



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Оценка контактной и оптической профилометрии при контроле шероховатости криволинейных поверхностей деталей машин

Эрвин Умеров ^{1, 2, a, *}, Аркадий Соловьев ^{1, b}, Юрий Егоров ^{2, c}, Владимир Скакун ^{1, 2, d},
 Иван Соболевский ^{1, e} Руслан Джемалядинов ^{1, 2, f}

¹ Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, пер. Учебный, 8, г. Симферополь, 295015, Россия

² Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, просп. Академика Вернадского, 4, г. Симферополь, 295007, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0003-3477-2036>, Ervin777@yandex.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0001-8465-5554>, solovievarc@gmail.com;

^c <https://orcid.org/0000-0003-4990-9998>, yuriyegorov@cfuv.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0003-0656-7852>, vladimir.skakun.92@list.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0002-1338-9065>, sobolevskii-ivan@mail.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0003-3319-3542>, rus.dzhemalyadinov@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.892:531.717.8

История статьи:

Поступила: 30 мая 2026

Рецензирование: 13 июня 2026

Принята к печати: 29 июля 2026

Доступно онлайн: 15 сентября 2026

Ключевые слова:

Контактная профилометрия

Оптическая профилометрия

Шероховатость поверхности

Криволинейные поверхности

Коррекция погрешностей

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №24-12-20013).

АННОТАЦИЯ

Введение. Контроль шероховатости криволинейных поверхностей деталей машин – важнейшая метрологическая задача, определяющая эксплуатационные свойства изделий. Стандартизованный контактный метод вносит систематическую погрешность из-за прямолинейной траектории стилуса и пластического деформирования микронеровностей. Бесконтактные оптические методы исключают механическое воздействие, но их точность снижается на участках с большим локальным углом наклона из-за эффекта затенения. Отсутствие унифицированного подхода к сравнению результатов для криволинейных поверхностей ограничивает возможность ужесточения допусков. **Цель работы.** Комплексный сравнительный анализ контактной и оптической профилометрии при контроле шероховатости криволинейных поверхностей и разработка математических моделей коррекции систематических погрешностей. **Методы исследования.** Эксперименты выполнены на образцах из стали 45 и чугуна СЧ20 с радиусами кривизны 2...25 мм и параметром шероховатости $R_a = 0,1...12,5$ мкм. Контактные измерения проведены профилометром TIME TR200, оптические – на Veeco Wyko NT9100 в режимах вертикальной сканирующей интерферометрии и интерферометрии с фазовым сдвигом. Статистическая обработка включала t -критерий Стьюдента, корреляционный и регрессионный анализ. **Результаты работы.** Погрешность контактного метода при радиусе 2 мм достигает +27,6 %, при $R = 25$ мм – не более +1,4 %. Оптический метод устойчив к кривизне, но на участках с кривизной приводит к занижению R_a на 10...15 % из-за теневого эффекта. Для плоских поверхностей ($R_a = 0,8...6,3$ мкм) значимых различий между методами нет ($r = 0,98$). Разработаны математические модели для коррекции влияния температуры, загрязнений, ориентации неровностей, вибраций и контактного усилия. **Выводы.** Предложен алгоритм выбора метода контроля: при радиусе кривизны менее 10 мм рекомендуется оптический метод с геометрической коррекцией; контактный метод при радиусе менее 5 мм неприменим. Полученные модели могут встраиваться в программное обеспечение профилометров для автоматической компенсации погрешностей.

Для цитирования: Оценка контактной и оптической профилометрии при контроле шероховатости криволинейных поверхностей деталей машин / Э.Д. Умеров, А.Н. Соловьев, Ю.А. Егоров, В.В. Скакун, И.В. Соболевский, Р.М. Джемалядинов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 3. – С. 112–128. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.3-112-128.

Введение

Качество поверхности деталей машин является одним из ключевых факторов, определяющих их эксплуатационные характеристики, включая износостойкость, усталостную прочность, кон-

тактную жесткость, герметичность соединений и трибологические свойства. Параметр шероховатости оказывает влияние на процессы трения и изнашивания, формирование смазочной пленки, распределение контактных напряжений, а также долговечность ответственных элементов машин и механизмов. В связи с этим обеспечение достоверного контроля микрогеометрии поверхности является одной из важнейших задач современного машиностроения и метрологического обеспечения технологических процессов [1–3].

*Адрес для переписки

Умеров Эрвин Джаватович, к.т.н., доцент
 Крымский инженерно-педагогический университет
 им. Февзи Якубова,
 пер. Учебный, 8,
 295015, г. Симферополь, Россия
 Тел.: +7 978 832-72-92, e-mail: Ervin777@yandex.ru

В настоящее время наиболее широкое распространение получили контактные и оптические методы измерения шероховатости поверхности. Контактная профилометрия продолжает оставаться наиболее распространенным способом контроля благодаря высокой точности, простоте реализации и методической обеспеченности измерений [2, 3]. Вместе с тем наличие механического контакта измерительной головки профилометра с исследуемой поверхностью ограничивает применение данного метода при контроле мягких материалов, поверхностей с высокой степенью чистоты и деталей сложной геометрической формы. Дополнительные погрешности обусловлены радиусом скругления алмазной иглы стилуса, контактным усилием и невозможностью полного воспроизведения профиля микрорельефа [4, 5].

Развитие оптической профилометрии позволило расширить возможности исследования микрогеометрии поверхности. Современные оптические системы обеспечивают бесконтактное измерение величины шероховатости с высоким пространственным разрешением и построением трехмерной топографии измеряемой поверхности [4, 6]. Детали с низкими значениями шероховатости обработанной поверхности или с низкими значениями твердости, к которым можно отнести полимерные и композиционные материалы, чувствительны к внешнему контактному взаимодействию. В этой связи предпочтительнее использовать бесконтактные методы, исключая механическое воздействие на измеряемый объект и его деформацию.

Несмотря на преимущества бесконтактных методов, их эффективность зависит от отражающей способности исследуемой поверхности, локального угла наклона измеряемой поверхности, оптической плотности и особенностей формирования отраженного светового сигнала [8, 9].

Наиболее сложной задачей является исследование шероховатости криволинейных поверхностей. К ним можно отнести детали с цилиндрической и конической поверхностью, сферические элементы, а также поверхности, имеющие сложный пространственный профиль, применяемые в авиационной, автомобильной, медицинской и других отраслях промышленности.

Дополнительные геометрические искажения результатов измерения шероховатости возника-

ют с уменьшением радиуса кривизны. С позиции контактной профилометрии такие условия вызваны изменением особенностей взаимодействия стилуса с исследуемой поверхностью и отклонением траектории его перемещения относительно нормали. Оптические методы характеризуются чувствительностью к увеличению угла падения излучаемого светового потока с последующим снижением интенсивности отраженного сигнала [10–15].

Несмотря на большое количество исследований, посвященных сравнению контактной и оптической профилометрии, множество опубликованных работ посвящено влиянию отдельных факторов, определяющих точность измерений. В большинстве случаев анализируются особенности конструкции измерительной головки профилометра, параметры оптической системы, свойства материала или влияние отдельных условий проведения измерений [12–16]. При этом значительно меньше внимания уделяется комплексной оценке влияния кривизны поверхности, технологических условий изготовления детали и эксплуатационных факторов на сопоставимость результатов измерений, полученных различными методами контроля.

Дополнительную актуальность приобретает рассматриваемая проблема в условиях широкого применения высокопроизводительных технологий механической обработки и аддитивного производства, когда формируется сложная пространственная топография поверхности. Изменение режимов обработки приводит к формированию различной структуры микрорельефа, характеризующейся изменением высоты и формы микронеровностей, что непосредственно влияет на результаты измерений различными методами [16–22]. В этих условиях обеспечение сопоставимости метрологических данных становится необходимым для объективной оценки качества обработанной поверхности.

Анализ опубликованных исследований показывает, что в настоящее время отсутствует универсальный подход, позволяющий комплексно учитывать влияние радиуса кривизны поверхности, технологических факторов изготовления деталей и условий проведения измерений на результаты контактной и оптической профилометрии. Недостаточно изучены закономерности изменения погрешности измерений при умень-

шении радиуса кривизны поверхности, а также возможности математической коррекции систематических отклонений между различными методами контроля.

Целью настоящей работы является сравнительная оценка контактной и оптической профилометрии при контроле шероховатости криволинейных поверхностей деталей машин, количественная оценка факторов, влияющих на погрешность измерений, а также разработка математических моделей, обеспечивающих повышение сопоставимости результатов, полученных различными средствами измерения.

Задачи, решаемые для достижения поставленной цели:

1) количественная оценка систематических погрешностей описанных методов на образцах с различными классами шероховатости и радиусами кривизны.

2) математическое моделирование влияния технологических и эксплуатационных факторов (температура, загрязнение, ориентация неровностей, вибрации, контактное усилие) на результаты измерений.

3) разработка практических рекомендаций по выбору метода контроля параметра шероховатости.

Методика исследований

Экспериментальные исследования выполнялись с применением образцов из стали 45 и серого чугуна СЧ20 на операциях точения, шлифования и фрезерования, после чего проводилось сравнение с аттестованной мерой шероховатости. Для обеспечения статистической достоверности измерения проводили с трёхкратным повтором, используя не менее пяти образцов. Шероховатость поверхности контролировалась по параметру R_a при помощи контактного профилометра. Далее образцы были разделены на три группы: группа I – $R_a \leq 0,4$ мкм (тонкое шлифование и полирование), группа II – $R_a = 0,8 \dots 6,3$ мкм (чистовое точение и шлифование), группа III – $R_a > 6,3$ мкм (черновое точение и фрезерование). Такой подход согласуется с исследованиями, представленными в работе [5], что позволяет охватить широкий диапазон поверхностей. Дополнительно были изготовлены цилиндрические образцы (валы и втулки)

с радиусами $R = 2, 5, 10$ и 25 мм, наружная поверхность которых обрабатывалась чистовым точением до средней величины шероховатости $R_a \approx 1,5$ мкм.

Контактные измерения шероховатости выполнялись на профилометре TIME TR200, оснащённым алмазным стилусом с радиусом скругления 2 мкм и углом при вершине 60° . Усилие иглы стилуса поддерживалось на уровне $0,75$ мН и контролировалось электронной системой обратной связи. Вертикальное разрешение прибора составляет 4 нм, горизонтальный шаг сканирования – $0,5$ мкм, что обеспечивало корректную запись профиля. Базовая длина измерения l выбиралась в диапазоне от $0,8$ мм до $2,5$ мм в зависимости от класса точности, где общая длина трассы составляла пять базовых длин. Для исключения влияния низкочастотных составляющих (волнистости) применялась цифровая гауссова фильтрация с частотой среза, соответствующей выбранной базовой длине. Перед каждой группой измерений прибор калибровался по аттестованной мере шероховатости $R_a = 0,5$ мкм, где погрешность калибровки не превышала 2% . Во время измерений температура в лаборатории составляла $20 \dots 22^\circ\text{C}$, относительная влажность – $55 \dots 60\%$.

3D-топография измеряемых поверхностей проводилась на профилометре Veeco Wyko NT9100. Работа прибора основана на оптической интерферометрии. Для поверхностей с шероховатостью $R_a < 0,4$ мкм (группа I) использовался режим фазовой интерферометрии с объективом $50\times$ (рабочее расстояние $3,4$ мм). Для групп II и III применялся режим вертикальной сканирующей интерферометрии с объективами $20\times$ или $5\times$ (рабочее расстояние $6,7$ мм). Обработка полученных данных выполнялась в программном пакете Vision.

Дополнительно для наглядного подтверждения воздействия контактного метода на поверхность мягких материалов был выбран образец из органического стекла (плексигласа) с номинальной шероховатостью $R_a = 1,48$ мкм. Этот образец не использовался для количественного сравнения методов и не входил в основную программу испытаний, а служил лишь для визуализации царапин и деформаций, возникающих при прохождении иглы стилуса профилометра. Условия измерения были идентичны (профи-

лометр TIME TR200, усилие 0,75 мН, базовая длина 0,8 мм).

Для обеспечения сопоставимости результатов все измерения выполнялись при постоянных условиях окружающей среды. Перед проведением измерений проводили очистку измеряемых поверхностей от остатков смазочно-охлаждающей жидкости и продуктов механической обработки. Такой подход позволил минимизировать влияние температурного расширения материала, загрязнение поверхности и изменение оптических свойств исследуемых образцов на результаты измерений.

В качестве примера на рис. 1 представлен результат воздействия лазерной обработки на поверхность детали, демонстрирующий особенность полученных микродефектов и микронеровностей.

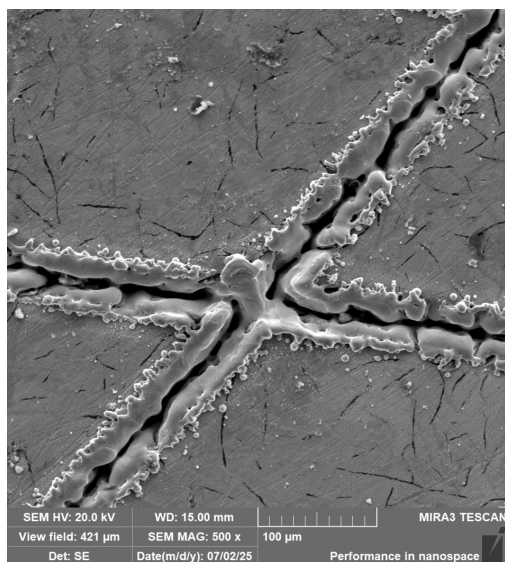


Рис. 1. Снимок участка профиля плоской чугуновой поверхности после лазерной обработки на сканирующем электронном микроскопе MIRA3 Tescan

Fig. 1. SEM image of a flat cast iron surface section after laser processing, obtained using a MIRA3 Tescan scanning electron microscope

На основании данных, представленных на рис. 1, можно сделать вывод, что оптическая профилометрия обеспечивает получение изображений с высокой степенью детализации и высоким пространственным разрешением.

Результаты оптической профилометрии значительно превосходят данные, полученные традиционными контактными методами контроля шероховатости обработанной поверхности.

При анализе криволинейных поверхностей для компенсации кривизны и угла наклона применяли метод наименьших квадратов, а остаточный профиль обрабатывали гауссовой фильтрацией аналогично контактными данным.

Особое внимание уделялось сопоставимости данных, полученных контактными и оптическими методами измерений. Для этого все образцы маркировались и проводилось измерение в одних и тех же местах. Измерение каждого образца выполнялось с трехкратным повтором, результаты усреднялись. За эталонное значение для криволинейных поверхностей принимали результаты измерений на сканирующем электронном микроскопе MIRA3 Tescan (погрешность не более 2 %). Сканирующая электронная микроскопия выбрана в качестве независимого референтного метода, поскольку она не входит в сравниваемую пару методов (контактная и оптическая профилометрия). Влияние кривизны на погрешность измерения оценивали при помощи относительной погрешности δ :

$$\delta = \frac{R_{a\text{изм}} - R_{a\text{этал}}}{R_{a\text{этал}}} 100 \%, \quad (1)$$

где $R_{a\text{изм}}$ – измеренное значение шероховатости, мкм; $R_{a\text{этал}}$ – эталонное значение шероховатости, мкм.

Статистическая обработка результатов включала в себя расчет средних значений, стандартных отклонений, доверительных интервалов с вероятностью 95 %, а также t -критерия Стьюдента для оценки значимости различий между средними величинами, полученными на разных участках и образцах. Линейную связь между значениями параметра шероховатости R_a , измеренными контактными и оптическими методами, оценивали при помощи коэффициента корреляции Пирсона. Для анализа зависимости погрешности от радиуса кривизны применяли нелинейное регрессионное моделирование, значимость регрессионных коэффициентов оценивали по F -критерию Фишера.

С целью повышения достоверности полученных результатов каждый определяемый параметр шероховатости исследуемой поверхности основывался на серии независимых измерений.

В процессе обработки данных, полученных в результате экспериментальных исследований,

осуществлялось вычисление средних значений исследуемых параметров, определялась величина абсолютных и относительных отклонений контактного и оптического метода контроля криволинейной поверхности, а также выполнялась оценка влияния радиуса кривизны поверхности на изменение погрешности измерений.

Такой подход позволяет качественно определить закономерности и исключить влияние случайных факторов на конечные выводы экспериментальных исследований.

Результаты и их обсуждение

Количественная оценка влияния радиуса кривизны. Результаты измерений параметра шероховатости R_a для цилиндрических образцов приведены в табл. 1.

Представленные в табл. 1 экспериментальные данные показали, что уменьшение радиуса кривизны приводит к увеличению расхождения результатов, полученных контактной и оптической профилометрией. Наибольшие значения отклонений зафиксированы на образцах с радиусами кривизны 2 и 5 мм, где контактный метод систематически завышал значения R_a по сравнению с эталоном. Оптический метод показал высокое совпадение с эталоном для исследуемых радиусов.

Для образцов из стали 45 и чугуна СЧ20 с радиусами кривизны 2 мм относительная погрешность контактного метода оказалась практически одинаковой и составила +27,6 %. Совпадение полученных результатов не является ошибкой переноса данных, а вызвано тем, что в условиях малых радиусов кривизны изучаемой поверхности ($R \leq 5$ мм) основной вклад в погрешность вносит геометрический фактор, связанный с отклонением траектории перемещения иглы стилуса относительно нормали к исследуемой поверхности.

Физико-механические свойства материала (твердость, модуль упругости) исследуемых образцов не оказали влияния на погрешность измерения и составили 1...2 %. Такое расхождение сопоставимо со случайной величиной измерений.

С уменьшением радиуса кривизны возрастает вероятность неполного воспроизведения узких впадин и локального сглаживания вершин профиля. Таким образом, кривизна поверхности выступает как самостоятельный источник погрешности, не устранимый повышением разрешающей способности измерительной системы.

Регрессионный анализ экспериментальных данных позволил выявить зависимость между величиной относительной погрешности контактного метода и радиусом кривизны ($R^2 = 0,97$).

Таблица 1

Table 1

Экспериментальные данные измерения параметра шероховатости R_a с учетом влияния радиуса кривизны

Experimental data on R_a roughness measurement considering the effect of the Radius of curvature

Радиус кривизны R , мм / Radius of curvature R (mm)	Обрабатываемый материал / Material	Эталонное значение (MIRA3) R_a , мкм / Reference value (MIRA3) R_a (μm)	Контактный метод измерения, R_a , мкм / Contact method, R_a (μm)	Оптический метод измерения, R_a , мкм / Optical method, R_a (μm)	Погрешность контактного метода, % / Contact method error (%)
2	Сталь 45 / 0.45% C steel	1,45 / 1.45	1,85 / 1.85	1,45 / 1.45	+27,6 / +27.6
5	Сталь 45 / 0.45% C steel	1,48 / 1.48	1,65 / 1.65	1,48 / 1.48	+11,5 / +11.5
10	Сталь 45 / 0.45% C steel	1,46 / 1.46	1,52 / 1.52	1,46 / 1.46	+4,1 / +4.1
25	Сталь 45 / 0.45% C steel	1,45 / 1.45	1,47 / 1.47	1,45 / 1.45	+1,4 / +1.4
2	Чугун / Cast iron	0,98 / 0.98	1,25 / 1.25	0,98 / 0.98	+27,6 / +27.6

В процессе исследований криволинейных поверхностей с радиусами менее 5 мм погрешность превышала 10 % и достигала 27,6 % при $R = 2$ мм.

С увеличением радиуса кривизны исследуемой поверхности величина систематической погрешности уменьшалась, подтверждая снижение влияния факторов, связанных с геометрией образца, на процесс измерения. Несмотря на это, при анализе полученных результатов выявлено, что оптический метод имеет ограничения при контроле поверхностей сложной формы.

На участках со значительными локальными углами наклона снижается интенсивность отражённого сигнала, что приводит к неполному восстановлению топографии поверхности. Этот эффект обусловлен физикой формирования оптического изображения.

На рис. 2 представлен график зависимости относительной погрешности измерений контактным методом от радиуса кривизны для стали 45.

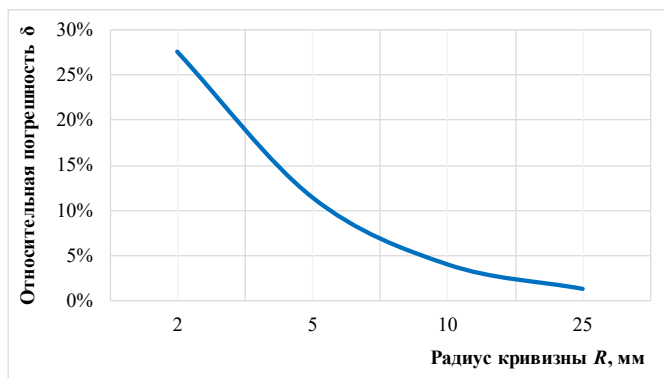


Рис. 2. График зависимости относительной погрешности контактного метода от радиуса кривизны

Fig. 2. Dependence of the relative error of the contact method on the Radius of curvature

Результаты экспериментальных исследований, представленных на рис. 2, подтверждают закономерность, связанную с уменьшением погрешности контактной профилометрии при увеличении кривизны исследуемой поверхности. Этот факт указывает на наличие некой критической величины радиуса, при превышении которой параметры геометрии поверхности начинают оказывать воздействие, сопоставимое с инструментальной погрешностью, присущей профилометру.

Согласно результатам исследований, представленным в работе [9], оптические профилометры, использующие метод отражения света, оказываются неэффективными при работе с поверхностями, имеющими существенную кривизну. Это приводит к возникновению так называемых слепых зон, что, в свою очередь, вызывает систематическое занижение величины шероховатости R_a .

Однако снижение погрешности контактного метода не свидетельствует об отсутствии ограничений оптической профилометрии. Основным источником ошибок в контактном методе служит геометрия взаимодействия стилуса с поверхностью, тогда как для оптических методов определяющими факторами являются распространение и отражение света. Следовательно, для сравнения методов необходимо учитывать как количественные значения погрешности, так и характер воспроизведения измеренного профиля.

На рис. 3 представлен пример искажения, получаемого при измерении поверхности с небольшой кривизной.

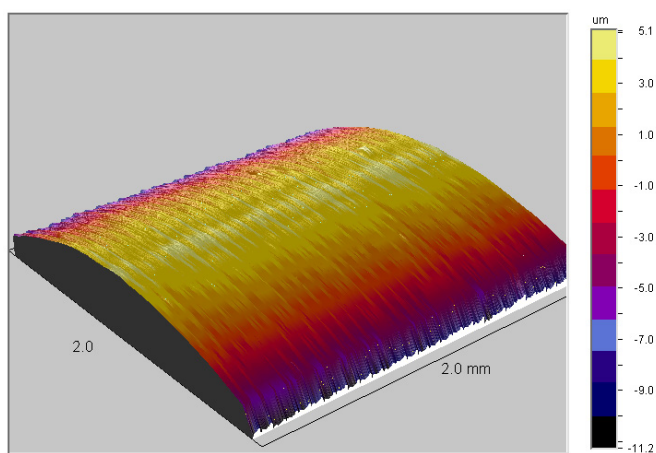


Рис. 3. Измерение сегмента круглой заготовки из чугуна на профилометре Veeco Wyko NT9100

Fig. 3. Measurement of a round cast iron workpiece segment using a Veeco Wyko NT9100 profilometer

Как показано на рис. 3, искажения с наибольшими значениями проявляются в периферийной зоне поверхности цилиндрической формы, когда локальный угол наклона возрастает по отношению к оптической оси. В таких местах происходит снижение интенсивности отраженного излучения, а также появляются участки, характеризующиеся неполным восстановлением профиля. В свою очередь, центральная часть исследуемой поверхности имеет наиболее точные измерения.

дуемой поверхности расположена практически перпендикулярно относительно направления измерения и воспроизводится с высокой точностью.

Полученные данные показывают, что ограничение возможностей оптической профилометрии в большей степени имеет иную физическую природу относительно ограничений контактного метода. Если в первом методе распределение светового потока является определяющим фактором, то второй метод характеризуется кинематикой движения измерительной иглы стилуса. Приведенные данные показывают, что выбор метода контроля шероховатости поверхностей должен обосновываться с учетом не только требований к точности измерения, но также и геометрических параметров исследуемой поверхности.

Проведенный анализ, связанный с определением влияния кривизны исследуемой поверхности на точность измерения, показал, что при возникновении систематической погрешности определяющим является геометрический фактор. В свою очередь, на результаты измерений в условиях производства влияют и другие параметры, которые включают в себя способ механической обработки поверхности, величину шероховатости и физико-механические свойства материала.

В связи с этим на следующем этапе исследования проведено сравнение контактной и опти-

ческой профилометрии для различных способов формирования микрорельефа и диапазонов шероховатости.

Сравнение методов измерений. Представленные выше результаты показали, что ни один из рассматриваемых методов измерения не обладает универсальными преимуществами для всех условий контроля. Точность определения параметров шероховатости определяется не только принципом действия измерительной системы, но и совокупностью геометрических, технологических и физических факторов. Поэтому объективная оценка возможностей контактной и оптической профилометрии требует комплексного анализа полученных экспериментальных данных с учетом условий формирования исследуемой поверхности.

Результаты измерений плоских и криволинейных образцов с различными классами шероховатости приведены в табл. 2.

Анализ экспериментальных данных показал, что величина расхождения между контактным и оптическим методами определяется не только абсолютным значением параметра R_a , но и характером формирования микрорельефа. При одинаковых значениях шероховатости поверхности, полученные различными технологическими методами, могут иметь различную пространственную структуру неровностей. Это приводит к изменению условий взаимодействия измерительной иглы стилуса с поверхностью

Таблица 2

Table 2

Сравнение контактного и оптического методов измерения шероховатости

Comparison of contact and optical roughness measurement methods

Класс шероховатости / Roughness class	Способ обработки / Machining method	Контактный метод R_a , мкм / Contact method R_a (μm)	Оптический метод R_a , мкм / Optical method R_a (μm)	Расхождение, % / Deviation (%)
$R_a < 0,4$ мкм / $R_a < 0.4 \mu\text{m}$	Тонкое шлифование / Fine grinding	0,12 / 0.12	0,11 / 0.11	+9,1 / +9.1
$R_a = 0,8 \dots 6,3$ мкм / $R_a = 0.8 \dots 6.3 \mu\text{m}$	Шлифование / Grinding	0,85 / 0.85	0,82 / 0.82	+3,7 / +3.7
$R_a = 0,8 \dots 6,3$ мкм / $R_a = 0.8 \dots 6.3 \mu\text{m}$	Тонкое точение / Fine turning	1,20 / 1.20	1,25 / 1.25	-4,0 / -4.0
$R_a > 6,3$ мкм / $R_a > 6.3 \mu\text{m}$	Фрезерование / Milling	8,2 / 8.2	7,9 / 7.9	+3,8 / +3.8
$R_a > 6,3$ мкм / $R_a > 6.3 \mu\text{m}$	Точение / Turning	12,5 / 12.5	11,8 / 11.8	+5,9 / +5.9

и связано с особенностями регистрации отраженного светового сигнала при использовании оптической профилометрии.

Несмотря на то что параметр R_a является наиболее распространенной количественной характеристикой шероховатости поверхности, он не отражает пространственную организацию микрорельефа. Поверхности, имеющие одинаковые значения R_a , могут существенно различаться по форме неровностей, шагу их расположения, направленности следов обработки и распределению локальных высот. Именно поэтому различия между контактной и оптической профилометрией обусловлены не только величиной шероховатости, но и особенностями формирования поверхности после конкретного способа механической обработки.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что один из факторов, влияющих на метрологическую неопределенность измерений, связан с технологическим способом формирования исследуемой поверхности.

В процессе перехода от регулярного микрорельефа, характерного для процесса точения, к структуре с более хаотичным микрорельефом, получаемым после процесса фрезерования или шлифования, происходит изменение условия взаимодействия системы измерения с исследуемой поверхностью. Это приводит к изменению чувствительности контактного и оптического методов даже при условии близких значений параметра шероховатости R_a .

Результаты экспериментальных исследований по определению шероховатости обработанной поверхности с использованием оптического метода представлены на рис. 4. Полученная заготовка выполнена из чугуна марки СЧ 20 после процесса чистового точения.

В процессе проведения статистического анализа плоской поверхности с шероховатостью $R_a = 0,8 \dots 6,3$ мкм не выявлено весо-мых различий между используемыми методами измерения. Коэффициент корреляции Пирсона составил $r = 0,98$, что указывает на высокую сходимость полученных экспериментальных данных.

Статистический анализ полученных данных, оценка сходимости используемых методов. С целью объективной оценки и определения достоверности различий средних значений пара-

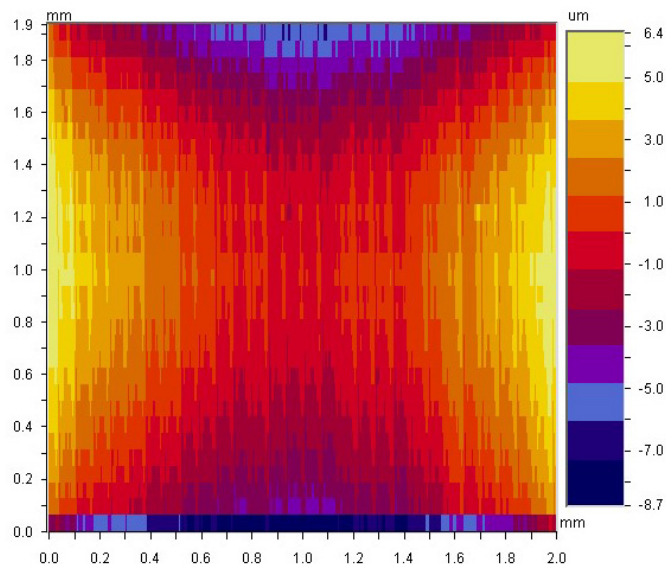


Рис. 4. Фотография измеренной шероховатости заготовки из чугуна после чистового точения на профилометре Veeco Wyko NT9100

Fig. 4. Measured roughness image of a cast iron workpiece after finish turning, obtained using a Veeco Wyko NT9100 profilometer

метра шероховатости исследуемой поверхности был использован t -критерий Стьюдента. Исходя из класса шероховатости можно наблюдать следующие статистические закономерности.

– Параметр $R_a < 0,4$ мкм относится к высокому классу чистоты и t -критерий Стьюдента составил $t = 2,89$ ($p < 0,05$). Эти значения указывают на присутствие статистически значимого различия. Коэффициент корреляции Пирсона составил $r = 0,94$. Стандартное отклонение при контактном методе составило $\sigma = 0,028$, что выше, чем при оптическом методе ($\sigma = 0,012$). Это подтверждает меньшую воспроизводимость при использовании контактного метода на гладких поверхностях.

– Значения шероховатости $R_a = 0,8 \dots 6,3$ мкм соответствуют среднему классу чистоты, при котором t -критерий Стьюдента равен $t = 1,23$ ($p > 0,05$). Это свидетельствует об отсутствии значимых различий. Коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,98$. Для контактного метода исследования коэффициент вариации составил 8,2 %, а для оптического – 4,1 %, что указывает на его лучшую стабильность по сравнению с контактным методом.

– Значения $R_a > 6,3$ мкм соответствуют грубым поверхностям, при которых t -критерий Стьюдента составил $t = 3,45$ ($p < 0,01$), а коэффи-

коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,96$. Наблюдается тенденция, связанная с завышением значений, полученных контактным методом, на 4...8 %. Это связано с инерционными характеристиками измерительной системы, а также с эффектом сглаживания крупных поверхностей.

Измерение шероховатости контактным методом показало увеличение значений на 7...11 % для поверхностей с высоким классом чистоты вследствие упругой деформации микронеровностей [3, 8]. Однако на более пластичных материалах наблюдается повреждение поверхности в виде царапин от прохождения иглы стилуса (рис. 5).

Рис. 5 наглядно демонстрирует, что контактный метод измерения приводит к повреждению очень гладких поверхностей (особенно после тонкого шлифования) и, следовательно, к увеличению значений шероховатости. В данном случае предпочтительным является оптический метод измерения.

На рис. 6 представлены результаты профиля плоской поверхности после лазерной обработки.

На рис. 6 продемонстрирована возможность визуализации распределения в пространстве микронеровностей, измерение которых осуществляется с применением оптического метода.

Отличительной чертой различных методов является способ воспроизведения исследуемого профиля. В процессе использования контактного метода взаимодействующий с исследуемой поверхностью щуп сглаживает острые пики, а также накладывает различные низкочастотные помехи при большой длине измеряемого участка [16]. Это ограничивает применение данного метода для выполнения детального анализа.

При использовании оптического метода появляется возможность проводить анализ поверхности с выделением пространственной гармоник, которая связана, например, с величиной подачи режущего инструмента в процессе фрезерования [8]. Эта характеристика также актуальна при исследовании поверхностей с направленным следом, формируемым после соответствующей обработки, и с использованием лазерных аддитивных технологий [5, 10, 19, 20].

Результаты проведенных методом оптической профилометрии измерений шага канавок после чистовой обработки торцевой фрезой представлены на рис. 7.

Рис. 7 демонстрирует возможности оптической профилометрии для пространственного анализа структур поверхности детали, что является основным преимуществом оптического метода перед контактным.

Математическое моделирование погрешностей. На основе экспериментальных данных и с учетом зависимостей, представленных в работах [1, 9, 20], предлагаются математические модели для коррекции параметра шероховатости от влияния следующих факторов.

1. Тепловое расширение детали приводит к относительному изменению параметра шероховатости R_a . Следовательно, необходимо ввести температурную коррекцию параметра шероховатости, определяемую по формуле [7]:

$$R_a^{\text{корр}} = \frac{R_a^{\text{изм}}}{[1 + \alpha(T - T_0)]}, \quad (2)$$

где $R_a^{\text{корр}}$ – скорректированное значение шероховатости, мкм; $R_a^{\text{изм}}$ – измеренное значение



Рис. 5. Следы от прохождения иглы стилуса на эталонном образце из оргстекла с шероховатостью $R_a = 1,48$ мкм

Fig. 5. Stylus needle traces on a plexiglass reference specimen with roughness $R_a = 1.48$ μm

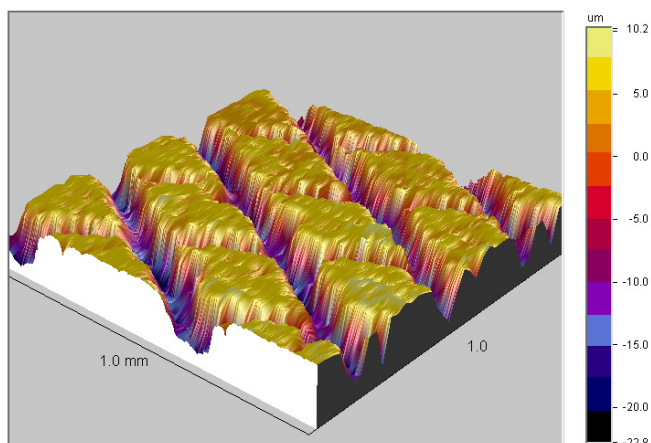


Рис. 6. Профиль чугунной плоской поверхности, полученной после лазерной обработки и измеренной на профилометре Veeco Wyko NT9100

Fig. 6. Profile of a flat cast iron surface obtained after laser processing and measured using a Veeco Wyko NT9100 profilometer

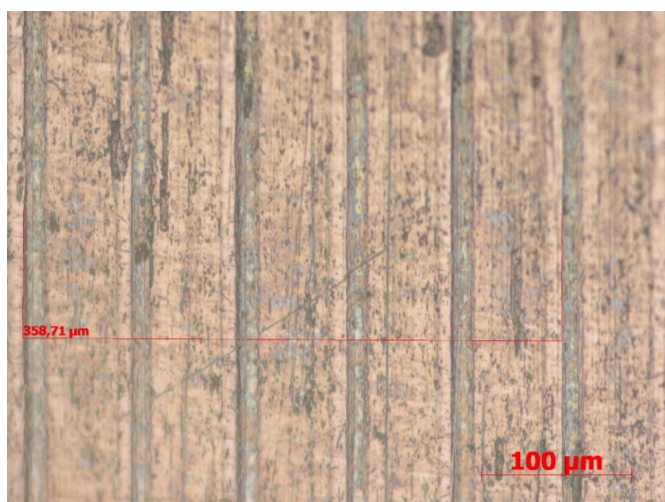


Рис. 7. Измерение шага канавок после чистового торцевого фрезерования детали из стали 45

Fig. 7. Measurement of groove pitch after finish face milling of a 0.45% C steel part

шероховатости, мкм; α – коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C}$; T – температура детали в момент измерения, $^\circ\text{C}$; T_0 – эталонная температура (20°C).

Далее определяется относительная температурная погрешность измерительного прибора $K_{\text{т}}$, полученная эмпирическим путем для стали 45 в диапазоне температур $20...45^\circ\text{C}$:

$$K_{\text{т}} = -0,0002(T_{\text{т}} - T_0)^2 + 0,0015(T_{\text{т}} - T_0), \quad (3)$$

где $T_{\text{т}}$ – температура прибора в момент измерения, $^\circ\text{C}$; T_0 – эталонная температура (20°C).

Формула (3) учитывает температурное изменение измерительной системы и позволяет дополнительно учитывать погрешность измерения.

2. Относительная погрешность в зависимости от слоя загрязнения при измерении шероховатости описывается экспоненциальной зависимостью [21]:

$$\delta_{\text{загр}} = A(1 - e^{(-kh)}), \quad (4)$$

где $\delta_{\text{загр}}$ – относительная погрешность измерения с учетом загрязненного слоя, %; A – максимальная погрешность (40 % для эмульсии, 20 % для масла), %; k – эмпирический коэффициент ($0,8...1,2$), $1/\text{мкм}$; h – толщина загрязненного слоя, мкм.

Определим коэффициент, учитывающий влияние загрязненного слоя:

$$K_{\text{загр}} = \frac{1}{1 + \delta_{\text{загр}} / 100}. \quad (5)$$

3. Влияние ориентации неровностей на поверхности детали (угла θ между траекторией щупа и следами обработки) на относительную погрешность параметра шероховатости:

$$\delta_{\text{ор}} = \Delta_{\text{max}}(1 - \cos \theta), \quad (6)$$

где $\delta_{\text{ор}}$ – относительная погрешность измерения от ориентации неровностей, %; θ – угол между направлением движения щупа и неровностей, град; $\Delta_{\text{max}} = -0,45$ для процесса точения, $-0,35$ для шлифования.

Далее определим поправочный коэффициент $K_{\text{ор}}$, учитывающий ориентацию неровностей:

$$K_{\text{ор}} = \frac{1}{1 + \delta_{\text{ор}}}. \quad (7)$$

4. Влияние вибраций на изменение параметра шероховатости R_a определим следующей зависимостью [22]:

$$K_{\text{вибр}} = \frac{1}{1 + \gamma A_{\text{в}} f_{\text{в}}}, \quad (8)$$

где γ – коэффициент чувствительности ($0,01...0,05 \text{ мкм}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$); $A_{\text{в}}$ – амплитуда колебаний, мкм; $f_{\text{в}}$ – частота колебаний, Гц.

5. Влияние механических свойств измеряемого материала. Определим оптимальное усилие щупа $F_{\text{опт}}$ для снижения пластической деформации:

$$F_{\text{опт}} = \frac{kH^2 R^2}{E}, \quad (9)$$

где $F_{\text{опт}}$ – оптимальное усилие щупа, мН; H – твердость материала по Виккерсу, МПа; E – модуль упругости материала, ГПа; k – эмпирический коэффициент (8...12); R – радиус иглы щупа, мм.

Далее определим относительную погрешность от деформации $\delta_{\text{деф}}$ по формуле

$$\delta_{\text{деф}} = \frac{Fk_{\text{пл}}}{HR_a^{\text{изм}}}, \quad (10)$$

где F – усилие, создаваемое щупом, мН; $k_{\text{пл}}$ – коэффициент, учитывающий пластическую деформацию материала; H – твердость материала по Виккерсу, МПа; $R_a^{\text{изм}}$ – измеренное значение шероховатости, мкм.

Найдем коэффициент деформации от усилия щупа $K_{\text{деф}}$, учитывающий пластическую деформацию микронеровностей из-за контактного усилия:

$$K_{\text{деф}} = \frac{1}{1 + \delta_{\text{деф}}}. \quad (11)$$

Учитывая вышеприведенные формулы, получим зависимость для вычисления скорректированного значения параметра шероховатости:

$$R_a^{\text{ит}} = R_a^{\text{корр}}(1 \pm K_{\text{п}}) \times \\ \times K_{\text{загр}} K_{\text{ор}} K_{\text{виб}} K_{\text{деф}}. \quad (12)$$

Полученные математические зависимости учитывают наиболее значимые факторы, которые определяют систематическую составляющую погрешности измерений. Применение на практике подобных моделей осуществимо при условии физической интерпретации коэффициентов, а также экспериментального подтверждения их адекватности.

Зависимости, полученные в результате исследования, могут быть использованы при разработке программного обеспечения для измерительных систем, предназначенных для автоматической коррекции параметров при контроле деталей. Такой подход увеличивает достоверность исследования параметров шероховатости обработанной поверхности без необходимости в модернизации стандартного измерительного оборудования, а также расширяет практические возможности применения разработанной модели в промышленных условиях.

Обоснование эмпирических коэффициентов и верификация моделей. Для исключения субъективности и подтверждения физической обоснованности полученных эмпирическим путем коэффициентов была выполнена предварительная их калибровка на основе данных, полученных в процессе исследований, с использованием многофакторного планирования эксперимента.

Каждый эмпирический коэффициент калибровался в отдельных многофакторных экспериментах, в процессе которых варьировали один исследуемый параметр, а остальные условия оставались фиксированными. При этом сам коэффициент определяли, выполняя не менее трех серий замеров и с пятикратной повторяемостью. Такой подход обеспечил статистическую надежность полученных результатов. Обоснование ключевых коэффициентов применяемой модели приведено ниже.

1. Представленные в модели (6) данные показывают, что для процесса точения коэффициент ориентации составил $\Delta_{\text{max}} = -0,45$, а для процесса шлифования $\Delta_{\text{max}} = -0,35$. Эти значения получены методом наименьших квадратов на основе регрессионного анализа экспериментальных зависимостей относительной погрешности $\delta_{\text{ор}}$ от угла между направлением перемещения щупа и следами механической обработки θ (диапазон углов $0^\circ \dots 90^\circ$).

Например, для процесса токарной обработки с углом измерения $\theta = 0^\circ$ при котором перемещение щупа осуществлялось вдоль следов обработки, относительная погрешность измерения составила $-2 \dots -3 \%$. При значениях угла $\theta = 90^\circ$ относительная погрешность достигала $-42 \dots -45 \%$. Аппроксимация полученных данных с использованием метода наименьших квадратов позволила найти значение $\Delta_{\text{max}} = -0,45$, где коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,94$. Аналогично для шлифования было получено $\Delta_{\text{max}} = -0,35$ ($R^2 = 0,91$). Экспериментальная выборка включала в себя 15 измерений при каждом угле измерения для трех различных материалов.

2. Коэффициент влияния усилия щупа $k = 8 \dots 12$ в формуле (9). Этот коэффициент выведен из решения контактной задачи Герца для пары «алмазный стилус – сталь (чугун)» и учитывает эффективную площадь контакта при радиусе скругления иглы стилуса 2 мкм. Калибровка про-

водилась по серии экспериментов с изменением усилия от 0,5 до 1,5 мН на образцах с различной твердостью (сталь 45, алюминий Д16Т, латунь ЛС59) для подтверждения его универсальности.

3. Коэффициенты модели загрязнения (A , k) в формуле (4). Значения $A = 40$ % (для эмульсии смазочно-охлаждающей жидкости) и $A = 20$ % (для масла) получены в результате аппроксимации данных из табл. 1. Эти величины коррелируют с толщиной слоя загрязнения h , измеренной методом оптической микроскопии на поперечных шлифах.

Анализ коэффициентов модели показывает, что система обладает наибольшей чувствительностью к изменению радиуса кривизны поверхности. Даже незначительное уменьшение радиуса приводит к более существенному росту погрешности по сравнению с изменением остальных факторов. Влияние температуры, загрязнения поверхности и износа стилуса носит менее выраженный характер и проявляется преимущественно в виде дополнительной систематической составляющей. Полученный результат подтверждает, что именно геометрические особенности контролируемой поверхности служат определяющим фактором при выборе метода измерения шероховатости.

Используемые в математических моделях коэффициенты найдены эмпирическим путем в результате проведения экспериментальных исследований. Полученные зависимости можно рассматривать как математические модели, ко-

торые отражают физические закономерности влияния на точность измерения шероховатости таких факторов, как геометрия исследуемой поверхности, а также технологические и эксплуатационные особенности проведения исследований.

Проверка адекватности полученных математических моделей (2)–(12) осуществлялась путем их оценки с использованием независимой контрольной выборки образцов, выполненных из стали 45 после чистовой токарной обработки, радиус кривизны которых составлял $R = 2$ мм. В табл. 3 представлены результаты верификации.

Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что комплексная модель коррекции существенно снижает систематическую погрешность контактных измерений. Для образцов с радиусом кривизны $R = 2$ мм расхождение с референтными значениями уменьшается с 25...27 % до значений менее 3 %

Для определения эффективности полученной модели с учетом всего диапазона условий дополнительно был осуществлен анализ результатов верификации с использованием 15 образцов, содержащих различный радиус кривизны (2, 5, 10, 25 мм), а также тремя классами шероховатости, с дальнейшим определением снижения погрешности δ для каждого образца.

С учетом всей выборки среднее значение данного показателя составило $6,2 \pm 1,1$ %. Это обстоятельство легло в основу утверждения, подтверждающего снижение систематической

Таблица 3

Table 3

Результаты верификации корректирующей модели на контрольной выборке

Verification results of the correction model on a test sample

Метод измерения / Measurement method	Измеренное значение R_a , мкм / Measured R_a (μm)	Скорректированное значение R_a , мкм / Corrected R_a (μm)	Референтный метод (MIRA3), мкм / Reference method (MIRA3) (μm)	Расхождение (до корр. / после корр.), % / Deviation (before / after correction) (%)
Контактный (TIME TR200) / Contact (TIME TR200)	1,82 / 1.82	1,49 / 1.49	1,45 / 1.45	+25,0 / +2,7 / +25.0 / +2.7
Оптический (Veeco Wyko NT9100) / Optical (Veeco Wyko NT9100)	1,85 / 1.85	1,46 / 1.46	1,45 / 1.45	+27,6 / +0,7 / +27.6 / +0.7

погрешности на 5...7 %. Доверительный интервал получен путем расчета с вероятностью 95 % с применением t -критерия Стьюдента.

Нужно отметить тот факт, что достигнутое расхождение измеренных и скорректированных значений дает основание гарантировать корректность применяемой математической модели. При этом наибольший эффект коррекции можно наблюдать с использованием образцов, содержащих малый радиус кривизны, при котором геометрическая составляющая погрешности измерений является основной.

Для поверхностей с большим радиусом кривизны влияние корректирующих коэффициентов уменьшалось, что соответствует выявленным ранее экспериментальным закономерностям. Полученные результаты свидетельствуют о возможности практического применения разработанной модели при метрологическом сопровождении контроля деталей сложной геометрической формы.

Полученные результаты также показывают, что использование комплексной модели позволяет перейти от качественной оценки причин воз-

никновения погрешности к их количественному описанию. Это обеспечивает возможность прогнозирования ожидаемой величины погрешности еще до проведения измерений и выбора наиболее рационального метода контроля в зависимости от геометрии исследуемой поверхности.

Проведенные исследования показали, что универсального метода измерения шероховатости, одинаково эффективного для всех условий контроля, не существует. Выбор измерительной системы должен осуществляться с учетом геометрии детали, диапазона шероховатости, свойств материала и требуемой точности измерений. Именно поэтому заключительным этапом работы стала разработка практических рекомендаций по выбору метода контроля для различных производственных условий.

Алгоритм выбора метода контроля. На основе полученных результатов сформулированы практические рекомендации, представленные в табл. 4.

Полученные результаты могут быть объяснены особенностями контактного взаимодействия измерительного стилуса с поверхностью

Таблица 4

Table 4

Рекомендации по выбору метода контроля шероховатости
Recommendations for choosing a roughness measurement method

Класс шероховатости / тип поверхности / Roughness class / surface type	Рекомендуемый метод / Recommended method	Примечание / Note
$R_a < 0,4$ мкм. Мягкие/хрупкие материалы / $R_a < 0.4$ μm . Soft/brittle materials	Оптический / Optical	Исключает повреждение поверхности; давление стилуса соизмеримо с твердостью материала / Eliminates surface damage; stylus pressure is comparable to material hardness
$R_a = 0,8...6,3$ мкм. Плоские поверхности / $R_a = 0.8-6.3$ μm . Flat surfaces	Контактный и оптический / Contact and optical	Для детального анализа профиля предпочтителен оптический метод / Optical method is preferred for detailed profile analysis
Криволинейные поверхности ($R < 10$ мм) / Curved surfaces ($R < 10$ mm)	Оптический с коррекцией / Optical with correction	Контактный метод требует обязательной коррективки по предложенной модели / Contact method requires mandatory correction using the proposed model
Криволинейные поверхности ($R < 5$ мм) / Curved surfaces ($R < 5$ mm)	Оптический / Optical	Контактный метод неприменим из-за геометрических искажений / Contact method is inapplicable due to geometric distortions
Анализ пространственных частот / Spatial frequency analysis	Оптический / Optical	Необходим для исследования направленных следов обработки и поверхности, полученной аддитивными технологиями / Required for studying directional machining marks and surfaces obtained by additive technologies

материала. При измерении более мягких материалов возможно локальное упругопластическое деформирование отдельных вершин микронеровностей, тогда как для материалов с более высокой твердостью контакт носит преимущественно упругий характер. Однако результаты проведенных исследований показывают, что в диапазоне исследованных материалов влияние данного фактора значительно уступает влиянию геометрии поверхности.

Выводы

1. Выполнено сравнительное исследование контактного и оптического методов измерения шероховатости криволинейных поверхностей. Установлено, что основным фактором, определяющим расхождение результатов измерений, является радиус кривизны поверхности. При уменьшении радиуса кривизны систематическая погрешность контактной профилометрии возрастает, достигая максимальных значений (+27,6 %) для образцов с радиусом 2 мм, тогда как при $R = 25$ мм она не превышает +1,4 %. Более низкую чувствительность к кривизне исследуемой поверхности показал оптический метод. Однако на исследуемых участках с большим локальным углом наклона такой метод способствует занижению параметра шероховатости по R_a на 10...15 % в связи с появлением теневого эффекта.

2. Определен геометрический фактор, существенно превышающий влияние на показания относительно физико-механических свойств материалов, из которых изготовлены образцы. Практически идентичны значения относительной погрешности для образцов, изготовленных из стали 45, а также чугуна СЧ20 (+27,6 % при $R = 2$ мм), что подтверждает доминирующее влияние геометрии исследуемой поверхности при формировании погрешности измерений.

Для плоских поверхностей, шероховатость которых составляла $R_a = 0,8...6,3$ мкм, между используемыми методами измерений не выявлено статистически значимых различий ($r = 0,98$, $t = 1,23$, $p > 0,05$). Однако на гладких поверхностях ($R_a < 0,4$ мкм) применение контактного метода приводит к завышению показаний на 7...11 % в связи с упругой деформацией микронеровностей исследуемой поверхности.

3. В результате исследований осуществлена разработка комплексной математической модели, учитывающей влияние радиуса кривизны, выбранного способа обработки, а также эксплуатационных факторов, к которым можно отнести температуру исследуемого образца, загрязнение, ориентацию следов после обработки поверхности, вибрации и контактного усилия, влияющих на результаты измерения шероховатости поверхности.

Обоснование эмпирических коэффициентов выполнено на основе многофакторного планирования эксперимента и решения контактной задачи Герца. Верификация модели на независимой выборке показала хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных: для образцов с малым радиусом кривизны ($R = 2$ мм) коррекция снижает расхождение с 25...27 % до менее 3 %. Для всего исследованного диапазона условий (радиусы 2...25 мм, $R_a = 0,1...12,5$ мкм) среднее снижение систематической составляющей погрешности составило 5...7 %, что подтверждено статистической обработкой результатов.

4. Полученные результаты показывают, что применение разработанной модели позволяет повысить сопоставимость результатов контактной и оптической профилометрии и обеспечить более достоверную оценку параметров шероховатости деталей сложной геометрической формы. Предложенный подход может быть использован при метрологическом обеспечении технологических процессов и разработке программных средств автоматизированной коррекции результатов измерений.

Список литературы

1. Vinogradova A.A., Grichukha M.I., Smirnova E.E. Comparative assessment of documentation referred to surface roughness measurement // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1728. – P. 012025. – DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012025.
2. ISO 4287:1997. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters.
3. ISO 3274:1996. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments.
4. Petzing J.N., Coupland J.M. Measurement of rough surfaces on large curved components using optical methods // *Measurement*. – 2010. – Vol. 43 (8). – P. 1064–1071. – DOI: 10.1016/j.measurement.2010.03.007.

5. Comparison of optical and stylus methods for measurement of surface texture / T.V. Vorburger, H.G. Rhee, T.B. Renegar, J.F. Song, A. Zheng // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2007. – Vol. 33 (1–2). – P. 110–118. – DOI: 10.1007/s00170-007-0953-8.
6. *Thomas T.R.* Rough surfaces. – 2nd ed. – London: Imperial College Press, 1999. – 296 p. – ISBN 978-1860941009.
7. ГОСТ 19300–86. Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 12 р.
8. *Mostafa Y.* A review on various shadow detection and compensation techniques in remote sensing images // *Canadian Journal of Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 43 (6). – P. 545–562. – DOI: 10.1080/07038992.2017.1384310.
9. *Martínez Antón J.C., Alonso J., Gómez Pedrero J.A.* Topographic optical profilometry of steep slope micro-optical transparent surfaces // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23 (7). – P. 9494–9507. – DOI: 10.1364/OE.23.009494.
10. Comparison of optical and stylus methods for surface texture characterisation in industrial quality assurance of post-processed laser metal additive Ti-6Al-4V / T. Buchenau, T. Mertens, H. Lohner, H. Bruening, M. Amkreutz // *Materials*. – 2023. – Vol. 16 (13). – P. 4815. – DOI: 10.3390/ma16134815.
11. *Łukianowicz Cz., Karpiński T.* Optical system for measurement of surface form and roughness // *Measurement Science Review*. – 2001. – Vol. 1 (1). – P. 151–154.
12. *Demircioglu P., Durakbasa M.N., Tan O.* A comparison between contact type profilometer and different D optical techniques: a case study in characterization of machined surface structures // *Quality-Access to Success*. – 2012. – Vol. 13. – P. 117–122.
13. Comparative analysis of surface roughness measurements obtained with the use of contact stylus profilometry and coherence scanning interferometry / S. Adamczak, J. Świdorski, K. Stępień, T. Dobrowolski, I.P. Chmielik // XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”: proceedings, Prague, Czech Republic, August 30 – September 4, 2015. – Prague: IMEKO, 2015. – P. TC14-316. – URL: <https://www.imeko.info/publications/wc-2015/IMEKO-WC-2015-TC14-316.pdf> (accessed: 20.08.2026).
14. *Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M.* Comparison of results of surface texture measurement obtained with stylus methods and optical methods // *Metrology and Measurement Systems*. – 2018. – Vol. 25 (3). – P. 589–602. – DOI: 10.24425/123894.
15. Analysis of roughness profile on curved surfaces / M. Drbůl, P. Martikář, J. Bronček, I. Litvaj, J. Svobodová // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 244. – P. 01024. – DOI: 10.1051/mateconf/201824401024.
16. *Kumar S., Ramkumar J., Chindam C.* Surface roughness analysis: A comprehensive review of measurement techniques, methodologies, and modeling // *Journal of Micromanufacturing*. – 2025. – Vol. 9 (1). – P. 107–130. – DOI: 10.1177/25165984241305225.
17. *Nowicki B.* Multiparameter representation of surface roughness // *Wear*. – 1985. – Vol. 102 (3). – P. 161–176.
18. An optical method for measuring surface roughness of machined carbon fibre-reinforced plastic composites / N. Duboust, H. Ghadbeigi, C. Pinna, S. Ayvar-Soberanis, A. Collis, R. Scaife, K. Kerrigan // *Journal of Composite Materials*. – 2017. – Vol. 51 (3). – P. 289–302. – DOI: 10.1177/0021998316644849.
19. The optical aspect of errors in measurements of surface asperities using the optical profilometry method / K. Grochalski, M. Wieczorowski, J. H'Roura, G. Le Goic // *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 6. – P. 12. – DOI: 10.3389/fmech.2020.00012.
20. *Whitehouse D.J.* Handbook of surface and nanometrology. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2010. – 980 p. – DOI: 10.1201/b10411.
21. Roughness parameters / S. Gademawla, M. Koura, T. Maksoud, I. Elewa, H. Soliman // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. – Vol. 123 (1). – P. 133–145. – DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00060-2.
22. Selected errors in spatial measurements of surface asperities / K. Grochalski, D. Podbereska, M. Wieczorowski, R. Talar, W. Graboń // *Materials*. – 2024. – Vol. 17 (12). – P. 2918. – DOI: 10.3390/ma17122918.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 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



Evaluation of contact and optical profilometry in the control of the roughness of curved surfaces of machine parts

Ervin Umerov^{1, 2, a, *}, Arkady Soloviev^{1, b}, Yuriy Egorov^{2, c}, Vladimir Skakun^{1, 2, d},
 Ivan Sobolevsky^{1, e}, Ruslan Dzhemalyadinov^{1, 2, f}

¹ Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov, 8 Uchebnyy side str., Simferopol, 295015, Russian Federation

² V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 4 Academician Vernadsky Ave., Simferopol, 295007, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-3477-2036>,  Ervin777@yandex.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-8465-5554>,  solovievarc@gmail.com;

^c  <https://orcid.org/0000-0003-4990-9998>,  yuriyegorov@cufv.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0003-0656-7852>,  vladimir.skakun.92@list.ru;

^e  <https://orcid.org/0000-0002-1338-9065>,  sobolevskii-ivan@mail.ru; ^f  <https://orcid.org/0000-0003-3319-3542>,  rus.dzhemalyadinov@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 30 May 2026

Revised: 13 June 2026

Accepted: 29 July 2026

Available online: 15 September 2026

Keywords:

Contact profilometry

Optical profilometry

Surface roughness

Curved surfaces

Error correction

Funding

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 24-12-20013).

ABSTRACT

Introduction. Roughness measurement of curved machine parts is a critical metrology task, determining the performance characteristics of the components. The contact method introduces systematic error due to the straight-line trajectory of the probe and the plastic deformation of microroughness. Non-contact optical methods eliminate mechanical stress, but their accuracy decreases in areas with a large local inclination angle due to the shadowing effect. The lack of a unified approach to comparing results for curved surfaces limits the ability to tighten tolerances. **The purpose of the work** is to conduct a comprehensive comparative analysis of contact and optical profilometry in measuring the roughness of curved surfaces and to develop mathematical models for correcting systematic errors. **Materials and methods.** Experiments were conducted on samples of 0.45% C steel and GG20 cast iron with curvature radii of 2–25 mm and roughness parameters $R_a = 0.1$ –12.5 μm . Contact measurements were performed using a *TIME TR200* profilometer, while optical measurements were performed using a *Veeco Wyko NT9100* in vertical scanning interferometry and phase shift interferometry modes. **Statistical** processing included *Student's t*-test, correlation, and regression analysis. **Results and discussion.** The error of the contact method at a radius of 2 mm reaches +27.6%, at $R = 25$ mm it is no more than +1.4%. The optical method is resistant to curvature, but in areas with high curvature leads to an underestimation of R_a by 10–15% due to the shadowing effect. For flat surfaces ($R_a = 0.8$ –6.3 μm), there are no significant differences between the methods ($r = 0.98$). Mathematical models have been developed to correct the influence of temperature, contamination, roughness orientation, vibration, and contact force. **Conclusions.** An algorithm for selecting a measurement method is proposed: for radii of curvature less than 10 mm, the optical method with geometric correction is recommended; the contact method is not applicable for radii less than 5 mm. The obtained models can be integrated into the profilometer software for automatic error compensation.

For citation: Umerov E.D., Soloviev A.N., Egorov Y.A., Skakun V.V., Sobolevsky I.V., Dzhemalyadinov R.M. Evaluation of contact and optical profilometry in the control of the roughness of curved surfaces of machine parts. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 3, pp. 112–128. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.3-112-128. (In Russian).

References

1. Vinogradova A.A., Grichukha M.I., Smirnova E.E. Comparative assessment of documentation referred to surface roughness measurement. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1728, p. 012025. DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012025.
2. ISO 4287:1997. *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters*.
3. ISO 3274:1996. *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments*.

* Corresponding author

Umerov Ervin D., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov,
 8 Uchebnyy side str.,
 295015, Simferopol, Russian Federation
 Tel.: +7 978 832-72-92, e-mail: Ervin777@yandex.ru

4. Petzing J.N., Coupland J.M. Measurement of rough surfaces on large curved components using optical methods. *Measurement*, 2010, vol. 43 (8), pp. 1064–1071. DOI: 10.1016/j.measurement.2010.03.007.
5. Vorburger T.V., Rhee H.G., Renegar T.B., Song J.F., Zheng A. Comparison of optical and stylus methods for measurement of surface texture. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, vol. 33 (1–2), pp. 110–118. DOI: 10.1007/s00170-007-0953-8.
6. Thomas T.R. *Rough surfaces*. 2nd ed. London, Imperial College Press, 1999. 296 p. ISBN 978-1860941009.
7. GOST 19300–86. *Sredstva izmerenii sherokhovatosti poverkhnosti profil'nym metodom. Profilografy-profilometry kontaktnye. Tipy i osnovnye parametry* [Instruments for measurement of surface roughness by the profile method. Contact profilographs and profilometers. Types and main parameters]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1986. 12 p.
8. Mostafa Y. A review on various shadow detection and compensation techniques in remote sensing images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2017, vol. 43 (6), pp. 545–562. DOI: 10.1080/07038992.2017.1384310.
9. Martínez Antón J.C., Alonso J., Gómez Pedrero J.A. Topographic optical profilometry of steep slope micro-optical transparent surfaces. *Optics Express*, 2015, vol. 23 (7), pp. 9494–9507. DOI: 10.1364/OE.23.009494.
10. Buchenau T., Mertens T., Lohner H., Bruening H., Amkreutz M. Comparison of optical and stylus methods for surface texture characterisation in industrial quality assurance of post-processed laser metal additive Ti-6Al-4V. *Materials*, 2023, vol. 16 (13), p. 4815. DOI: 10.3390/ma16134815.
11. Łukianowicz Cz., Karpiński T. Optical system for measurement of surface form and roughness. *Measurement Science Review*, 2001, vol. 1 (1), pp. 151–154.
12. Demircioglu P., Durakbasa M.N., Tan O. A comparison between contact type profilometer and different D optical techniques: a case study in characterization of machined surface structures. *Quality-Access to Success*, 2012, vol. 13, pp. 117–122.
13. Adamczak S., Świdorski J., Stępień K., Dobrowolski T., Chmielik I.P. Comparative analysis of surface roughness measurements obtained with the use of contact stylus profilometry and coherence scanning interferometry. *XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry": proceedings*, Prague, Czech Republic, August 30 – September 4, 2015, P. TC14-316. Available at: <https://www.imeko.info/publications/wc-2015/IMEKO-WC-2015-TC14-316.pdf> (accessed 20.08.2026).
14. Pawlus P., Reizer R., Wiczorowski M. Comparison of results of surface texture measurement obtained with stylus methods and optical methods. *Metrology and Measurement Systems*, 2018, vol. 25 (3), pp. 589–602. DOI: 10.24425/123894.
15. Drbůl M., Martikán P., Bronček J., Litvaj I., Svobodová J. Analysis of roughness profile on curved surfaces. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 244, p. 01024. DOI: 10.1051/mateconf/201824401024.
16. Kumar S., Ramkumar J., Chindam C. Surface roughness analysis: A comprehensive review of measurement techniques, methodologies, and modeling. *Journal of Micromanufacturing*, 2025, vol. 9 (1), pp. 107–130. DOI: 10.1177/25165984241305225.
17. Nowicki B. Multiparameter representation of surface roughness. *Wear*, 1985, vol. 102 (3), pp. 161–176.
18. Duboust N., Ghadbeigi H., Pinna C., Ayvar-Soberanis S., Collis A., Scaife R., Kerrigan K. An optical method for measuring surface roughness of machined carbon fibre-reinforced plastic composites. *Journal of Composite Materials*, 2017, vol. 51 (3), pp. 289–302. DOI: 10.1177/0021998316644849.
19. Grochalski K., Wiczorowski M., H'Roura J., Le Goic G. The optical aspect of errors in measurements of surface asperities using the optical profilometry method. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2020, vol. 6, p. 12. DOI: 10.3389/fmech.2020.00012.
20. Whitehouse D.J. *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd ed. Boca Raton, CRC Press, 2010. 980 p. DOI: 10.1201/b10411.
21. Gadelmawla S., Koura M., Maksoud T., Elewa I., Soliman H. Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 123 (1), pp. 133–145. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00060-2.
22. Grochalski K., Podbereska D., Wiczorowski M., Talar R., Graboń W. Selected errors in spatial measurements of surface asperities. *Materials*, 2024, vol. 17 (12), p. 2918. DOI: 10.3390/ma17122918.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.