 28, pt. 3–4, pp. 739–761. DOI: 10.1007/BF02706457.

* Corresponding author

Vasiliev Sergey A., D.Sc. (Engineering), Associate Professor,
 I.N. Ulianov Chuvash State University,
 15 Moskovsky Prospekt,
 428015, Cheboksary, Russia
 Tel.: +7 (927) 843-22-90, e-mail: vsa_21@mail.ru



5. Abidin F.Z., Hung J., Zahid M.N. Portable non-contact surface roughness measuring device. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 469, p. 012074. DOI: 10.1088/1757-899X/469/1/012074.
6. Kiran R., Amarendra H.J., Lingappa S. Vision system in quality control automation. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 144, p. 03008. DOI: 10.1051/mateconf/201814403008.
7. Shih F.Y. *Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques*. Hoboken, NJ, Wiley, 2010. 537 p. ISBN 978-0-470-40461-4.
8. Lee B.Y., Tarn Y.S. Surface roughness inspection by computer vision in turning operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, vol. 41, pp. 1251–1263. DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00023-2.
9. Spagnolo G.S., Cozzella L., Leccese F. Viability of an optoelectronic system for real time roughness. *Measurement*, 2014, vol. 58, pp. 537–543.
10. Kayahana E., Oktemb H., Hacizadeb F., Nasibovb H. Measurement of surface roughness of metal using binary speckle image analysis. *Tribology International*, 2010, vol. 43, pp. 307–311. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.06.010.
11. Wang T., Groche P. Sheet metal profiles with variable height: numerical analyses on flexible roller beading. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, vol. 3 (1), p. 19. DOI: 10.3390/jmmp3010019.
12. Stoudt M., Hubbard J.B. Analysis of deformation-induced surface morphologies in steel sheet. *Acta Materialia*, 2005, vol. 53 (16), pp. 4293–4304. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.05.038.
13. Vasiliev S.A., Maksimov I.I., Alekseev V.V. Metodika i ustroystvo dlya profilirovaniya poverkhnosti pochvy i opredeleniya napravleniya stoka atmosferykh osadkov v polevykh usloviyakh [Method and apparatus for profiling the surface of the soil and determine the direction of runoff to precipitation field]. *Vestnik APK Stavropol'ya = Agricultural Bulletin of Stavropol Region*, 2015, no 3, pp. 22–26.
14. Vasiliev S.A., Alekseev V.V., Rechnov A.V. Ekspress-metod kolichestvennoi otsenki pozhnivnykh ostatkov na poverkhnosti pochvy [Express-method of quantitative assessment of crop residues on the soil surface]. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal = Agrarian Scientific Journal*, 2015, no. 9, pp. 11–13.
15. Hockauf R., Grove T., Denkena B. Prediction of ground surfaces by using the actual tool topography. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, vol. 3 (2), p. 40. DOI: 10.3390/jmmp3020040.
16. Vasiliev S., Kirillov A., Afanasieva I. Method for controlling meliorative technologies on sloping cultivated lands using large scale profilometer. *Engineering for Rural Development. Proceedings*, 2018, vol. 17, pp. 537–542.
17. Vasiliev S.A. Razrabotka metoda i profilografa dlya otsenki meliorativnykh tekhnologii na sklonovykh agrolandshaftakh [Development of a method and the profilometer to control reclamation technologies slope agrolandscapes]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie = Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education*, 2016, no. 3, pp. 220–226.
18. Vasiliev S.A. Obosnovanie konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov profilografov dlya kontrolya meliorativnykh tekhnologii na sklonovykh agrolandshaftakh [Justification of structural and technological parameters of profilographs for reclamation technologies control on sloping cultivated lands]. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*, 2016, no. 4, pp. 40–54.
19. Ravimal D., Kim H., Koh D., Hong J.H., Lee S.K. Image-based inspection technique of a machined metal surface for an unmanned lapping process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*, 2019. DOI: 10.1007/s40684-019-00181-7.
20. Mital G., Dobránský J., Ružbarský J., Olejárová Š. Application of laser profilometry to evaluation of the surface of the workpiece machined by abrasive water jet technology. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, pp. 21–34. DOI: 10.3390/app9102134.
21. Liu C.-Y., Tzu-Ping Y. Digital multi-step phase-shifting profilometry for three-dimensional ballscrew surface imaging. *Optics and Laser Technology*, 2015, vol. 79, pp. 115–123. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.12.001.
22. Bračun D., Perdan B., Diaci J. Surface defect detection on power transmission belts using laser profilometry. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, vol. 57 (3), pp. 257–266. DOI: 10.5545/sv-jme.2010.176.
23. Campana C., Moslehpour S. Non contact surface roughness measurement instrumentation. *American Society for Engineering Education*, 2007, AC 2007-2557, p. 12.1107.
24. Groche P., Zettler A., Berner S., Schneider G. Development and verification of a one-step-model for the design of flexible roll formed parts. *International Journal of Material Forming*, 2010, vol. 4 (4). DOI: 10.1007/s12289-010-0998-3.
25. Schilling R.J. *Fundamentals of robotics, analysis and control*. New Delhi, Prentice Hall, 2005. ISBN 81-203-1047-0.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.