

ПРОФИЛИРОВАНИЕ РОЛИКОВ ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГОФРИРОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ НА ЛЕНТЕ ТЕПЛООБМЕННИКА ДЛЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБ

Ю.В. Щипкова
А.Ю. Попов

ylia_sipkova@mail.ru
popov_a_u@list.ru

Омский государственный технический университет,
г. Омск, Российская Федерация

Аннотация

Эффективность работы регенеративных теплообменников с теплоаккумулирующими насадками, изготовленными из свернутых в рулон гофрированных лент, зависит от их гофрированного профиля. Получить гофры заданной формы методом копирования (штамповкой) технологически достаточно сложно. Технически целесообразнее формировать такой профиль накатыванием между двумя роликами. Площадь контакта получается меньше, а контактное давление существенно выше. В этом случае форма и точность профиля ленты определяются точностью расчета и изготовления профиля накатных роликов. От диаметра роликов зависят длина зоны профилирования и контактное давление. Для применения известных методик профилирования при расчете гофрированного профиля роликов необходимо найти положение центроиды. Однако сложность заключается в том, что между роликами находится лента, толщиной которой невозможно пренебречь. Поэтому задача решена как обкат ролика и рейки, где в качестве рейки рассмотрена лента с сформированным на ней профилем. Приведена методика профилирования роликов с учетом указанных факторов. При профилировании роликов учтено пружинение ленты. Определен целесообразный диаметр роликов. Разработана методика расчета профиля гофров роликов с учетом установленных параметров (диаметров центроиды и роликов) и величины коррекции профиля зубьев роликов в зависимости от пружинения ленты при накатывании

Ключевые слова

Профилирование, ролик, накатывание, гофрированная лента, центроида, профиль зуба, инструмент, пружинение

Поступила 15.10.2020
Принята 25.11.2020
© Автор(ы), 2021

Введение. Основным способом испытания конструкций летательных аппаратов является реальный эксперимент, проводимый в аэродинамических трубах с симуляцией реальных условий. Для создания необходимых усло-

вий требуется нагрев рабочего газа до определенных температурных значений с помощью нагревателя. Рассмотрим профилирование роликов для формообразования гофрированной ленты при изготовлении насадки регенеративного нагревателя, которая представляет собой цилиндр из намотанной на сердечник гофрированной ленты с заданными параметрами [1].

В Омском государственном техническом университете по заказу ЦАГИ разрабатывается технология и производятся инструмент, оснастка и оборудование для изготовления нагревательных элементов теплоаккумулирующих насадок, работающих при температуре до 1000 °С, что и определяет выбор материала нагревательных элементов.

Требованиям по свойствам удовлетворяет коррозионно-стойкая сталь X18H10T. Толщина ленты определена заказчиком в пределах 0,35...0,4 мм. Угол профиля рифлений выполнен в пределах 90...120°. Погрешность профиля рифлений составляет $\pm 2^\circ$. Угол наклона рифлений относительно оси ленты равен 5...10°. Эта проблема при профилировании решена за счет задания размеров рифлений на ленте и роликах в нормальном, а не торцевом сечении. Технология накатывания гофров разработана в Омском государственном техническом университете и имеет технологические особенности и ограничения. Сложность изготовления гофрированной ленты определяется механическими свойствами материала, созданием достаточных контактных давлений при накатывании и пружинением ленты.

Наиболее производительный способ — это накатывание гофров на ленте между двумя роликами по следующей схеме: один ролик приводной, второй — свободно вращающийся, лента свободно движется между роликами. Гофры получают способом свободного обката.

Постановка задачи. Кинематика процесса накатывания гофров ленты между двумя роликами схожа с кинематикой процесса нарезания деталей с неэвольвентным профилем способом обката, но имеет характерные особенности — положение центроиды определяется не настройками станка, а конфигурацией профиля детали; на процесс накатывания и размеры профиля инструмента влияют факторы, характерные для пластической деформации.

В связи с этим для разработки методики профилирования накатных роликов необходимо определить положение центроид и величину пружинения стали при заданных параметрах гофров ленты.

Проектирование роликов. Операция обкатки связана с необходимостью профилирования зубьев роликов и учета величины пружинения ленты в процессе деформирования. Задача определения профиля такого инструмента решена в [2].

В настоящее время существуют следующие основные методы определения профиля инструмента: аналитический [3], графический [4] и графоаналитический [5].

Современное программное обеспечение позволяет комбинировать графический и аналитический методы для получения теоретически точного профиля инструмента. На их основе разработано большое число методик профилирования инструментов, позволяющих с той или иной точностью и трудоемкостью определять профиль винтовой поверхности роликов для накатывания гофров.

Формообразование поверхностей деталей с неэвольвентным профилем происходит путем огибания семейства профилей последовательного положения зуба ролика [7–12].

В последнее время для моделирования формообразования поверхностей активно и успешно применяются современные компьютерные технологии [13–17], что позволяет достаточно точно моделировать процесс графическим или графоаналитическим методом.

Необходимо отметить, что при проектировании накатных роликов имеет значение выбор положения центроиды инструмента и изделия, поскольку именно от этого зависит траектория движения зуба ролика. При положении центроиды в теле инструмента вершина зуба накатного ролика совершает петлеобразные движения, вызывая «подрезы» во впадине и прочие искажения профиля гофров ленты, тем самым нарушая требования по точности изготовления. Это побочный эффект способа свободного обката. Исходя из этого выдвинута гипотеза о положении центроиды на наружном диаметре ролика, при котором исключается кинематическое искажение. При обкатывании двух шестерен расположить центроиды на наружных диаметрах роликов теоретически невозможно, но при наличии промежуточной ленты между ними — возможно, поскольку в таком случае обкатывание рассматривается как зацепление двух шестерен с одной рейкой. Однако данная гипотеза нуждается в экспериментальном подтверждении.

Для изготовления ленты с шагом и высотой гофров 45 и 20 мм при моделировании процесса обката для лезвийных инструментов спроектированы и изготовлены накатные ролики с условием положения центроиды на наружном диаметре.

Параметры накатного ролика приведены на рис. 1.

Для моделирования процесса и определения положения центроиды (рис. 2) из сплава Д16Т изготовлены два накатных ролика с радиальной сеткой.

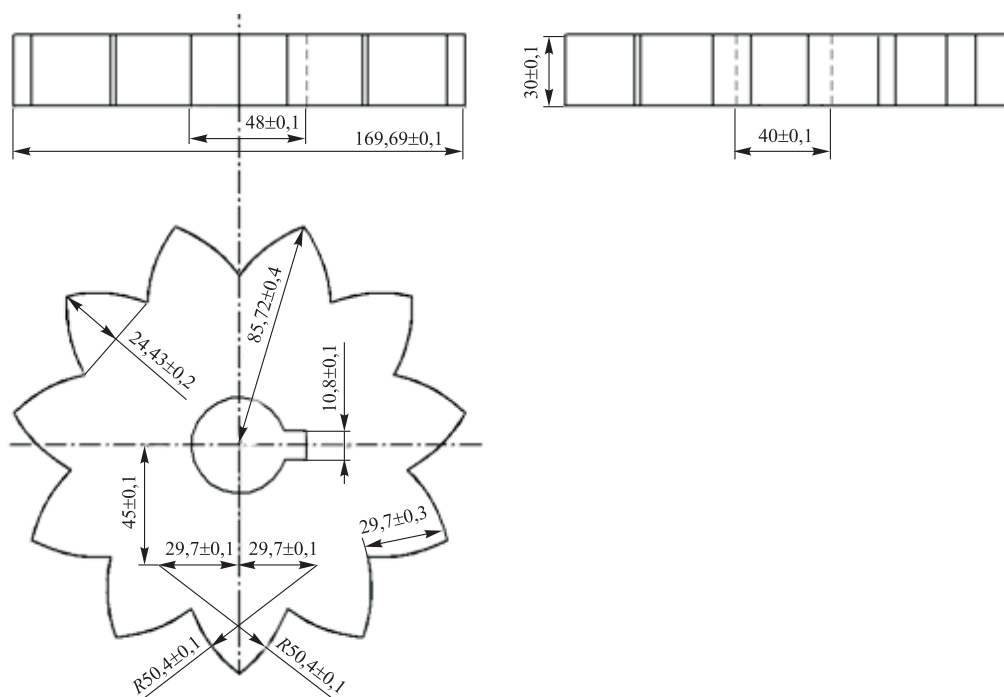


Рис. 1. Накатный ролик

Эксперимент проведен на универсальном фрезерном станке. Чтобы исключить упругие деформации (пружинение), материалом для заготовок выбран свинец, заготовки представляют собой полосы шириной 30, толщиной 2 и длиной 500 мм.

При работе проводилась съемка (скорость 506 кадр/с) процесса накатывания ленты (рис. 3) высокоскоростной видеокамерой Mikrotron MC1363.

В результате эксперимента выявлено, что центроида располагается на наружном диаметре ролика с погрешностью 0,5 %.

Для определения пружинения и закономерности его образования изготовлены четыре комплекта роликов для разных углов профиля гофров (90, 100, 110 и 120°) из ленты толщиной 0,35 мм с углом наклона рифлений на ленте 10°.

Расчет профиля зубьев роликов основан на использовании зависимости для точек профиля инструмента при совместном перемещении ролика и ленты [4]. Методика универсальная, но требует трудоемких построений, а предлагаемая методика позволяет без специального программного обеспечения и с низкой трудоемкостью выполнять построения и вносить коррекцию.



Рис. 2. Накатный ролик с радиальной сеткой



Рис. 3. Процесс накатывания ленты

Предлагаемая методика отличается от универсальной тем, что положение профиля описывается математическими зависимостями и не требует предварительного построения последовательных положений отрезка с последующим наложением на него профиля ленты.

Построение профиля выполняется в графическом редакторе при использовании математических зависимостей, что позволяет существенно увеличить точность построения, сохраняя наглядность графического метода.

Координаты последовательного положения точек отрезка a (рис. 4) определяются по зависимостям:

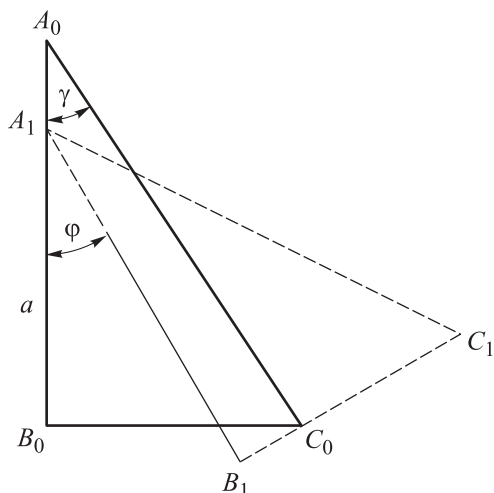
$$\begin{aligned}x_A &= r(\varphi - \sin \varphi); & y_A &= r(1 - \cos \varphi); \\x_B &= x_A + a \sin \varphi; & y_B &= y_A + a \cos \varphi,\end{aligned}$$

из которых следует, что

$$x_C = x_B + a \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi; \quad y_C = y_B + a \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi,$$

где A , B и C — точки на вершине [3], центре и во впадине гофра соответственно; γ — половина угла профиля гофра; r — радиус ролика; a — расстояние от впадины гофра до центра; φ — угол поворота инструмента (меняется с заданной дискретностью в пределах от $-360^\circ/(2z)$ до $360^\circ/(2z)$, где z — число зубьев ролика). В соответствии с выдвинутой ранее гипотезой принимаем величину a , равной высоте гофра, т. е. центра инструмента располагается на наружном диаметре.

Рис. 4. Положение профиля инструмента при повороте на угол φ ; индекс 0 — начальное положение точек; индекс 1 — положение точек после совместного поворота ленты и накатного ролика



Поле последовательного положения профилей инструмента для накатывания ленты с заданными параметрами приведено на рис. 5.

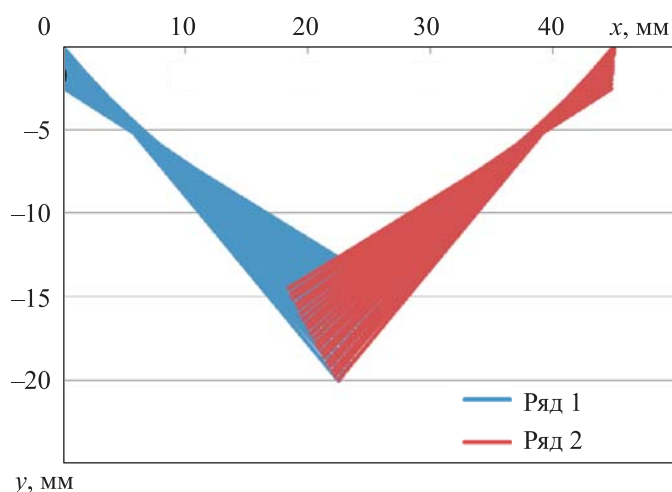


Рис. 5. Поле последовательного положения профилей инструмента

Точки пересечения последовательных положений профиля являются точками искомого профиля ролика и определяются по зависимостям для пересечения прямых:

$$x = \left(\frac{F_2}{E_2} - \frac{F_1}{E_1} \right) \dots \left(\frac{D_1}{E_1} - \frac{D_2}{E_2} \right),$$

где $F = x_c y_a - x_a y_c$, $E = x_a - x_c$, $D = y_c - y_a$ — коэффициенты.

По найденным точкам построена линия тренда, которую и принимаем за искомый профиль (рис. 6).

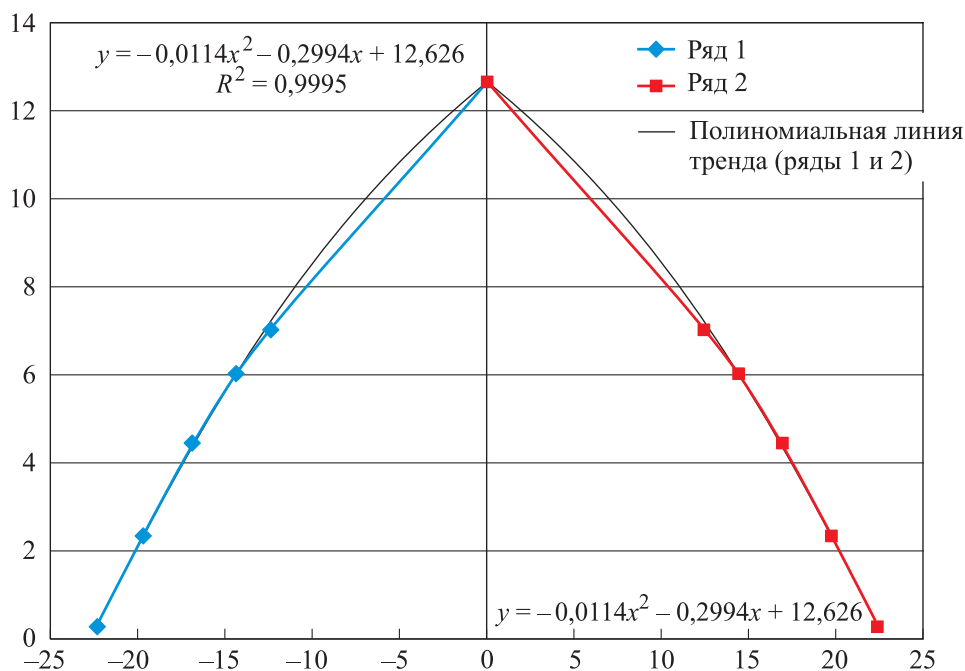


Рис. 6. Профиль зуба ролика

Полиномиальная линия тренда является огибающей семейства профилей последовательного положения зуба накатного ролика [7].

Уравнение линии тренда приведено на рис. 6. Величина достоверности аппроксимации равна 0,9995, что подтверждает правильность уравнения огибающей.

Предлагаемая методика разработана для прямолинейных профилей.

По рассчитанным профилям из инструментальной стали 9ХС изготовлен накатный ролик (рис. 7).

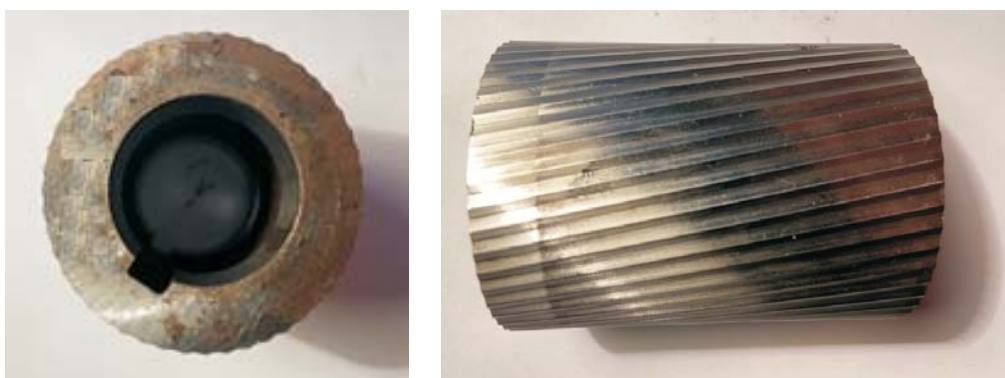


Рис. 7. Накатный ролик

Фрагмент ленты, полученной при накатывании, приведен на рис. 8.

Для измерения полученного угла профиля ленты в нормальном сечении элементы ленты вырезались на эрозионном станке. На металлографическом микроскопе проводилась съемка торцевой стороны вырезанных участков лент (рис. 9).

При измерении гофров лент с параметрами, указанными заказчиком, выявлено, что величина пружинения составляет $9,7...10,2^\circ$ на угол 2γ , т. е. величину упругого последствия (пружинения) можно принять равной 10° .

С учетом установленного пружинения в методику внесено дополнение — угол профиля ленты с учетом корректировки принимать равным $2\gamma' = 2\gamma - 10^\circ$. По пересчитанным профилям комплект роликов для накатывания профиля ленты с углом 100° был перешлифован и выполнено повторное накатывание профиля ленты. На рис. 10 показан участок ленты, накатанный перешлифованными роликами. Полученные углы $2\gamma'$ профиля ленты после перешлифовки роликов находятся в пределах $99...101^\circ$, погрешность профиля ленты — в пределах $\pm 1^\circ$.

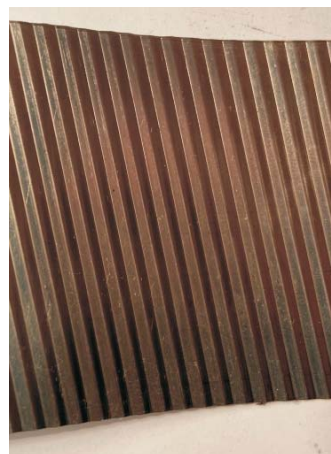


Рис. 8. Фрагмент накатанной ленты

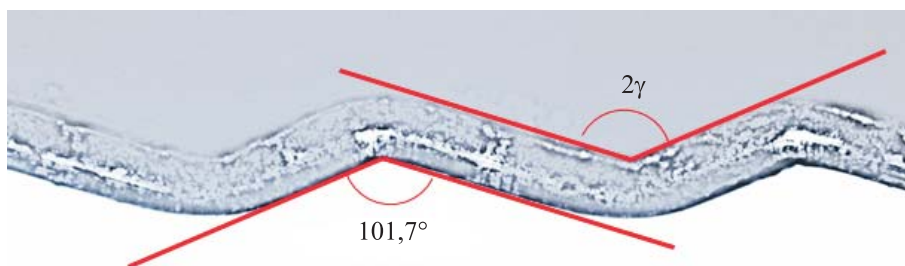


Рис. 9. Торцевая сторона накатанной ленты (2γ — угол профиля ленты)

Рис. 10. Торцевая сторона накатанной ленты после перешлифовки роликов



Вывод. Проектирование роликов по предложенной методике позволяет добиться необходимой точности при накатывании профиля ленты. Центроида располагается на наружном диаметре ролика. Значение пружинения

жинения для коррозионно-стойкой стали X18H10T и заданных диапазонов параметров целесообразно принимать равным 10° . При проектировании роликов для накатывания ленты угол профиля ленты следует принимать равным $2\gamma' = 2\gamma - 10^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Куршин А.П., Баранов А.А. Кауперный подогреватель газа. Патент РФ 2251057. Заявл. 16.09.2003, опубл. 27.04.2005.
- [2] Petukhov Y.E., Domnin P.V. Shaping precision in machining a screw surface. *Russ. Engin. Res.*, 2011, vol. 31, no. 10, pp. 1013–1015.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X11100200>
- [3] Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.И. Проектирование металлорежущих инструментов. М., Машгиз, 1963.
- [4] Петухов Ю.Е. Профилирование режущих инструментов в среде T-flex CAD-3D. *Вестник машиностроения*, 2003, № 8, с. 67–70.
- [5] Захаров О.В. Геометро-кинематический синтез суперфинишного формообразования конических деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2004, № 2, с. 10–15.
- [6] Ляшков А.А., Куликов Л.К. Профилирование обкаточного инструмента по вспомогательной поверхности. *Омский научный вестник*, 1999, № 9, с. 73–74.
- [7] Ляшков А.А. Геометрическое и компьютерное моделирование основных объектов формообразования технических изделий. *Омский научный вестник*, 2017, т. 1, № 2, с. 9–14.
- [8] Залгаллер В.А. Теория огибающих. М., Наука, 1975.
- [9] Лашнев С.И., Юликов М.И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ. М., Машиностроение, 1975.
- [10] Люкшин В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов. М., Машиностроение, 1967.
- [11] Litvin F.L., Fuentes A. Gear geometry and applied theory. Cambridge University Press, 2004.
- [12] Чемборисов Н.А., Девжеева Т.Г. Обзор методов профилирования червячной фрезы для зубчатых венцов. *Металлообработка*, 2010, № 4, с. 2–6.
- [13] Lyashkov A.A., Panchuk K.L. Computer modeling of the pump screw and disc tool cross shaping process. *Procedia Eng.*, 2015, vol. 113, pp. 174–180.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.314>
- [14] Dimitriou V., Antoniadis A. CAD-Based calculation of cutting force components in gear hobbing. *J. Manuf. Sc. Eng.*, 2012, vol. 134, no. 3, art. 031009.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4006553>
- [15] Lyashkov A.A. Shaping of hearts with a helical surface by means of a disk mill. *Russ. Engin. Res.*, 2012, vol. 32, no. 4, pp. 404–406.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X12040181>

[16] Лопатин Б.А., Хаустов С.А. Автоматизированная система моделирования и анализа способов формирования зубьев зубчатых колес. *Вестник ЮУрГУ. Серия Машиностроение*, 2008, № 10, с. 72–77.

[17] Popov A.Yu., Shchipkova Yu.V. The design of rollers for rolling corrugations in the ribbon. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1260, no. 6, art. 062019.

DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/6/062019>

Щипкова Юлия Владимировна — аспирантка кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Омского государственного технического университета (Российская Федерация, 644050, г. Омск, пр-т Мира, д. 11).

Попов Андрей Юрьевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Омского государственного технического университета (Российская Федерация, 644050, г. Омск, пр-т Мира, д. 11).

Проблема сослаться на эту статью следующим образом:

Щипкова Ю.В., Попов А.Ю. Профилирование роликов для формообразования гофрированных профилей на ленте теплообменника для аэродинамических труб. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 2 (137), с. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-16-27>

ROLLER PROFILING FOR SHAPING CORRUGATED PROFILES ON THE HEAT EXCHANGER TAPE FOR WIND TUNNELS

Yu.V. Shchipkova

A.Yu. Popov

ylia_sipkova@mail.ru

popov_a_u@list.ru

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Abstract

The efficiency of regenerative heat exchangers with heat-accumulating nozzles made of rolled corrugated tapes depends on the profile of their corrugation. It is technologically difficult to obtain corrugations of a given shape by copying — stamping. It is technically more expedient to form such a profile by rolling between two rollers. The contact area is smaller, and the contact pressure is significantly higher. In this case, the shape and accuracy of the tape profile are determined by the accuracy of calculation and manufacturing of the profile of the rollers. The length of the profiling zone and the contact pressure depend on the diameter of the rollers. To apply the known profiling techniques when calculating the corrugated profile of the rollers, it is necessary to find the position of the

Keywords

Profiling, roller, rolling, corrugated tape, centroid, tooth profile, tool, springing

centroid. However, the difficulty is in the tape between the rollers whose thickness cannot be neglected. Therefore, the problem is solved by rolling the roller and the rail smooth, where the tape with a profile formed on it is considered as a rail. The paper introduces a technique of roller profiling taking into account the above factors. When profiling the rollers, the springing of the tape, i.e., elastic aftereffect of plastic deformation, is taken into account. The suitable diameter of the rollers has been determined. The study results in a method developed for calculating the rollers corrugation profile, taking into account the established parameters, i.e., diameters of the centroids and rollers, and the rollers teeth profile correction value, depending on the tape springing during rolling

Received 15.10.2020

Accepted 25.11.2020

© Author(s), 2021

REFERENCES

- [1] Kurshin A.P., Baranov A.A. Kaupernyy podogrevatel' gaza [Hot-blast horizontal heater of gas]. Patent RU 2251057. Appl. 16.09.2003, publ. 27.04.2005 (in Russ.).
- [2] Petukhov Yu.E., Domnin P.V. Shaping precision in machining a screw surface. *Russ. Engin. Res.*, 2011, vol. 31, no. 10, pp. 1013–1015.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X11100200>
- [3] Semenchenko I.I., Matyushin V.M., Sakharov G.I. Proektirovanie metallorezhushchikh instrumentov [Design of metal-cutting tools]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963.
- [4] Petukhov Yu.E. Profiling of cutting tools in T-flex CAD-3D environment. *Vestnik mashinostroeniya*, 2003, no. 8, pp. 67–70 (in Russ.).
- [5] Zakharov O.V. Geometric-kinematic synthesis of superfinish shaping of conical parts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2004, no. 2, pp. 10–15 (in Russ.).
- [6] Lyashkov A.A., Kulikov L.K. Profiling of a rolling tool on the auxiliary surface. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 1999, no. 9, pp. 73–74 (in Russ.).
- [7] Lyashkov A.A. Geometric and computer modeling of the main objects for shaping of technical products. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2017, vol. 1, no. 2, pp. 9–14 (in Russ.).
- [8] Zalgaller V.A. Teoriya ogibayushchikh [Theory of envelopes]. Moscow, Nauka Publ., 1975.
- [9] Lashnev S.I., Yulikov M.I. Raschet i konstruirovaniye metallorezhushchikh instrumentov s primeneniem EVM [Calculation and design of metal-cutting tools using computers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975.
- [10] Lyukshin V.S. Teoriya vintovykh poverkhnostey v proektirovanii rezhushchikh instrumentov [Theory of screw surfaces at design of cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967.

- [11] Litvin F.L., Fuentes A. Gear geometry and applied theory. Cambridge University Press, 2004.
- [12] Chemborisov N.A., Devzheeva T.G. Review on worm mill profiling methods for toothed crowns. *Metalloobrabotka*, 2010, no. 4, pp. 2–6 (in Russ.).
- [13] Lyashkov A.A., Panchuk K.L. Computer modeling of the pump screw and disc tool cross shaping process. *Procedia Eng.*, 2015, vol. 113, pp. 174–180.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.314>
- [14] Dimitriou V., Antoniadis A. CAD-Based calculation of cutting force components in gear hobbing. *J. Manuf. Sc. Eng.*, 2012, vol. 134, no. 3, art. 031009.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4006553>
- [15] Lyashkov A.A. Shaping of hearts with a helical surface by means of a disk mill. *Russ. Engin. Res.*, 2012, vol. 32, no. 4, pp. 404–406.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X12040181>
- [16] Lopatin B.A., Khaustov S.A. Automated system for modeling and analysis of methods for forming gear wheels teeth. *Vestnik YuUrGU. Seriya Mashinostroenie* [Bulletin of the SUSU. Ser. Mechanical Engineering Industry], 2008, no. 10, pp. 72–77 (in Russ.).
- [17] Popov A.Yu., Shchipkova Yu.V. The design of rollers for rolling corrugations in the ribbon. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1260, no. 6, art. 062019.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/6/062019>

Shchipkova Yu.V. — Post-Graduate Student, Department of Metal-Cutting Machines and Tools, Omsk State Technical University (Mira prospekt 11, Omsk, 644050 Russian Federation).

Popov A.Yu. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Metal-Cutting Machines and Tools, Omsk State Technical University (Mira prospekt 11, Omsk, 644050 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Shchipkova Yu.V., Popov A.Yu. Roller profiling for shaping corrugated profiles on the heat exchanger tape for wind tunnels. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2021, no. 2 (137), pp. 16–27 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-16-27>