

Классификация методов формообразования и синтез на ее основе схем обработки профильных моментопередающих поверхностей

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾,
магистр техн. наук А. А. Данилов¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Дана характеристика известных классификаций методов формообразования поверхностей в машиностроении при механической и физико-технической обработке, согласно которым метод формообразования поверхности рассматривается как сочетание методов формирования ее производящих линий – образующей и направляющей – при условии, что темп генерации образующей выше, чем направляющей. Показаны преимущества построения классификации и формализованного описания методов формообразования поверхностей; каждый из них представляет сочетание методов формирования поверхности в поперечном сечении и по длине независимо от скорости генерации образующей и направляющей линий. Это повышает информативность описания метода формообразования, что важно для сравнения методов формообразования поверхностей и синтеза схем их обработки при функциональном проектировании станка. Отмечена целесообразность введения, по сравнению с известной классификацией А. А. Федотенка, в множество базовых методов формирования производящих линий (копированием, следом, касанием и обкатом) методов огибания, прерывистого следа и прерывистого обката, а также комбинированных, объединяющих преимущества образующих их базовых методов, что расширяет возможности синтеза прогрессивных схем обработки профильных поверхностей. Исходя из расширенного множества базовых методов и принятого принципа представления методов формообразования профильных поверхностей разработана их классификация как основа систематизации известных и синтеза возможных методов формообразования. Рассмотрены примеры синтеза на базе предложенной классификации рациональных методов формообразования, а на их основе – прогрессивных схем обработки профильных моментопередающих поверхностей. В частности, использование метода огибания вместо применяемого метода обката позволяет существенно упростить конструкцию инструмента, повысить его универсальность и точность формообразования моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело.

Ключевые слова: профильная поверхность, производящие линии, методы формообразования и обработки, формализованное описание, синтез, классификация, реализация на станках, треугольник Рело

Для цитирования: Пантелеенко, Ф. И. Классификация методов формообразования и синтез на ее основе схем обработки профильных моментопередающих поверхностей / Ф. И. Пантелеенко, А. А. Данилов // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 280–287. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-280-287>

Classification of Formation Methods and Synthesis of Schemes for Processing Profile Moment-Transmitting Surfaces Based on the Classification

F. I. Panteleenko¹⁾, A. A. Danilov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents characteristics of the known classifications of surface shaping methods in mechanical engineering during mechanical and physical-technical processing; according to the classifications a surface shaping method is considered

Адрес для переписки

Пантелеенко Федор Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-71
Niil_svarka@bntu.by

Address for correspondence

Panteleenko Fedor I.
Belarusian National Technical University
24, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-71
Niil_svarka@bntu.by

as a combination of methods for generating its producing lines – generatrix and guide – provided that the generation rate of the generatrix is higher than the guide. The advantages of constructing a classification and a formalized description of surface shaping methods have been shown in the paper; each of them represents a combination of surface formation methods in cross section and in length, regardless of generation speed for generatrix and guide lines. This increases information content of the description for a shaping method which is important for comparing methods of shaping surfaces and synthesis of schemes for their processing in the functional design of the machine. The paper has revealed the fact that in comparison with the well-known classification of A. A. Fedotenka it is an expedient to introduce methods of bending, intermittent track and intermittent rolling, as well as combined methods combining advantages of their basic methods which expand the synthesis of progressive processing schemes for profile surfaces. The introduction of the methods has been made in many basic methods of generating production lines (copying, following, touching and rolling). Based on the expanded set of basic methods and the accepted principle of presenting the methods of shaping profile surfaces, their classification has been developed as the basis for systematization and synthesis of known and possible shaping methods. The paper considers examples of rational shaping method synthesis based on the proposed classification and progressive processing schemes for profile moment-transmitting surfaces on the basis of synthesis examples. In particular, the use of an envelope method instead of the applied rolling method has made it possible to simplify significantly a tool design, to increase its versatility and accuracy in formation of moment-transmitting surfaces with a profile in the form of a Relo triangle.

Keywords: profile surface, production lines, shaping and processing methods, formalized description, synthesis, classification, implementation on machines, Relo triangle

For citation: Panteleenko F. I., Danilov A. A. (2020) Classification of Formation Methods and Synthesis of Schemes for Processing Profile Moment-Transmitting Surfaces Based on the Classification. *Science and Technique*. 19 (4), 280–287. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-280-287> (in Russian)

Введение

Анализ известных и возможных методов формообразования и кинематических схем обработки профильных моментопередающих поверхностей (ПМП), учитывая их многообразие, должен базироваться на единой основе, которой является теория формообразования поверхностей. В разработку такого подхода существенный вклад внесли: академики Г. И. Грановский [1] и Е. Г. Коновалов [2]; профессора А. И. Голембиевский [3], Б. А. Перепелица [4], Н. Н. Попок [5], С. П. Радзевич [6], П. Р. Родин [7], А. А. Федотенок [8] и другие ученые. Известные научные положения в рассматриваемой области должны применяться и дополняться с учетом решаемых задач, что относится, в частности, к методам формообразования и обработки ПМП.

Актуальность решения этой задачи обусловлена необходимостью систематизации множества известных и возможных методов формообразования ПМП для их анализа, выбора или синтеза рациональных. Это позволит оценивать различные методы с общих позиций, характеризующих их возможности по универсальности, точности и производительности формообразования, сложности реализации и по другим признакам, важным для выбора рационального метода решения конкретной задачи [9]. Мето-

дологической основой ее решения является положение теории формообразования поверхностей, согласно которому метод формообразования поверхности определяется сочетанием методов формирования ее производящих линий – образующей и направляющей [2, 8].

Характеристика известных классификаций методов формообразования поверхностей

В соответствии с моделью формообразования, разработанной А. А. Федотенком, каждая из производящих линий поверхности может быть образована методами копирования (Кп), следа (Сл), касания (Кс) и обката (Об), которые положены в основу предложенной им классификации методов формирования поверхностей в машиностроении [8]. Классификация Е. Г. Коновалова [2] учитывает характер формирования производящих линий во времени (единовременный Е, непрерывный Н, прерывистый П) при условии, что темп формирования образующей выше, чем направляющей.

Основанные на этих моделях известные схемы формализованного представления методов формообразования поверхностей отражают возможные сочетания указанных методов генерации производящих линий. В обеих классификациях принято, что на первом месте в обозна-

чении метода формообразования поверхности указывается метод формообразования линии, осуществляемый с большей скоростью, независимо от того, к какой производящей линии поверхности он относится – к профилю (поперечному сечению) или к линии, определяющей форму поверхности по длине, например Кп–Сл, Кп–Кс – для геометрических схем или соответственно Е–Н, Е–П – для временных схем формообразования.

Такое представление метода формообразования поверхности недостаточно информативно, поскольку одно его обозначение без графического изображения не дает представления о схеме обработки. Например, обозначение Кп–Сл одинаково для различных технологических методов обработки некруглых поверхностей – протягивания отверстия и точения методом врезания. В этой связи применительно к некруглой цилиндрической или конической поверхности метод ее формообразования предпочтительно рассматривать как сочетание методов ее профилирования в сечении, перпендикулярном оси поверхности, и формирования ее по длине [5] независимо от скорости их генерации. В данном случае формообразование поверхности протягиванием обозначается как Кп–Сл, а точением – как Сл–Кп. При таком представлении метода формообразования поверхности однозначно задаются методы формирования обеих ее производящих линий, что необходимо для синтеза схем их обработки и проектирования кинематики станка. При этом целесообразно рассматривать не только базовые, но и комбинированные методы формообразования производящих линий [10].

Особенности предлагаемой классификации методов формообразования поверхностей

Известная классификация методов формообразования поверхностей в машиностроении [8] не учитывает возможность дискретного формирования производящих линий методами прерывистого следа Слⁿ и прерывистого обката Обⁿ. При формировании профиля поверхности этими методами, а ее формы по длине – базовыми методами следа, касания и обката образуются

следующие возможные методы формообразования ПМП: Слⁿ–Слⁿ, Слⁿ–Кс, Слⁿ–Об (Слⁿ – непрерывный след). Таким образом, дополнение указанными методами известной классификации методов формообразования поверхностей расширяет их множество, что может быть основой синтеза новых схем обработки ПМП. С этой же целью целесообразно включить в классификацию комбинированные методы формирования производящих линий поверхности, основанные на сочетании базовых методов, что позволит объединить их преимущества. Например, формирование по длине (направляющей) некруглой цилиндрической поверхности комбинированным методом Кп + Сл, реализуемым при точении резцом с прямолинейной переходной режущей кромкой, исключает без введения дополнительных движений образование гребней (не срезанной части припуска), характерных для формообразования направляющей методом следа.

Далее в базовые методы формообразования производящих линий (копирования, следа, касания и обката), на которых основана классификация [8], следует ввести метод огибания (Ог), где производящая линия номинальной поверхности представляет собой огибающую множества вспомогательных линий – положений режущей кромки инструмента [5]. При круговой форме режущей кромки линия формируется методом огибания при перемещении центра окружности, ограничивающей режущую кромку, вдоль линии, эквидистантой образуемой линии. Так формируется, например, образующая криволинейной поверхности вращения при ее точении резцом с круговой режущей кромкой.

Метод огибания отличается от метода обката тем, что форма режущей кромки инструмента не зависит от параметров формируемой линии. Это упрощает реализацию метода обработки и повышает универсальность режущего инструмента, так как одним производящим элементом, например окружностью, можно формировать разные поверхности.

При методе же обката форма режущей кромки определяется геометрией формируемой линии, поскольку в процессе обработки этим методом на станке воспроизводится относи-

тельное перемещение двух аксоидов [7], форма и параметры которых зависят от геометрии формируемой поверхности и инструментальной поверхности. Поэтому осуществление метода обката (центроидного огибания) зачастую связано с применением инструмента с криволинейными режущими кромками переменной кривизны, например специального долбяка для обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело [11], вследствие чего усложняется реализация метода обработки и повышается себестоимость изделия.

При замене метода обката методом огибания существенно упрощается форма производящих элементов инструмента, например криволинейные режущие кромки переменной кривизны можно заменить прямолинейными или круговыми, что позволяет оснащать инструмент сменными многогранными или круглыми режущими пластинками. На этом основаны но-

вые способы обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежных станках [12].

Профилирование ПМП в общем случае возможно методом копирования, который широко применяется для обработки некруглых отверстий. Учитывая, что наружные поверхности деталей профильных моментопередающих соединений имеют регулярный профиль, возможно формирование методом копирования не всего профиля поверхности, а только одного из его конгруэнтных участков. В этом случае для формирования всего профиля необходимо движение деления. Такой метод профилирования обозначим $Kп^д$ – копирование с делением. С учетом изложенного на базе классификации методов формообразования поверхностей в машиностроении [8] разработана классификация методов формообразования ПМП (табл. 1).

Таблица 1

Классификация методов формообразования профильных поверхностей и реализующие их технологические методы обработки
Classification of methods for forming profile surfaces and technological processing methods that implement them

| | | Метод формирования поверхности по длине | | | | |
|--|--------|---|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---|
| | | Кп | Сл | Кс | Об | Комбинированный Кп + Сл |
| Метод формирования профиля поверхности | Кп | Методы физико-технической обработки | Протягивание Дорнование | | | Дорнование |
| | $Kп^д$ | Методы физико-технической обработки | Строгание Выглаживание | Фрезерование Шлифование | Накатывание роликом | Выглаживание Суперфиниширование |
| | $Сл^д$ | Точение Выглаживание | Точение Выглаживание | | | Точение резцом с переходной режущей кромкой |
| | $Сл^п$ | Фрезоточение | Долбление Полигональное точение | Фрезерование Шлифование | | Полигональное точение |
| | Кс | Фрезерование Шлифование | Фрезерование Шлифование | Фрезерование | | |
| | $Об^д$ | Накатывание | Обкатное точение Выглаживание | Шлифование червячным кругом | Накатывание шариком | Выглаживание |
| | $Об^п$ | | Долбление Выглаживание | Фрезерование червячной фрезой | | |
| | Ог | | Долбление Выглаживание | Фрезерование Шлифование | Накатывание шариком, роликом | |

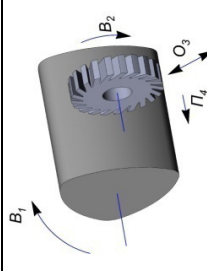
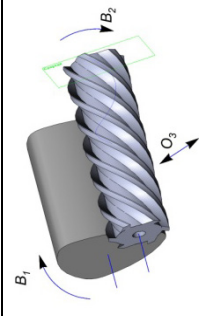
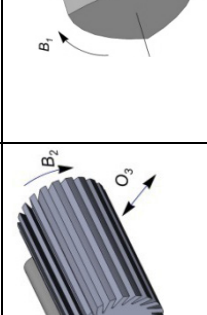
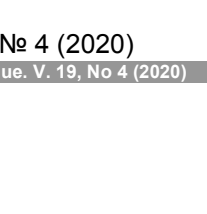
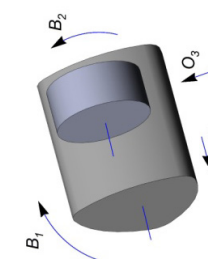
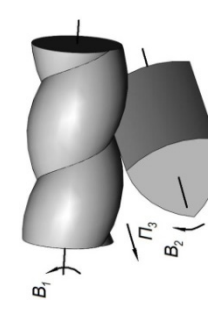
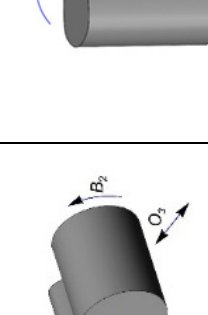


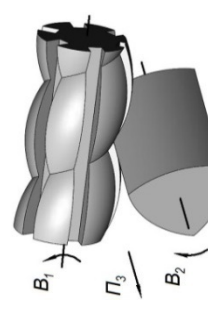
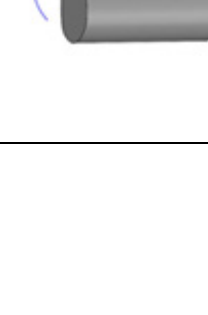


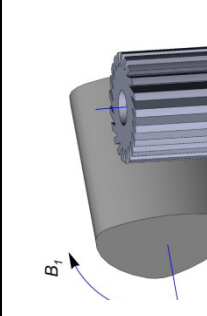
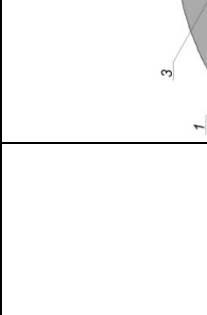

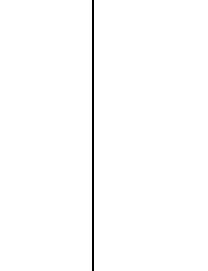
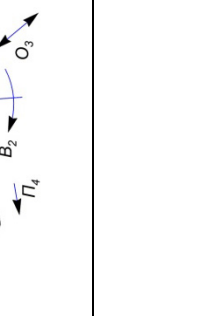
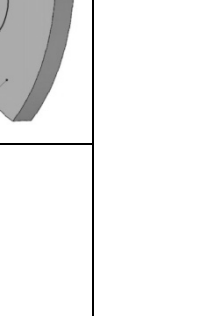
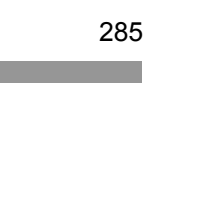
Таблица 2

Методы формообразования и реализующие их схемы обработки профильных моментопередающих поверхностей
Forming methods and schemes for processing profile moment-transmitting surfaces that implement them

| Метод формирования поверхности по длине | | | | | |
|---|-----|----|----|----|-----------------------------|
| | Клп | Сл | Кс | Об | Комбинированный Клп + Сл |
| Клп | | | | | |
| Клп ^{II} | | | | | |
| Слп ^{II} | | | | | |
| Слп ^{III} | | | | | |

Метод формирования профиля поверхности

Окончание таблицы 2

| | | Метод формирования поверхности по длине | | | |
|------------------|---------|---|--|---|---|
| | | Кп | Сл | Кс | Об |
| | Кп + Сл |  |  |  |  |
| | Об |  |  |  |  |
| | Кс |  |  |  |  |
| | Кп |  |  |  |  |
| Кс | |  |  |  |  |
| Об ^{II} | | | | | |
| Об ^{II} | | | | | |
| Об ^{II} | | | | | |
| Об ^{II} | | | | | |

Метод формирования профиля поверхности

Классификация как основа синтеза методов формообразования и схем обработки профильных моментопередающих поверхностей

Синтез метода формообразования ПМП с использованием предложенной классификации включает задание метода формирования ее профиля (выбирается из первого вертикального столбца табл. 1, например, Сл^п или Об^п) и метода формирования поверхности по длине (выбирается из верхней строки табл. 1, например, Сл^п). Комбинацией методов формирования производящих линий образуется соответствующий метод формообразования, например Сл^п–Сл^п, Об^п–Сл^п, при этом в отличие от классификаций [2, 8] на первом месте указывается метод формирования профиля поперечного сечения поверхности независимо от скорости его генерации по сравнению со скоростью формообразования поверхности в продольном направлении. Такое представление метода формообразования поверхности предпочтительнее при выборе технологического метода обработки, проектировании станка и инструмента для его реализации.

В табл. 1 для образуемых таким образом методов формообразования ПМП указаны соответствующие им возможные технологические методы обработки (фрезерование, долбление и др.), графическая иллюстрация некоторых из них в виде кинематических схем обработки представлена в табл. 2. Использование при синтезе методов формообразования ПМП указанных выше дополнительных методов формирования производящих линий существенно расширяет множество анализируемых вариантов и возможности синтеза новых методов формообразования.

Например, формирование профиля поверхности методом прерывистого следа Сл^п в сочетании с формированием ее по длине методом непрерывного следа Сл^п положено в основу предложенного способа обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело долблением (метод формообразования Сл^п–Сл^п) [12]. Аналогично на сочетании метода профилирования поверхности огибанием и формирования ее по длине методом непрерывного следа (формообразование поверхности методом Ог–Сл^п) основан признанный изобретением способ обработки ПМП с таким профилем инструментом с круговыми режущими кромками [12].

Оба способа по сравнению с известным [11], основанным на методе формообразования Об^п–Сл^п, реализуются более простыми

режущими инструментами при исключении влияния формы режущих кромок инструмента на геометрию формируемого профиля, что повышает его точность. Эти способы положены в основу технологий обработки поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на универсальном зубодолбежном станке обкатного типа [12].

Таким образом, предложенная классификация, отражая известные и возможные методы формообразования ПМП, является инструментом как систематизации, так и синтеза технологических методов и кинематических схем их обработки.

Следует отметить, что многообразие методов формообразования и кинематических схем обработки ПМП обусловлено типом поверхности изделия (открытая, полукрытая, закрытая [13]) и требованиями к качеству и точности обработки. Например, открытая ПМП с профилем в виде треугольника Рело может быть сформирована высокопроизводительным методом Кп^п–Кс, которому, как показано в табл. 1, 2, соответствуют технологические методы обработки фрезерованием и шлифованием. Эти два метода технически просто реализуются на универсальных станках с делительным устройством, например, фрезерованием на горизонтально-фрезерном станке или шлифованием на плоскошлифовальном станке соответствующими фасонными инструментами. В обоих случаях инструментальная поверхность профилируется по окружности, радиус которой равен ширине треугольника Рело.

Обработка же полукрытой поверхности с таким профилем, когда конструкция детали не позволяет применять указанные методы обработки вращающимися инструментами, возможна долблением при профилировании методами обката (Об) и огибания (Ог) (табл. 1, 2) [12] или круговым точением при формировании поверхности методом двойного следа [14].

ВЫВОДЫ

1. Многообразие известных и возможных методов обработки профильных моментопередающих поверхностей обуславливает актуальность исследований, обеспечивающих систематизацию, анализ и синтез рациональных методов их формообразования как основу прогрессивных технологий обработки таких поверхностей.

2. Предложенная классификация позволяет систематизировать известные методы формо-

образования профильных моментопередающих поверхностей, а также является основой синтеза новых решений. Это достигнуто за счет введения в множество известных базовых методов формообразования производящих линий методов прерывистого следа, огибания, комбинированных и др.

3. Установленные на основе предложенной классификации рациональные методы формообразования профильных моментопередающих поверхностей при профилировании методами прерывистого следа и огибания положены в основу прогрессивной технологии обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело, реализованной на зубодолбежном станке для обработки деталей профильных моментопередающих соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский, Г. И. Кинематика резания / Г. И. Грановский. М.: Машгиз, 1948. 199 с.
2. Коновалов, Е. Г. Основы новых способов металлообработки / Е. Г. Коновалов. Минск: Изд-во АН БССР, 1961. 297 с.
3. Голембиевский, А. И. Системология способов формирующей обработки в машиностроении / А. И. Голембиевский. Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2017. 236 с.
4. Перепелица, Б. А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием / Б. А. Перепелица. Харьков: Вища шк., Изд-во при Харьк. ун-те, 1981. 152 с.
5. Попок, Н. Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства / Н. Н. Попок. Минск: Технопринт, 2001. 396 с.
6. Радзевич, С. П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории / С. П. Радзевич. Киев: Растан, 2001. 592 с.
7. Родин, П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П. Р. Родин. Киев: Вища шк., 1977. 192 с.
8. Федотенок, А. А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А. А. Федотенок. М.: Машиностроение, 1970. 403 с.
9. Пантелеенко, Ф. И. Системный анализ и синтез рациональных методов профилирования некруглых поверхностей / Ф. И. Пантелеенко, А. А. Данилов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4, № 1. С. 59–64.
10. Данилов, В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В. А. Данилов. Минск: Наука и техника, 1995. 264 с.
11. Панкратов, П. А. Разработка эффективного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей по методу обкатывания / П. А. Панкратов. Курск: Юго-Запад. гос. ун-т, 2013. 20 с.
12. Пантелеенко, Ф. И. Обработка моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке / Ф. И. Пантелеенко, А. А. Данилов, И. К. Карась // Горная механика и машиностроение. 2018. № 4. С. 59–65.
13. Махаринский, Е. И. Основы технологии машиностроения / Е. И. Махаринский, В. А. Горохов. Минск: Вышэйш. шк., 1997. 386 с.
14. Пантелеенко, Ф. И. Анализ и реализация схем формирования профиля поверхности в виде треугольника Рело методом непрерывного следа / Ф. И. Пантелеенко, А. А. Данилов // Машиностроение: республ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2018. Вып. 31. С. 203–212.

Поступила 12.03.2020

Подписана в печать 29.05.2020

Опубликована онлайн 30.07.2020

REFERENCES

1. Granovskii G. I. (1948) *Kinematics of Cutting*. Moscow, Mashgiz Publ. 199 (in Russian).
2. Konovalov E. G. (1961) *Fundamentals of New Metalworking Methods*. Minsk, Publishing House of Academy of Sciences of the Belarussian Soviet Socialist Republic. 297 (in Russian).
3. Golembievskii A. I. (2017) *Systemology of Forming Processing Methods in Mechanical Engineering*. Novopolotsk, Polotsk State University. 236 (in Russian).
4. Perepelitsa B. A. (1981) *Mapping of Affine Space in the Theory of Surface Shaping by Cutting*. Kharkov, Vishcha Shkola Publ., Publishing House at Kharkov University. 152 (in Russian).
5. Popok N. N. (2001) *Mobile Reorganization of Mechanical Engineering Production*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 396 (in Russian).
6. Radzevich S. P. (2001) *Surface Shaping of Parts. Foundations of Theory*. Kiev, Rastan Publ. 592 (in Russian).
7. Rodin P. R. (1977) *Fundamentals of Surface Shaping by Cutting*. Kiev, Vishcha Shkola Publ. 192 (in Russian).
8. Fedotenok A. A. (1970) *Kinematic Structure of Machine Tools*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 403 (in Russian).
9. Panteleenko F. I., Danilov A. A. System Analysis and Synthesis of Rational Methods for Profiling Non-Circular Surfaces. *Aktual'nye Problemy v Mashinostroenii = Actual Problems in Machine Building*, 4 (1), 59–64 (in Russian).
10. Danilov B. A. (1995) *Forming Processing of Complex Surfaces by Cutting*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 264 (in Russian).
11. Pankratov P. A. (2013) *Development of Effective Mortising tool for Processing Complex Curved Surfaces by Rolling Method*. Kursk, Southwest State University. 20 (in Russian).
12. Panteleenko F. I., Danilov A. A., Karas I. K. (2018) Processing of Torque-Transmitting Surfaces with a Profile in the Form of a Relo Triangle on a Gear-Shaping Machine. *Gornaya Mekhanika i Mashinostroyeniye = Mining Mechanical Engineering and Machine-Building*, (4), 59–65 (in Russian).
13. Makharsinskii E. I., Gorokhov V. A. (1997) *Fundamentals of Mechanical Engineering Technology*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 386 (in Russian).
14. Panteleenko F. I., Danilov A. A. (2018) Analysis and Implementation of Schemes for Forming A Surface Profile in the Form of a Relo Triangle by Continuous Trace Method. *Mashinostroenie: Respubl. Mezhd. Sb. Nauch. Tr.* [Mechanical Engineering: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarussian National Technical University, (31), 203–212 (in Russian).

Received: 12.03.2020

Accepted: 29.05.2020

Published online: 30.07.2020