Научная статья
УДК 621.01

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА ТОПОЛОГИЮ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

О.В. Колесникова[1], В.Е. Лелюхин[1*], К.Н. Пермякова[1]
[1] Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
* E-mail: lelv0@mail.ru

Аннотация. Рельеф поверхности оказывает существенное влияние на выполнение функциональных требований к детали. Направление неровностей определяет характер посадки, течение жидкостей и воздуха, стойкость к коррозии и многое другое, а также влияет на характер измерения как микрогеометрических (шероховатости), так и макрогеометрических (точность формы) отклонений. Действующие стандарты в России и за рубежом регламентируют шесть и семь (в зависимости от стандарта) направлений неровностей поверхностей. Деление на типы представлено на основании субъективного геометрического соответствия. Руководствуясь данными стандартами, специалист может осуществить лишь качественный контроль направления неровностей поверхностей. Одна из проблем действующих стандартов заключается в отсутствии формальных закономерностей получения топологии рельефа с методами обработки поверхностей, что ограничивает формализацию проектирования технологических процессов. Целью данной работы является рассмотрение способа формального представления геометрической визуализации рельефа шероховатости поверхности. На основе разработанной авторами теории синтеза и классификации методов формообразования поверхностей в статье предлагается формальная интерпретация решения задачи регламентации индивидуальной структуры «геометрического портрета» её рельефа. Представленные материалы позволяют не только ликвидировать неоднозначность и установить чёткую взаимосвязь между методом формообразования и направлением неровностей, но и автоматизировать процесс проектирования конструкций и технологий.

Ключевые слова: *рельеф поверхности; метод формообразования; производящие линии; направление неровностей; формализация проектирования.*

Для цитирования: Колесникова О.В., Лелюхин В.Е., Пермякова К.Н. Влияние методов формообразования на топологию рельефа поверхности при механической обработке // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2024. Т.10. №2. С. 90–102.

Original article

RELATIONSHIP OF FORMING METHODS AND SURFACE TOPOLOGY AT MACHINING

O.V. Kolesnikova[1], V.E. Lelyukhin[1]*, K.N. Permyakova[1]

[1] Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
* E-mail: lelv0@mail.ru

Abstract. Surface topography has a significant impact on the functional requirements of a part. The direction of irregularities determines fit, fluid and air flow, corrosion resistance, and more. They also influence the nature of measurement of both micro geometric (roughness) and macro

© Колесникова О.В., Лелюхин В.Е., Пермякова К.Н. 2024

geometric (shape accuracy) deviations. Current standards in Russia and abroad regulate six and seven (depending on the standard) directions of surface roughness. The division into types is presented on the basis of subjective geometric correspondence. Guided by these standards, the specialist can only perform quality control of the direction of surface irregularities. One of the problems of the current standards is the lack of formal regularities of obtaining topology of relief with methods of surface treatment, which limits the formalization of technological process design. The purpose of this paper is to consider a method for formal representation of geometric visualization of surface roughness relief. The authors have developed a theory for the synthesis of surface shaping methods. This theory is the basis for the formal interpretation of the problem that regulates the individual structure of the "geometric portrait" of its relief. The presented materials allow not only to carry out a clear relationship between the method of shaping and the direction of roughness, but also to automate the process of design of structures and technologies.

Key words: *surface relief; shaping method; producing lines; roughness direction; creation formalization.*

For citation: Kolesnikova O.V., Lelyukhin V.E., Permyakova K.N. Relationship of forming methods and surface topology at machining. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2024. V.10. No. 2, pp. 90–102.

Введение

Шероховатость поверхности и рельеф микронеровностей оказывают существенное влияние на функционирование как отдельных деталей и узлов, так и машин в целом. Например, обеспечение необходимых видов сопряжений в соединениях, герметичности статических уплотнений, прочность клеевых соединений, влияние на характер сопротивления потоков жидкостей и газов и т.д. [1, 2, 3, 4]. Корректная регламентация параметров шероховатости и рельефа во многом определяет качество машиностроительных изделий на этапах от проектирования до эксплуатации [3, 5, 6].

Действующие стандарты в России[1][2] и за рубежом[3][4] регламентируют большое число различных параметров. При этом отечественные регламенты сохраняют традиционные подходы, а зарубежные стандарты претерпели существенные изменения. Так на сегодняшний день ISO-21920 регламентирует десять разделов параметров профиля микронеровностей поверхности (параметры высоты, пространственные параметры, гибридные параметры, фрактальные параметры, функциональные параметры и др.).

Среди множества характеристик для геометрического представления рельефа шероховатости поверхности используется понятие «Типы направлений неровностей». Анализ существующих отечественных и зарубежных регламентов свидетельствует о неопределенности отношений используемых обозначений и определений типов направлений неровностей с технологическими приемами и способами их достижения. На практике, в случаях с особой (критической) зависимостью функциональных свойств от характера поверхностного рельефа поверхностей, указанная неопределенность приводит к нестабильности конструктивных характеристик и технологических решений.

По мнению авторов, одна из проблем действующих стандартов заключается в отсутствии формальных закономерностей получения топологии рельефа с методами обработки поверхностей, что также является ограничением для формализации проектирования технологических процессов.

[1] ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. М.: Стандартинформ, 2018. 6с.

[2] ГОСТ 2.309-73. ЕСКД. Обозначения шероховатости поверхностей. М.: Стандартинформ, 2007. 9с.

[3] ISO 21920-2:2021. Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.

[4] ASME B46.1-2009. Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay) (- 2009). 120 p.

Целью данной работы является рассмотрение способа формального представления геометрической визуализации рельефа шероховатости поверхности с использованием теории синтеза методов формообразования поверхностей [7, 8].

Анализ регламентов рельефа шероховатости поверхностей

Стандартами, регламентирующими направление неровностей поверхностей, в России являются: ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 2.309-73. Согласно ГОСТ 2789-73: «направление неровностей поверхностей – условный рисунок, образованный нормальными проекциями экстремальных точек неровностей поверхности на среднюю поверхность». В стандарте содержится шесть типов направления неровностей; условные обозначения, схематическое изображение и интерпретация которых показана на рис. 1.

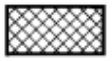
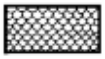
Тип направлений неровностей	Схематическое изображение	Пояснение
Параллельное		Параллельно линии, изображающей на чертеже поверхность, к шероховатости которой устанавливаются требования
Перпендикулярное		Перпендикулярно линии, изображающей на чертеже поверхность, к шероховатости которой устанавливаются требования
Перекрещивающееся		Перекрещивание в двух направлениях наклонно к линии, изображающей на чертеже поверхность, к шероховатости которой устанавливаются требования
Произвольное		Различные направления по отношению к линии, изображающей на чертеже поверхность, к шероховатости которой устанавливаются требования
Кругообразное		Приблизительно кругообразно по отношению к центру поверхности, к шероховатости которой устанавливаются требования
Радиальное		Приблизительно радиально по отношению к центру поверхности, к шероховатости которой устанавливаются требования

Рисунок 1 - Типы направления неровностей согласно ГОСТ 2789-73

Проведенный анализ положений, изложенных в ГОСТ 2789-73, показал, что направления неровностей представлены технически и геометрически неточно, что не позволяет однозначно интерпретировать информацию и установить связь с технологией образования данных направлений неровностей. Например, указание опорной точки контроля направления неровностей представлено в виде размытой формулировки. В частности, при параллельном, перпендикулярном, наклонном и произвольном типах указано: «…линии, изображающей на чертеже поверхность…». Исходя из данной интерпретации возникают закономерные вопросы о характере расположения неровностей на плоскости, а также остаётся открытым вопрос о направлении неровностей.

Помимо прочего, этому стандарту присущ субъективный характер оценки направлений неровностей, основанный не на геометрических зависимостях, а на визуальном соответствии. Так не указаны характер линий (форма, глубина, ширина), взаимное расположение (угол наклона и шаг). Конкретно к кругообразному и радиальному типам направлений неровностей геометрическая форма описывается как: «Приблизительно кругообразно…» и «Приблизительно радиально…» без какого-либо указания степени приближения.

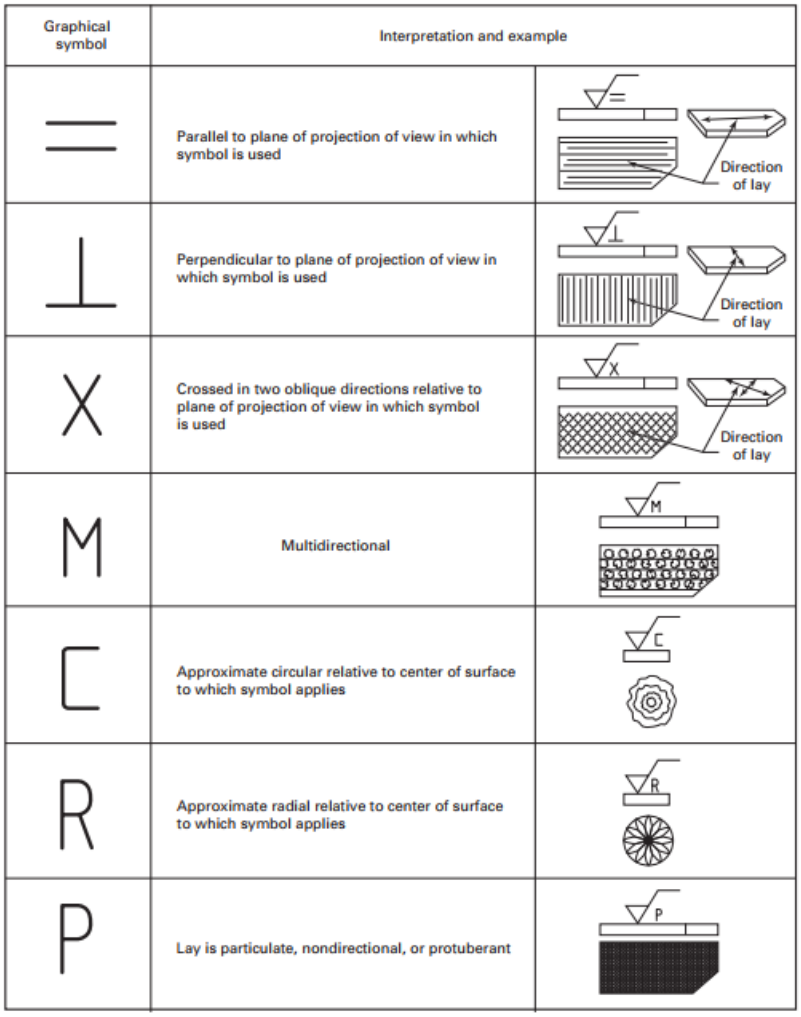
Действующий одновременно с ГОСТ 2789-73, ГОСТ 2.309-73 регламентирует применение семи направлений неровностей (рис. 2).



Рисунок 2 – Типы направления неровностей согласно ГОСТ 2.309-73

Ни в одном из действующих в России стандартов при указании типа направлений неровностей не указывается базовая поверхность для контроля. Например, при измерении одна и та же шероховатость может быть интерпретирована как параллельная, так и перпендикулярная.

Стандарт ASME-B46.1.2019 составлен на основании ISO 1302-2002 (рис. 3). Направления неровностей поверхности аналогичны по количеству типов и условному обозначению ГОСТ 2.309-73.



GENERAL NOTE: If it is necessary to specify a surface pattern which is not clearly defined by these symbols, this shall be achieved by the addition of a suitable note to the drawing.

Рисунок 3 - Типы направления неровностей согласно ASME B46.1-2009

Значительным отличием ISO 21920:2021 является необходимость указывать не только тип (рис. 4), но и направление поверхностного слоя специальным обозначением в поле знака шероховатости (рис. 5). Условное обозначение проставляется к контролируемой поверхности, а направление слоя определяется относительно базовой.

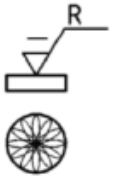
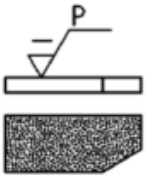
Graphical symbol	Interpretation and example	
M	Multidirectional	
C	Circular relative to centre of surface to which symbol applies	
R	Radial relative to centre of surface to which symbol applies	
P	Lay is particulate, non-directional or protuberant	

Рисунок 4 – Условное обозначение и интерпретация типов поверхносого слоя в соответствии с ISO 21920:2021

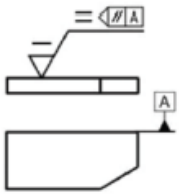
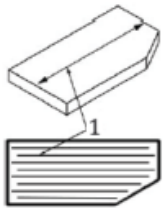
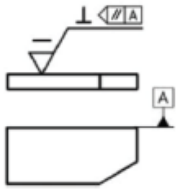
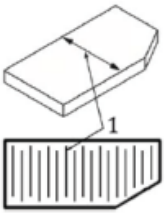
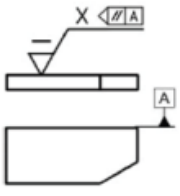
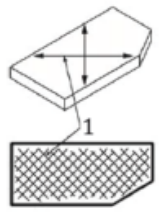
Graphical symbol	Example of indication	Interpretation	Required direction of lay
=		Parallel to the direction, given by the intersection plane indicator and the datum feature indicator	
⊥		Perpendicular to the direction, given by the intersection plane indicator and the datum feature indicator	
X		Crossed in two oblique directions relative to the direction, given by the intersection plane indicator and the datum feature indicator	

Рисунок 5 – Примеры условных обозначений направления неровностей поверхности в соответствии с ISO 21920:2021

В ISO 21920:2021 представлено условное обозначение направления профиля (Рис 6). Данная классификация частично связывает направление неровностей поверхности с формообразующими движениями. Но при указании расположения поверхностного слоя относительно базовой поверхности, знак направления неровностей, по мнению авторов, является избыточным.

Graphical symbol	Interpretation
	Perpendicular to the predominant direction
	Parallel to the predominant direction
	Circular to the centre of the surface to which the symbol applies
	At a defined angle to the predominant direction ($0° < n < 90°$)

Рисунок 6 – Условное обозначение направления профиля в соответствии с ISO 21920:2021

Таким образом, характер изображения и описания направлений неровностей в действующих стандартах является чисто геометрическим, то есть, не имеет связи с технологической реализацией. Деление на типы и интерпретация являются субъективными и многозначными, что не характерно для технических документов. Изменения, принятые в ISO 21920:2021 не привели к решению вопросов, связанных с определением направления неровностей поверхности, а лишь добавили избыточности введением новых типов.

Образование рельефа поверхностности при механической обработке

В результате механической обработки на поверхности материала остаются микронеровности, характер которых зависит как от способа обработки и геометрических параметров режущего инструмента, так и от режимов резания [7, 9, 10, 11].

Анализ получаемых неровностей может быть использован для выявления характеристик и зависимостей их от используемого инструмента и метода формообразования поверхности. В ISO 21920-2:2021 введены и рассмотрены большое количество параметров неровностей поверхности. Чаще всего для оценки и изучения используются три группы параметров:

1) параметры неровностей оставляемого следа инструмента (бороздки с профилем в виде зеркальной копии геометрического абриса инструмента «в плане») – макронеровности;

2) параметры неровностей, образованные режущей кромкой инструмента в результате скалывания материала[5] - микронеровности;

3) параметры изменений поверхностного слоя (микротрещины), появляющиеся в материале в результате силового воздействия инструмента, тепловых воздействий при обработке и т.д.

По мнению авторов, наибольшее влияние на формирование визуализируемого рельефа шероховатости поверхности оказывают макронеровности, образованные геометрическим видом режущей кромки инструмента [7, 8, 12].

Одним из распространенных инструментов моделирования порождения поверхностей является кинематический способ, когда образование поверхности происходит в результате взаимодействия двух производящих линий, т.е. движения одной линии (образующая) относительно другой (направляющая), которая определяет закон перемещения образующей,

[5] Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: учебник. Москва: Высшая школа, 1985. 301 с.

как показано на рис.7 [8, 13]. Движение инструмента в направлении образующей формирует след (бороздку), а смещение вдоль направляющей создает регулярно повторяющиеся бороздки. Идеальный смоделированный след изображен на рис. 7 пунктирной линией. В результате взаимодействия различных физических параметров и процессов получаемый реальный след на поверхности материала отличается от идеального. на рис. 7 реальный результат обработки изображен волнистой сплошной линией.

Наложение условий на форму производящих линий, взаимную их ориентацию и характер перемещения позволяет формировать практически любые поверхности. Кинематический способ удобно использовать для описания методов формообразования поверхностей при механической обработке, поскольку позволяет ассоциировать образующую и направляющую с движениями инструмента и заготовки.

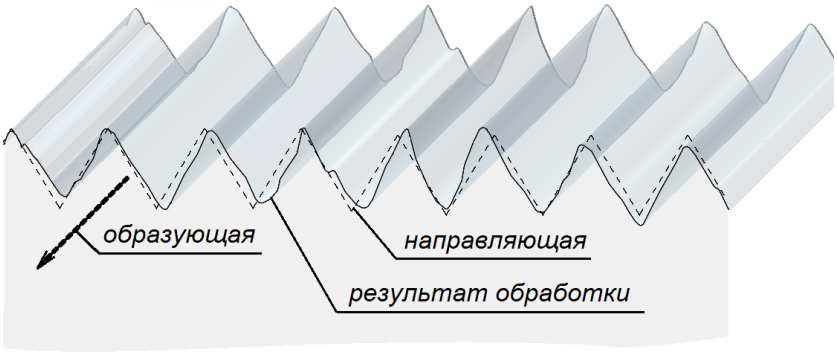


Рисунок 7 – Образование неровностей поверхности

В работах [7, 8, 12, 13] рассмотрена классификация методов формообразования, которая включает в себя четыре типа: следа непрерывный, копирования непрерывный, следа дискретный, копирования дискретный (рис. 8).

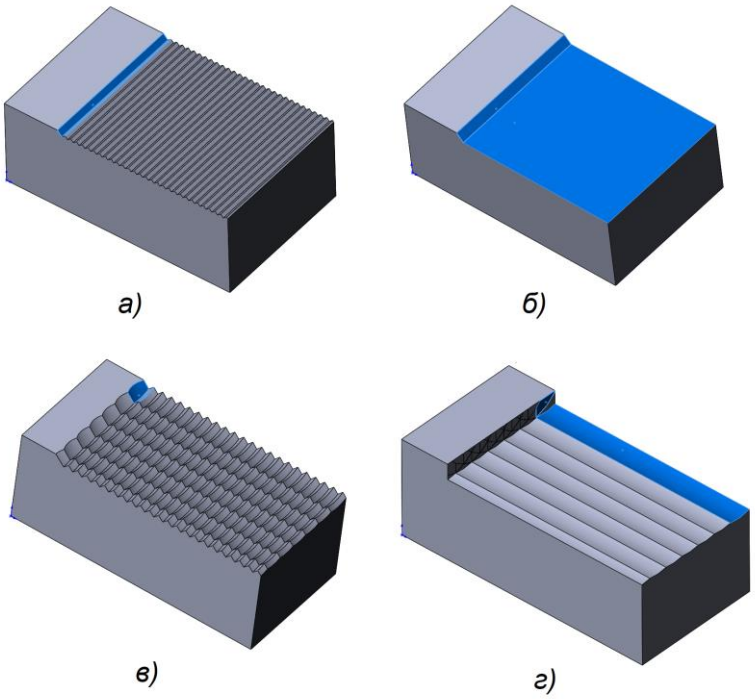


Рисунок 8 – Методы формообразования: а) следа непрерывный, б) копирования непрерывный, в) следа дискретный, г) копирования дискретный

Классификация основана на соотношении и типе образующей и направляющей линий при формировании поверхностей. При этом образующая линия однозначно ассоциируется с главным движением инструмента, в результате которого происходит срезание материала. примерами являются: рабочий ход ползуна с инструментом на строгальном (рис. 8а и рис. 8б) и долбежном станках; вращение шпинделя с заготовкой на токарном станке; вращение шпинделя со сверлом на сверлильном или расточном станках и т.д. Направляющая линия соответствует либо движению подачи, либо направлению и форме режущей кромки инструмента (в случаях копирования). Характерными признаками для построения классификации являются непрерывность или прерывистость производящих линий.

Непрерывность образующей линии во всех случаях свидетельствует о том, что режущая кромка инструмента находится под нагрузкой в течение всего рабочего хода, иными словами, она (кромка) непрерывно срезает материал. В этих случаях для воспроизведения образующей достаточного одного движения, и стружка снимается непрерывно по всей длине образующей. Поэтому такие методы формообразования получили название непрерывные [7, 8, 12].

Прерывистость главного движения реализуется в тех случаях, когда режущая кромка инструмента в течение рабочего хода многократно вступает во взаимодействие с заготовкой. Например, зуб фрезы (рис. 8в и рис. 8г) в течение одного оборота участвует в процессе срезания стружки небольшую часть времени, а остальное время «отдыхает». Для реализации образующей необходимо сочетание двух движений (линейного и кругового при фрезерной обработке). Учитывая характер периодического взаимодействия режущей кромки инструмента с заготовкой, методы, в которых происходит фрагментарное отделение стружки, названы дискретными [7, 8, 12].

Форма поверхности является результатом движения образующей по направляющей, однако трудно представить одновременное движение в нескольких направлениях. Поэтому получение формы поверхности реализуется последовательным выполнением многократного движения инструмента по образующей с некоторой величиной смещения вдоль направляющей (рис. 8а). В результате, при ближайшем рассмотрении, получается профиль, показанный на рис. 7, который сформирован многократными движениями режущей кромки, каждый раз оставляющей после себя продольный след с соответствующим геометрическим профилем. Поэтому такой метод получил название следа (рис. 8а и рис. 8в). Заменяя форму движения подачи инструмента формой режущей кромки, получаем метод копирования, как показано на рис. 8б и рис. 8г.

Рассмотренные положения и представленные примеры на рис. 7 и рис. 8 свидетельствуют о наличии закономерности формирования определенного рельефа поверхности в зависимости от применяемого метода формообразования поверхности.

Предлагаемая классификация направлений неровностей

Приведенные схемы образования рельефа поверхностей (рис. 8) демонстрируют однозначное соответствие типа направлений неровностей характеру формообразующих движений заготовки относительно инструмента и геометрическим характеристикам его режущей кромки.

В связи с этим в статье предлагается рассмотреть возможность нормирования направлений неровностей, образующих рельеф поверхностей в соответствии с теорией синтеза и классификацией методов формообразования поверхностей изложенных в работах авторов [7, 8, 12, 14]. Это позволит упростить и систематизировать конструктивные параметры поверхностей и технологические решения для их достижения. на рис. 9 показаны четыре основных рельефа (типа направлений неровностей), получаемых соответствующими методами формообразования для плоскости. Символами «О» и «Н» обозначены вид и направление образующей и направляющей соответственно (рис.9).

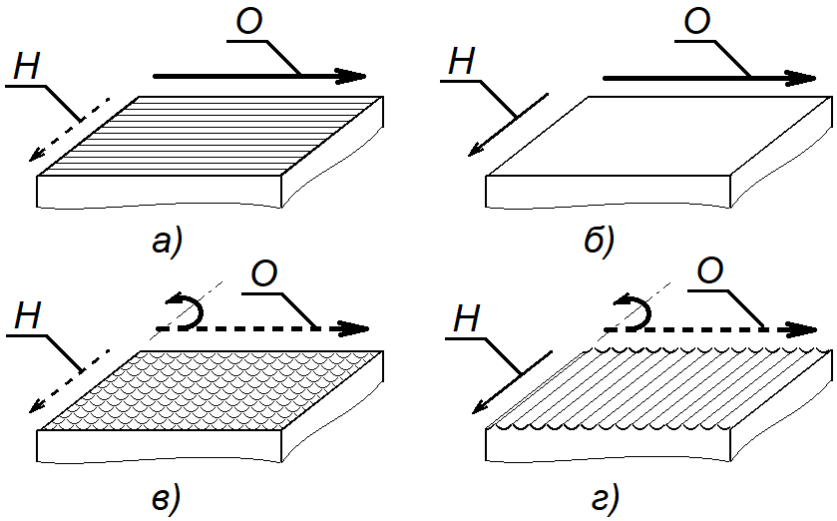


Рисунок 9 – Предлагаемая классификация рельефа поверхности: а) следа непрерывный, б) копирования непрерывный, в) следа дискретный, г) копирования дискретный

Как показано на рис. 9а тип направления неровностей «след непрерывный» формирует непрерывные углубления («борозды»), соответствующие образующей, регулярно повторяющейся вдоль направляющей (например, островершинный резец). Характер рельефа на рис.9б «копирования непрерывный» не имеет регулярных углублений и получаемые микронеровности связаны лишь с «копированием» (повторением) режущей кромки инструмента на поверхность материала (например, фасонный резец). Рис. 9в, представляющий «след дискретный», предполагает появление регулярных выемок на поверхности в результате вращения и перемещения инструмента по образующей, а также после каждого рабочего хода фрагментарного перемещения по направляющей (например, дисковая фреза). Изображенный на рис. 9г рельеф «копирования дискретный» характеризуется наличием регулярных впадин, формируемых режущей кромкой инструмента в результате вращения и перемещения по образующей (например, цилиндрическая фреза) [7, 8, 12].

В рассмотренных примерах использованы элементарные производящие линии расположенные перпендикулярно друг к другу (рис. 9). Следует отметить, что расположение и наклон неровностей на поверхности изготавливаемой детали будут зависеть от используемых форм и направлений кривых образующей и направляющей. Например, если в качестве образующей и направляющей используются прямые линии, то характер расположения неровностей при использовании дискретных методов будет зависеть от взаимной ориентации (угла) этих линий. Замена элементарных производящих линий (прямая и окружность), на линии различной кривизны, обеспечивает образование поверхностей сложной формы. Для аппроксимации сложных кривых линий удобно использовать сплайны Пьера Безье и алгоритмы Поля де Кастельжо [14, 15, 16, 17].

Обсуждение результатов и выводы

Предложенная классификация позволяет осуществить связь между направлением неровностей поверхности и технологией порождения. Благодаря минимальному и достаточному количеству типов, которые возможно изменять в зависимости от введенных параметров, появляется возможность автоматизации процесса проектирования и контроля величины шероховатости в зависимости от известного направления.

Отметим, что независимо от сложности формы обрабатываемой поверхности, рисунок рельефа обработанных поверхностей ограничивается изложенными принципиальными типами. Каждый из рассмотренных типов однозначно соответствует формально синтезируемой схеме порождения поверхности [7, 8, 12, 14].

На практике в подавляющем большинстве случаев, включая указанные в статье отечественные и зарубежные регламенты предполагается рассмотрение ортогонально расположенных производящих линий. Однако, если нормировать угол взаимного расположения образующей и направляющей линий, то можно предположить формирование бесконечного многообразия рельефов. Регламентация указанных методов формообразования совместно с заданием взаимного углового расположения производящих линий обеспечит формально воспроизводимый уникальный геометрический рельеф шероховатости поверхности.

Предложенная классификация направлений неровностей, ассоциированная с методами формообразования, может быть использована в качестве основы для разработки регламентов, используемых при конструировании машин и проектировании технологических процессов механической обработки деталей, а также методов контроля шероховатости.

Таким образом, производящие линии и отношения между ними, включая углы, определяют индивидуальную структуру «геометрического портрета» рельефа для любой конкретной поверхности. Эта индивидуальность может быть эффективно использована для формального распознавания как отдельных поверхностей, так и геометрических объектов.

На основе разработанной авторами теории синтеза и классификации методов формообразования поверхностей в статье изложена формальная интерпретация решения задачи регламентации индивидуальной структуры «геометрического портрета» её рельефа. Представленные материалы позволяют не только ликвидировать неоднозначность и установить чёткую взаимосвязь между методом формообразования и направлением неровностей, но и автоматизировать процесс проектирования конструкций и технологий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gu Z., Dai Q., Huang W., Wang X. Effect of surface topography and roughness on the leakage of static seals. Surface Topography: Metrology and Properties. 2024. Vol. 12. DOI: 10.1088/2051-672X/ad4570.

2. Mane L., Bhat M. Effects of Surface Roughness in Adhesively Bonded CFRP Joints Using NDE. Journal of Nondestructive Evaluation. 2024. Vol. 43. DOI: 10.1007/s10921-024-01081-w.

3. Massey J.M.O., Bharathram G., Weymouth G. A systematic investigation into the effect of roughness on self-propelled swimming plates. Journal of Fluid Mechanics. 2023. Vol. 971. DOI: 10.1017/jfm.2023.703.

4. Vilumbrales G. R., Kurt M., Weymouth G., Bharathram G. Effects of surface roughness on the propulsive performance of pitching foils. Journal of Fluid Mechanics. 2024. Vol. 982. DOI: 10.1017/jfm.2023.1009

5. Chen J., Lin J., Zhang M., Qizhe L. Predicting surface roughness in turning complex-structured workpieces using vibration-signal-based Gaussian process regression. Sensors. 2024. Vol. 24. DOI: 10.3390/s24072117.

6. Fenercioğlu T.O., Sariyarlioglu E., Adigüzel E., Şimşek A., Koltan U., Yalcinkaya T. Influence of increased die surface roughness on the product quality in rotary swaging. Conference: Material Forming. 2023, pp. 899-908. DOI: 10.21741/9781644902479-98.

7. Лелюхин В. Теория синтеза методов формообразования поверхностей детали. Германия. Издательский Дом: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 80 с.

8. Lelyukhin V. E., Kolesnikova O. V., Kuzminova T. A. Classification of methods for forming surfaces when machining parts on machine tools. International Science and Technology Conference "EastConf". Vladivostok, Russia. 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/EASTCONF.2019.8725366.

9. Buj I., Sivatte-Adroer M. Multi-objective optimization of material removal rate and tool wear in rough honing processes. Machines. 2022. Vol. 10 (2). ID 83. DOI: 10.3390/machines10020083.

10. Бобровский И.Н. Физический коэффициент профиля и его применение для моделирования текстуры механически обработанной поверхности. // Frontier Materials & Technologies. 2023. № 3. С. 9–17. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-3-65-1.

11. Hoang V., Tuan N., Minh Q.D. Investigating the effect of cutting parameters on surface roughness and flank wear in the interrupted hard turning of hardened SKD 11 Steel using high CBN inserts. International Journal of Advanced Engineering Research and Applications. 2020. Vol. 6, pp. 48-54. DOI: 10.46593/ijaera.2020.v06i03.001.

12. Пермякова К.Н. Анализ классификаций методов формообразования поверхностей при механической обработке деталей // Молодежь и научно-технический прогресс: материалы региональной научно-практической конференции (Владивосток, май – июнь 2023г.) Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2023. https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/298/zx0nd99v2m31zbmfacgl7fkl3608l2qt/Сборник%20МНТП%202023.pdf (дата обращения 07.11.2023).

13. Лелюхин В. Е., Колесникова О. В. Метод формального проектирования технологии обработки на станках деталей судовых машин // Морские интеллектуальные технологии. 2021. №4, Т.3. С.39-46.

14. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V., Permyakova K.N. Geometry problems in formalizing the creation of machining processes on machine tools. Digital Manufacturing Technology. 2023. Vol. 3(2), pp. 91–105. DOI: 10.37256/dmt.3220232865.

15. Maqsood S., Abbas M., Miura K.T., Majeed A. Bibi S., Nazir T. Geometric modeling of some engineering GBT-Bézier surfaces with shape parameters and their applications. Adv Differ Equ. 2021. Vol. 490. DOI: 10.1186/s13662-021-03643-y.

16. Min K., Lee CH., Yan C., Fan W., Hu P. Six-dimensional B-spline fitting method for five-axis tool paths. Int J Adv Manuf Technol. 2020. Vol. 107, pp. 1–14. DOI: 10.1007/s00170-020-05139-7.

17. Kuşak Samanci H. The Serre-Frenet frame of rational Bézier curves in the Euclidean-3 space by algorithm method. Journal of Science and Arts. 2021. Vol. 21, pp. 721-748. DOI: 10.46939/J.Sci.Arts-21.3-a12.

REFERENCES

18. Gu Z., Dai Q., Huang W., Wang X. Effect of surface topography and roughness on the leakage of static seals. Surface Topography: Metrology and Properties. 2024. Vol. 12. DOI: 10.1088/2051-672X/ad4570.

19. Mane L., Bhat M. Effects of Surface Roughness in Adhesively Bonded CFRP Joints Using NDE. Journal of Nondestructive Evaluation. 2024. Vol. 43. DOI: 10.1007/s10921-024-01081-w.

20. Massey J.M.O., Bharathram G., Weymouth G. A systematic investigation into the effect of roughness on self-propelled swimming plates. Journal of Fluid Mechanics. 2023. Vol. 971. DOI: 10.1017/jfm.2023.703.

21. Vilumbrales G. R., Kurt M., Weymouth G., Bharathram G. Effects of surface roughness on the propulsive performance of pitching foils. Journal of Fluid Mechanics. 2024. Vol. 982. DOI: 10.1017/jfm.2023.1009

22. Chen J., Lin J., Zhang M., Qizhe L. Predicting surface roughness in turning complex-structured workpieces using vibration-signal-based Gaussian process regression. Sensors. 2024. Vol. 24. DOI: 10.3390/s24072117.

23. Fenercioğlu T.O., Sariyarlioglu E., Adigüzel E., Şimşek A., Koltan U., Yalcinkaya T. Influence of increased die surface roughness on the product quality in rotary swaging. Conference: Material Forming. 2023, pp. 899-908. DOI: 10.21741/9781644902479-98.

24. Lelyukhin V.E. *Teoriya sinteza metodov formoobrazovaniya poverhnostey detail* [The theory of synthesis of methods for shaping the surfaces of a part]. Germany. LAP LAMBERT Publ. Academic Publishing. 2015. 80 p.

25. Lelyukhin V. E., Kolesnikova O. V., Kuzminova T. A. Classification of methods for forming surfaces when machining parts on machine tools. International Science and Technology Conference "EastConf". Vladivostok, Russia. 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/EASTCONF.2019.8725366.

26. Buj I., Sivatte-Adroer M. Multi-objective optimization of material removal rate and tool wear in rough honing processes. Machines. 2022. Vol. 10 (2). ID 83. DOI: 10.3390/machines10020083.

27. Bobrovskiy I.N. *Fizicheskiy koeffitsient profilya I ego primenenie dlya modelirovaniya tekstury mekhanicheski obrabotannoy poverhnosti* [The profile physical coefficient and its application for modelling the machined surface texture]. Frontier Materials & Technologies, 2023. No. 3, pp. 9–17. DOI: 10. 18323/2782-4039-2023-3-65-1.

28. Hoang V., Tuan N., Minh Q.D. Investigating the effect of cutting parameters on surface roughness and flank wear in the interrupted hard turning of hardened SKD 11 Steel using high CBN inserts. International Journal of Advanced Engineering Research and Applications. 2020. Vol. 6, pp. 48-54. DOI: 10.46593/ijaera.2020.v06i03.001.

29. Permyakova K.N. *Analiz klassifikatsiy metodov formoobrazovaniya poverhnostey pri mekhanicheskoy obrabotke detaley* [Analysis of classifications of surface shaping methods during machining of parts]. *Molodezh I nauchno-tekhnicheskiy progress: Materialy regionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii.* Vladivostok: FEFU, 2023. Available at: https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/298/zx0nd99v2m31zbmfacgl7fkl3608l2qt/Сборник%20МНТП%202023.pdf

30. Lelyukhin V. E., Kolesnikova O. V. *Metod formalnogo proektirovaniya tekhnologii obrabotki na stankah detaley sudovyh mashin* [Method of formal design of technology for processing ship machine parts on machine tools]. *Marine intellectual technologies.* 2021. No. 4, Vol.31, pp. 39-46.

31. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V., Permyakova K.N. Geometry problems in formalizing the creation of machining processes on machine tools. Digital Manufacturing Technology. 2023. Vol. 3(2), pp. 91–105. DOI: 10.37256/dmt.3220232865.

32. Maqsood S., Abbas M., Miura K.T., Majeed A. Bibi S., Nazir T. Geometric modeling of some engineering GBT-Bézier surfaces with shape parameters and their applications. Adv Differ Equ. 2021. Vol. 490. DOI: 10.1186/s13662-021-03643-y.

33. Min K., Lee CH., Yan C., Fan W., Hu P. Six-dimensional B-spline fitting method for five-axis tool paths. Int J Adv Manuf Technol. 2020. Vol. 107, pp. 1–14. DOI: 10.1007/s00170-020-05139-7.

34. Kuşak Samanci H. The Serre-Frenet frame of rational Bézier curves in the Euclidean-3 space by algorithm method. Journal of Science and Arts. 2021. Vol. 21, pp. 721-748. DOI: 10.46939/J.Sci.Arts-21.3-a12.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колесникова Ольга Валерьевна – кандидат технических наук, доцент, профессор департамента Департамент компьютерно-интегрированных производственных систем, Дальневосточный федеральный университет (Кампус ДВФУ, п. Аякс, 10, Русский остров, Владивосток, Россия, e-mail: miis@mail.ru)

Лелюхин Владимир Егорович – кандидат технических наук, доцент, профессор департамента Департамент компьютерно-интегрированных производственных систем

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kolesnikova Olga Valerievna – Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., Prof. of the Computer-Integrated Production Systems Department, Far Eastern Federal University (FEFU Campus, Ajax village, 10, Russky Island, Vladivostok, Russia,, e-mail: miis@mail.ru).

Lelyukhin Vladimir Egorovich – Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., Prof. of the Computer-Integrated Production Systems Department, Far Eastern Federal University (FEFU Campus, Ajax

Дальневосточный федеральный университет (Кампус ДВФУ, п. Аякс, 10, Русский остров, Владивосток, Россия, e-mail: lelv0@mail.ru)

Пермякова Кристина Николаевна – студент, Дальневосточный федеральный университет (Кампус ДВФУ, п. Аякс, 10, Русский остров, Владивосток, Россия, e-mail: kristinapermyakova3@gmail.com)

village, 10, Russky Island, Vladivostok, Russia,, e-mail: lelv0@mail.ru).

Permyakova Kristina Nikolaevna – student, Far Eastern Federal University (FEFU Campus, Ajax village, 10, Russky Island, Vladivostok, Russia, e-mail: kristinapermyakova3@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 15.05.2024; одобрена после рецензирования 30.05.2024, принята к публикации 01.06.2024.
The article was submitted 15.05.2024; approved after reviewing 30.05.2024; accepted for publication 01.06.2024.