

УДК 621.914.02

Н.И. Покинтелица, профессор, д-р техн. наук

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 299053

E-mail: tm@sevntu.com.ua

ОПИСАНИЕ ФОРМЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ТЕРМОФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РЯДОВ

Приведено математическое описание формы заготовок для термофрикционной обработки, которое заключается в представлении обрабатываемого профиля при помощи нелинейных и линейных или линеаризованных зависимостей. Предложено для аппроксимации формы обрабатываемой поверхности использовать представление заготовки в виде разложения в двумерный ряд Фурье.

Ключевые слова: *термофрикционная обработка, режущий диск, заготовка, период, паз, тригонометрический ряд, контур, поверхность, профиль.*

Введение. Способ термофрикционной обработки (ТФО) металлов резанием применяется в машиностроении благодаря присущим ему преимуществам, а именно: допускается снятие больших припусков при черновой обработке плоских поверхностей заготовок; в качестве инструмента используется металлический диск, имеющий простую геометрическую форму. При изготовлении инструмента вместо дорогостоящих инструментальных материалов применяются конструкционные стали. Снятие припуска на обработку выполняется в нагретом состоянии, которое достигается одним из простых способов – силами трения.

В научных публикациях, изданных в последнее время, рассмотрены различные схемы ТФО деталей дисковым инструментом [1]. Подтверждено высокое качество обработанной поверхности и разработаны новейшие конструкции инструмента [2]. Исследованы энергосиловые параметры и особенности процесса стружкообразования, предложен комплексный метод термофрикционной и механической обработки [3]. При этом в основном авторы используют экспериментальные методы исследований.

Методики проектирования и описания формы заготовок для ТФО на основании использования функциональных рядов и их связи с показателями качества обработанной поверхности в литературных источниках не обнаружено.

Целью данной статьи является описание формы заготовок для ТФО с использованием функциональных рядов на базе специальных функций, что позволяет прогнозировать показатели качества обработанной поверхности.

Реализация процесса ТФО состоит в следующем. На шпинделе вертикально-фрезерного станка устанавливается и получает вращательное движение инструмент – режущий диск (РД). Окружная скорость вращения диска составляет 40...80 м/с. Заготовка устанавливается в приспособлении на столе станка и получает продольную подачу. В процессе обработки силами трения, возникающими в результате контакта быстровращающегося РД и заготовки, нагревается и получает дополнительную пластичность припуск на обработку, удаление которого производится режущим клином диска [4].

Процесс термофрикционного резания является сложным комплексом взаимосвязанных явлений: внешнее трение поверхности диска о металл заготовки; интенсивная пластическая деформация металла, нагретого до высоких температур; образование связей между поверхностью диска и заготовки; вырывание и перенос металла на поверхность РД; образование наростов на диске и непрерывное их изменение; внедрение наростов в разогретый слой заготовки под действием нормальных и тангенциальных усилий.

Анализ условий процесса высокопроизводительной комплексной ТФО резанием показывает, что в результате высокоскоростного трения образуется слой жидкой фазы металла, расположенный между поверхностями инструмента и заготовки и играющий предохранительную роль для рабочих поверхностей инструмента. В данном случае трение проявляется в слое жидкости, разделяющей контактирующие поверхности. В результате замены внешнего трения при непосредственном контакте инструмента и заготовки внутренним трением в жидкости уменьшается сопротивление трения и скорость износа инструмента.

При проведении исследований обработке подвергались заготовки из углеродистой качественной конструкционной стали 45, коррозионностойкой стали 12Х13, жаростойкой стали 12Х18Н12Т, хромомарганцевоникелевой стали 38ХГН и жаропрочного сплава ЭИ904 (09Х15Н8Ю). Особое внимание уделялось стабильности свойств обрабатываемого материала.

Разработанные комплексные методы ТФО заключаются в совмещении нескольких операций для получения специальных деталей машин с особыми свойствами. В частности это совмещение черновой



Рисунок 1 – Пазы со вставками в виде прутиков, выполненные в направлении, перпендикулярном подаче

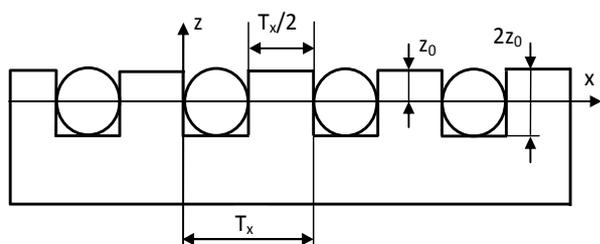


Рисунок 2 – Геометрическая схема заготовки с поперечными пазами со вставками

Пазы, выполненные в поперечном по отношению к подаче направлении с периодом T_x (рисунок 2), обуславливают динамическое воздействие на процесс комплексной обработки.

Для описания сечения заготовки использованы нелинейные зависимости:

$$z(x) = \begin{cases} -z_0 & \text{при } x \leq \frac{T_x}{2}, \\ +z_0 & \text{при } \frac{T_x}{2} \leq x \leq T_x. \end{cases}$$

Пазы и вставки при обработке, как правило, сглаживаются. Поэтому для аппроксимации формы поверхности заготовки в функции продольной координаты использовано представление заготовки в виде разложения в ряд Фурье

$$z(x) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin(k\omega_0 x),$$

где $b_k = \frac{2z_0}{k\pi}$, $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_x}$ – коэффициенты ряда и частота соответственно.

В пазах заготовки находятся вставки из материала, который отличается от материала заготовки. Поэтому данная формула должна быть скорректирована для учета наличия вставок. Коррекция формулы заключается в учете включений, имеющих неопределенный характер. Поэтому ряд Фурье должен быть скорректирован, в частности, в направлении учета косинусных составляющих. При этом форма заготовки представлена в виде:

$$z(x) = \sum_{k=1}^{\infty} (b_k + \delta b_k) \sin(k\omega_0 x) + (a_k + \delta a_k) \cos(k\omega_0 x).$$

Здесь δb_k , δa_k – дополнительные составляющие, которые обусловлены неопределенностью формы и расположения отдельных вставок; a_k – коэффициент, учитывающий парные составляющие зависимости.

Преобразуем гармонические функции под знаком суммы. При этом форма заготовки будет представлена в общем виде:

$$z(x) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(k\omega_0 x + \psi_k),$$

где A_k , ψ_k – амплитуда и начальная фаза, определенные формулами:

$$A_k = \sqrt{(b_k + \delta b_k)^2 + (a_k + \delta a_k)^2}, \quad \psi_k = \arctg \frac{b_k + \delta b_k}{a_k + \delta a_k}.$$

обработки с поверхностной цементацией. Для этого обработаны заготовки из низкоуглеродистой стали со вставками из высокоуглеродистой стали. Используются пары заготовка–вставка из материалов сталь 20–сталь 60, сталь X18H9T–сталь 60, сталь 45–бронза БрАЖ 9-4, сталь 45–окислы железа и другие.

Комплексная обработка осуществляется с использованием специальных заготовок. Заготовки имеют пазы, отверстия или углубления на своей поверхности, которые сравнимы с толщиной срезаемого слоя. Пазы и отверстия размещены как непосредственно на поверхности, так и в приповерхностном слое заготовки. Они выполняются в разных направлениях. Наиболее просто и эффективно реализация комплексных методов осуществляется для заготовок с продольными пазами. Пазы, перпендикулярные направлению подачи, выполняются на поверхности удлиненной заготовки (рисунок 1).

Комплексная обработка осуществляется для заготовок различного вида. Если на поверхности заготовки выполнены профильные пазы с постоянным шагом, то описание формы заготовки будет зависеть от вида и формы пазов. Предложено выполнять пазы, имеющие форму регулярных канавок на поверхности. Данные пазы выполняются фрезерной операцией специальными фасонными фрезами (рисунок 3).

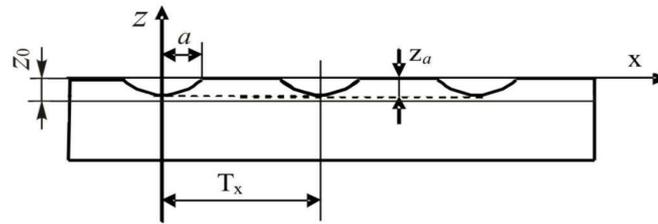


Рисунок 3 – Канавки (криволинейные пазы) на поверхности заготовки

Глубина канавок z_a выбирается меньшей глубины срезаемого слоя z_0 .

Для описания формы данной заготовки принято, что форма канавки соответствует косинусоиде:

$$z(x) = \begin{cases} z_0 \cos \frac{\pi x}{2a} & \text{при } 0 \leq x \leq a, \\ 0 & \text{при } a \leq x \leq \pi. \end{cases}$$

Зависимость припуска от продольной координаты получена в виде разложения в ряд Фурье

$$z(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\omega_0 x, \quad a_0 = \frac{a}{\pi^2}, \quad a_k = \frac{z_0 \cdot \cos ka}{a \left(\frac{\pi^2}{4a^2} - k^2 \right)}.$$

Отдельным случаем заготовки является ребристая поверхность с регулярными лунками (рисунок 4).



Рисунок 4 – Заготовка с ребристой поверхностью в виде периодических синусоидальных лунок

Для такой заготовки:

$$a_0 = \frac{a}{\pi \cdot T_x}, \quad a_k = \frac{-z_0 \cdot \cos k\pi}{\pi \left(k^2 - \frac{1}{4} \right) T_x}.$$

В общем виде заготовки с нерегулярными поперечными канавками различного вида описываются как линейными, так и нелинейными зависимостями в виде $z(x) = f(x)$. Заготовка имеет ограниченную длину. По ее краям, как правило, имеются дефекты. Кроме того, математическое описание формы заготовки на краях не имеет смысла по причине специфики процессов врезания и выхода инструмента. Поэтому рассматривается лишь часть заготовки, которая не включает начальный или конечный участки. Протяженность отброшенных при рассмотрении начального и конечного участков невелика. Данные участки выбраны таким образом, чтобы контур заготовки в начале и в конце был одинаков, то есть принятая при описании аналитическая зависимость, которая описывает форму заготовки, была периодической с периодом T_3 (рисунок 5).

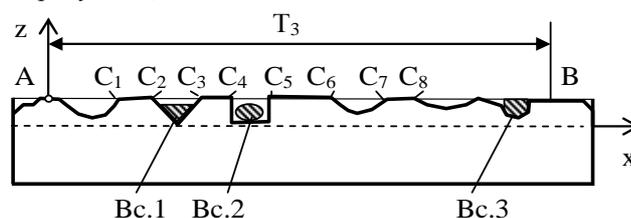


Рисунок 5 – Заготовка з поперечними неровностями різного виду

Рассмотренный профиль заготовки с поперечными пазами может иметь различные канавки.

Канавки сглаженного вида (участок АС₁) имеют плавно сопряженные с контуром заготовки начало и конец. Не исключены участки с острыми краями С₂С₃ или канавки в виде пазов С₄С₅. Если такие пазы расположены регулярно, то они описываются рядом, который включает только косинусные составляющие, как это изложено ранее.

При наличии канавок неопределенного хаотического профиля (участок С₆В) описание поверхности осуществляется при условии, что данный профиль является однозначным, имеет конечное число максимумов и минимумов и есть ограниченным. Ограничение заключается в отсутствии трещин, которые охватывают все сечение заготовки.

Для заготовки с приведенным профилем аналитическая зависимость контура представлена в виде ряда Фурье общего вида

$$z(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\omega_0 x + b_k \sin k\omega_0 x,$$

где $\omega_0 = 2\pi/T_3$ – параметр, учитывающий базовый период волнистости профиля заготовки.

Коэффициенты ряда связаны с функциональной зависимостью, описывающей контур заготовки. Базовый контур $f(x)$ определен с некоторой погрешностью $\delta(x)$. Погрешность обусловлена различными факторами. Один из них – это отсутствие постоянного значения контура при изменении координаты y . Второй причиной неточного описания контура является принципиальная невозможность описать контур с абсолютной точностью. Он всегда описывается приближенно. На поверхности заготовки имеются вставки Вс.1-Вс.3 в виде твердых тел или сыпучего материала. Поэтому погрешность описания контура $\delta(x)$ имеет неопределенный характер и может меняться в процессе обработки.

Определим коэффициенты ряда Фурье, учитывая неопределенности функциональной зависимости $f(x)$, которая учитывается дополнительной функцией $\delta(x)$, имеющей неопределенный характер.

$$a_0 = \frac{1}{T_3} \int_0^{T_3} [f(x) + \delta(x)] dx;$$

$$a_k = \frac{2}{T_3} \int_0^{T_3} [f(x) + \delta(x)] \cos(k\omega_0 x) dx;$$

$$b_k = \frac{2}{T_3} \int_0^{T_3} [f(x) + \delta(x)] \sin(k\omega_0 x) dx.$$

Учитывая линейность операций интегрирования, разделим рассчитанные значения коэффициентов на детерминированную (определенную) и неопределенную составляющие. При этом получаем:

$$a_0 = a_0^v + a_0^*, \quad a_k = a_k^v + a_k^*, \quad b_k = b_k^v + b_k^*,$$

$$a_0^v = \frac{1}{T_3} \int_0^{T_3} f(x) dx, \quad a_0^* = \frac{1}{T_3} \int_0^{T_3} \delta(x) dx,$$

$$a_k^* = \frac{2}{T_3} \int_0^{T_3} \delta(x) \cos(k\omega_0 x) dx, \quad b_k^* = \frac{2}{T_3} \int_0^{T_3} \delta(x) \sin(k\omega_0 x) dx,$$

$$a_k^v = \frac{2}{T_3} \int_0^{T_3} f(x) \cos(k\omega_0 x) dx, \quad b_k^v = \frac{2}{T_3} \int_0^{T_3} f(x) \sin(k\omega_0 x) dx.$$

Описание заготовки со вставками составлено из собственно описания заготовки и добавленного к нему описания вставок.

В этом случае ряды Фурье представляются в виде суммы гармоник:

$$Z(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(k\omega_0 x + \psi_k),$$

где $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$, $\psi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k}$.

Вставки на поверхні заготовки мають різний вид. Розличають вставки з металу в формі стержня різного сечення і сыпучі вставки в формі порошку. Для визначення погрешностей вирахування коефіцієнтів, обумовлених твердими і сыпучими вставками, застосовані різні методи.

Розглянемо заготовки з продольними (в напрямку подачі) канавками або углубленнями (рис. 6). Такі заготовки виконані в результаті попередньої фрезерної операції. Кількість пазів різно, а ширина паза, як правило, відповідає діаметру вставки. Використані заготовки з вставками з різних матеріалів.



Рис. 6 – Заготовки, що мають продольні пази з вставками з сталі Х18Н9Т

При обробці такої заготовки утворюється поверхня деталі з сталі, легирована хромом і нікелем. При взаємодії периферійної частини інструмента з заготовкою відбувається різноманітне контактування. На висотах має місце більше тепловиділення, тому там утворюється плоска стружка. В області паза інтенсивність тепловиділення менше, має місце растекання металу, а стружка не утворюється.

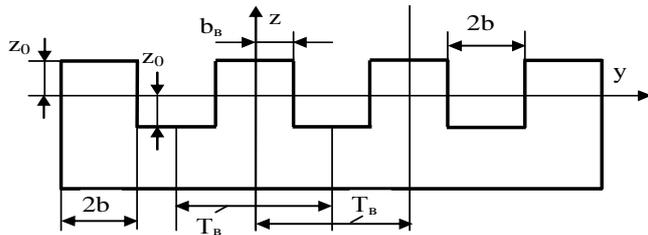


Рис. 7 – Форма сечення (x = const) заготовки з продольними пазами

В даному випадку для опису форми заготовки використані нелінійні залежності. З метою спрощення розглянемо заготовку з рівномірними однаковими висотами і впадинами (рис. 7).

Для опису одного періоду висота $- \frac{T_g}{2} \leq y \leq \frac{T_g}{2}$ маємо нелінійну залежність:

$$z(y) = \begin{cases} z_0 & \text{при } |y| \leq \frac{T_g}{2}, \\ -z_0 & \text{при } |y| \geq \frac{T_g}{2}. \end{cases}$$

Для опису форми заготовки з пазами використано розкладання форми заготовки в ряд Фур'є. При цьому залежність висоти заготовки в функції координати y визначається вираженням:

$$z(y) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega_y y),$$

де значення частоти $\omega_y = 2\pi/T_g$.

Коефіцієнти ряду Фур'є визначені в формі:

$$a_k = \frac{2z_0}{k\pi} \sin\left(\frac{kb_g}{T_g}\right).$$

При комплексній обробці застосовані заготовки з різним розташуванням пазів. Характерним є розташування пазів під кутом до напрямку подачі (рис. 8).



Рис. 8 – Заготовки з пазами, в які вставлені вставки, розташовані під кутом до напрямку подачі

Для математичного опису форми заготовки з пазами, розташованими під кутом до напрямку подачі, використано математичне описання в формі ряду:

$$Z(y, x) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left[k(\omega_y y + \omega_x x)\right].$$

Преобразовав тригонометрическую функцию под знаком суммы, получим:

$$Z(y, x) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \{ \cos(k\omega_y y) \cdot \cos(k\omega_x x) - \sin(k\omega_y y) \cdot \sin(k\omega_x x) \}.$$

В процессе исследований использованы также заготовки с глухими отверстиями, равномерно расположенными по поверхности заготовки. Изготовлены образцы таких заготовок. Отверстия в заготовке заполнены порошком из окислов металлов, в частности оксида железа. Для получения деталей, которые имеют мягкую сердцевину и твердый поверхностный слой, использована заготовка из низкоуглеродистой стали с накладками из легированной стали. При обработке такой заготовки образуется равномерная обработанная поверхность, материал которой отличается от материала основной части заготовки.

Выводы. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения специальных деталей машин, контактные поверхности которых изготовлены в результате комплексной ТФО и имеют вид совокупности плоских участков из разнородных материалов, в частности пар «сталь-легированная сталь», «низкоуглеродистая сталь-высокоуглеродистая сталь», «сталь-бронза».

Комплексная обработка осуществляется для заготовок различного вида, на поверхности которых выполнены профильные пазы со вставками из различных материалов. Пазы и вставки при обработке сглаживаются. Поэтому для аппроксимации формы заготовки использовано представление обрабатываемой поверхности в виде разложения в двумерный ряд Фурье. Погрешность описания контура имеет неопределенный характер и может меняться в процессе обработки.

Математическое представление формы заготовок для ТФО можно обобщить на описание любого параметра, который определен на поверхности или в объеме детали. Такими параметрами могут быть твердость, остаточные напряжения, параметры шероховатости поверхности.

Направлением дальнейших исследований является определение зависимости показателей качества обработанных поверхностей от параметров режима термофрикционного резания.

Бibliографический список использованной литературы

1. Зарубицкий С.У. Розробка й дослідження процесу ефективності термофрикційної обробки матеріалів / С.У. Зарубицкий. — Київ: ВИПОЛ, 1993. — 76 с.
2. Зарубицкий Е.У. Исследование конструкций режущих дисков при термофрикционной обработке плоскостей / Е.У. Зарубицкий, Н.И. Покинтелица // Высокие технологии в машиностроении. — Харьков: ХГПУ, 1998. — С. 121–122.
3. Струтинський В.Б. Комплексні методи механічної обробки деталей, що реалізують особливості динаміки технологічної системи верстата / В.Б. Струтинський, М.І. Покинтелица // Вестник НТУУ «КПИ». Сер.: Машиностроение: сб. науч. тр. — Киев: НТУУ «КПИ», 2012. — Вып. 64. — С. 35–42.
4. Струтинський В.Б. Динамічні процеси в металорізальних верстатах / В.Б. Струтинський, В.М. Дрозденко. — Київ.: Основа-Принт, 2010. — 440 с.

Поступила в редакцію 20.01.2014 г.

Покинтелица М.І. Опис форми спеціальних заготовок для термофрикційної обробки з використанням функціональних рядів

Наведено математичний опис форми заготовок для термофрикційної обробки, який полягає в поданні оброблюваного профілю за допомогою нелінійних і лінійних або лінеаризованих залежностей. Запропоновано для апроксимації форми оброблюваної поверхні використати представлення заготовки у вигляді розкладання в двовимірний ряд Фур'є.

Ключові слова: термофрикційна обробка, різальний диск, заготовка, період, паз, тригонометричний ряд, контур, поверхня, профіль.

Pokintelitsa N.I. Description form tailored blanks for thermofrictional treatment using functional series

The mathematical description of the form of blanks for thermofrictional treatment, which is to provide the machined profile using nonlinear and linear or linearized dependencies. Proposed to approximate the shape of the machined workpiece surface representation used in the form of an expansion in the two-dimensional Fourier series.

Keywords: thermofrictional treatment, cutting disc, blank, period, slot, trigonometric series, contour, surface, profile.