

УДК 621.914.02

В.Б. Струтинский, профессор, д-р техн. наук,

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056*

kvm_tmi@mail.ru

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

*Севастопольский национальный технический университет,
ул. Университетская, 33, г. Севастополь*

tm@sevntu.com.ua

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛНИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТЕРМОФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ

Приведены результаты исследований механизма формирования показателей качества при термофрикционной обработке плоских поверхностей деталей, что позволит прогнозировать степень отклонения реальной формы обработанных изделий от ее номинальных значений, а также установить детерминированные и случайные ошибки геометрических параметров полученных поверхностей.

***Ключевые слова:** термофрикционная обработка, волнистость, колебание, функция, слой, поток, профиль, схема, модель.*

Введение: Промышленное использование способа термофрикционной обработки (ТФО) деталей позволяет получить поверхности с заданными показателями качества. Поэтому исследования, направленные на совершенствование процесса ТФО, являются актуальными.

ТФО деталей приводит к формированию волнистой обработанной поверхности, поэтому проблема в общем виде состоит в исследовании причин и следствий формирования волнистости и ее связи с параметрами технологической системы станка.

Проблема также связана с важными научными и практическими задачами разработки прогрессивных технологических процессов обработки деталей на универсальном металлообрабатывающем оборудовании с ЧПУ.

В последних публикациях приведено значительное количество результатов исследований процесса ТФО деталей. Определены оптимальные режимы резания и рекомендованы материалы, обработка которых позволяет значительно уменьшить интенсивность процессов схватывания и наростообразования [1]. Ряд публикаций посвящен изучению особенностей рабочих процессов [2, 3]. В отдельных работах рассмотрены температурные поля в зоне резания [4]. Ряд материалов посвящен разработке инструмента, обеспечивающего прогрессивные методы обработки [5]. Результатов исследований, позволяющих определить механизм формирования микро- и макрорельефа поверхностей, имеющих место при ТФО деталей, в литературных источниках не обнаружено.

Целью данной статьи является определение механизма формирования показателей качества при ТФО, что позволит прогнозировать степень отклонения реальной формы обработанных изделий от ее номинальных значений, а также установить детерминированные и случайные ошибки геометрических параметров полученных поверхностей.

Основное содержание работы. ТФО характеризуется сложными температурно-деформационными процессами в зоне контакта инструмента и заготовки. На первой стадии процесса имеет место формирование зоны обработки с разогревом и оплавлением материала. Процессы обработки на данной стадии имеют нестационарный характер. Вторая стадия характеризуется устоявшимися термодинамическими явлениями, которые связаны с вибрационными процессами в технологической системе. При этом между инструментом и заготовкой формируется стабильный слой расплавленного металла, соответствующий толщине срезаемого слоя, из которого формируется плоская сливная стружка. На третьей стадии имеют место нестационарные процессы, наблюдаются повышенные вибрации стола.

Так как слой жидкой фазы обрабатываемого металла расположен между поверхностями инструмента и заготовки, то он играет предохранительную роль для рабочих поверхностей инструмента. В данном случае трение проявляется в пленке смазывающего вещества, разделяющего контактные поверхности. При этом стойкость инструмента будет достаточно высокой в сравнении с традиционной схемой резания металлов.

При исследовании закономерности течения жидкого металла с учетом тепловыделения вследствие внутреннего трения в расплавленном слое установлено наличие разнородных участков течения металла: безнапорного (обратного) течения в передней части заготовки, напорного течения в задней части заготовки и свободного движения металла, находящегося на поверхности инструмента.

При выполнении технологической операции ТФО формирование волнистой поверхности обусловлено относительным вибрационным перемещением инструмента и заготовки. Эти перемещения вызывают пульсирующее течение расплавленного металла. Механизм формирования волнистой поверхности обоснован теоретически и подтвержден экспериментально. Образующаяся волнистость микропрофиля является результатом периодического изменения толщины слоя металла вследствие взаимных относительных колебаний инструмента и заготовки (рисунок 1, а).

Цилиндрическая поверхность инструмента, которая совершает колебательные движения, выступает как своеобразный поршень, изменяющий толщину слоя расплавленного металла (рисунок 1, б).

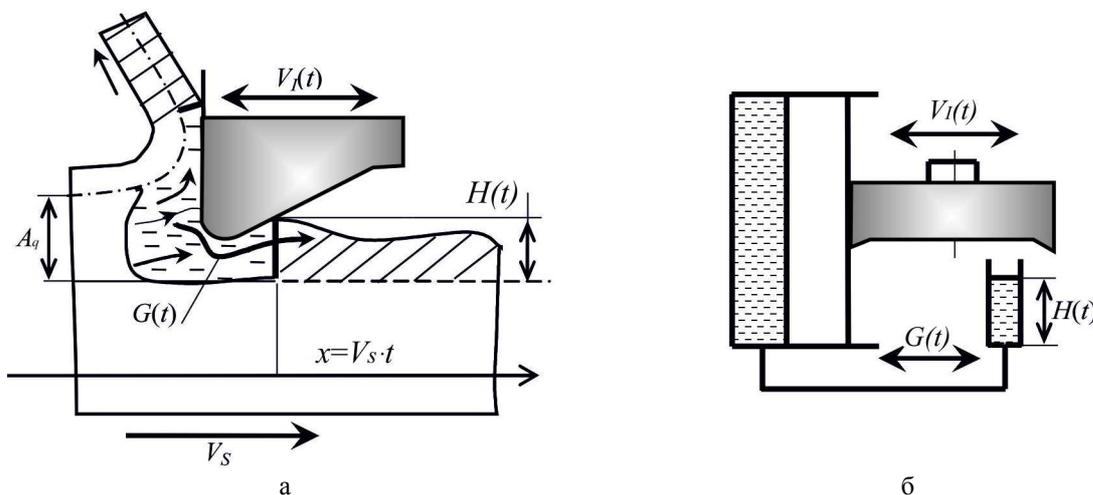


Рисунок 1 – Формирование микропрофиля поверхности при относительном перемещении инструмента и заготовки: а – физическая модель процесса; б – эквивалентная гидравлическая схема процесса течения металла при формировании волнистой обработанной поверхности

Для участка безнапорного течения скорость жидкого металла в тангенциальном направлении незначительна. При колебательном движении инструмента относительно детали меняется толщина слоя металла $H(t)$. Это приводит к возникновению течения в радиальной плоскости. Расход G жидкого металла, который обтекает режущую кромку инструмента, будет пропорциональным скорости инструмента. Колебания инструмента представляются в виде:

$$X_I(t) = \sum_{k=1}^n x_k \sin(k\omega_0 t + \psi_k),$$

где x_k , ω_0 , ψ_k – константы, определяющие закон вибрационного движения инструмента.

Скорость перемещения цилиндрической поверхности инструмента составит

$$V_I(t) = \sum_{k=1}^n x_k k \cdot \omega_0 \cos(k\omega_0 t + \psi_k).$$

Номинальная скорость движения инструмента соответствует скорости подачи V_S . Соответственно номинальное перемещение $x = V_S t$. Изменяя в формуле скорости время на номинальное перемещение, получим

$$V_I(x) = \sum_{k=1}^n x_k k \cdot \omega_0 \cos\left(\frac{k\omega_0 x}{V_S} + \psi_k\right).$$

Расход жидкого металла в радиальной плоскости составит

$$G(t) = \rho K_q A_q V_I(x),$$

где ρ – плотность обрабатываемого металла; A_q – площадь участка инструмента, контактирующего с расплавленным металлом; K_q – коэффициент, характеризующий положение критической точки, где разделяются потоки металла, идущие на формирование поверхности детали и стружки.

Если на поверхности заготовки имеются продольные канавки, то размер контакта инструмента с жидким металлом будет изменяться по ширине заготовки. Эти изменения зависят от координаты y . Они представлены в виде зависимости

$$A_q = \sum_{p=1}^B a_p \cos(p\omega_y y + \psi_{py})$$

Практически важным случаем является наличие регулярных пазов или отверстий на поверхности заготовки. Пазы описываются нелинейными разрывными зависимостями. Для их описания применены нелинейные зависимости в виде знака тригонометрической функции (функция Уолша). Связь синусоидальной функции и ее знака представлена в виде серии прямоугольных импульсов, и иллюстрируется схемой (рисунок 2).

Базовая синусоидальная функция

$$Z(y) = h_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T} y\right)$$

устанавливает ординату (высоту $2h_0$) выступов и их шаг T . Нелинейная зависимость в виде соответствующей функции Уолша определяется выражением:

$$Cal(y) = sign[Z(y)] = sign\left[\cos\left(\frac{2\pi}{T} y\right)\right].$$

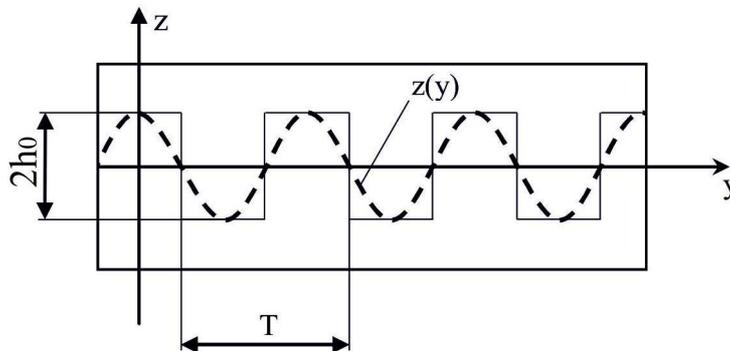


Рисунок 2 – Описание поперечного сечения заготовки с прямоугольными выступами с помощью функции Уолша

При взаимодействии поверхности инструмента с прямоугольными выступами имеет место сглаживание неравномерности слоя металла за счет его перетекания во впадины выступов. Поэтому резкие изменения поперечного размера области взаимодействия стружки и поверхности инструмента сглаживаются. При этом для описания размера A_q использована зависимость

$$A_q = a_1 \cos(\omega_y y + \psi_{1y}).$$

Тогда выражение для определения расхода металла получим в виде:

$$G(x, y) = \rho K_q \sum_{k=1}^n a_1 x_k \omega_0 k \cdot \cos(\omega_y y + \psi_{1y}) \cdot \cos\left(\frac{k\omega_0 x}{V_S} + \psi_k\right).$$

Рассмотрим элементарные промежутки времени dt . Расход жидкого металла в точке обработанной поверхности с координатами x, y приведет к образованию на площадке размером $dx \times dy$ массы металла

$$dM = G(x, y) \cdot dt \cdot dy.$$

Учитывая связь времени с номинальной координатой $dt = dx / V_S$, получим

$$dM = G(x, y) = \frac{dx}{V_S} dy.$$

С другой стороны масса образовавшегося металла

$$dM = H \cdot dx \cdot dy.$$

Приравняв правые части формул, получим ординату микропрофиля поверхности в виде:

$$H(x, y) = \frac{\rho K_q}{V_S} \sum_{k=1}^n a_1 x_k \omega_0 k \cdot \cos(\omega_y y + \psi_{1y}) \cdot \cos\left(\frac{k\omega_0 x}{V_S} + \psi_k\right).$$

Данная формула определяет полигармоническую функцию двух переменных.

Когда колебание инструмента отсутствует, но инструмент имеет неточности геометрии в виде эксцентриситета, а заготовка не имеет продольных пазов, данная формула принимает вид:

$$H(x) = \frac{\rho K_q}{V_S} a_1 x_1 \omega_0 \cos\left(\frac{\omega_0 x}{V_S} + \psi_k\right).$$

Формула определяет базовую гармонику микропрофиля, которая формируется в результате вращения шпинделя.

Если к базовой гармонике добавляется составляющая, связанная с погрешностью инструмента в виде овала, то формируется волнистость, которая имеет две составляющие и описывается формулой

$$H(x) = a_{h1} \cos\left(\frac{\omega_0 x}{V_S} + \psi_1\right) + a_{h2} \cos\left(\frac{2\omega_0 x}{V_S} + \psi_2\right).$$

При взаимном смещении инструмента и детали возникает реактивная сила. Она обусловлена изменением давления в слое жидкого металла между инструментом и заготовкой. Данная сила пропорциональна расходу металла, который вытесняется через профиль инструмента. Учитывая, что расход по ширине заготовки металла описывается полигармонической функцией двух переменных, реактивную силу R , которая действует на заготовку, определим из выражения:

$$R = \int_0^{y_m} [G(t, y)]^2 dy.$$

Подставив значения расхода и выполнив интегрирование, найдем

$$R = \rho K_q \sum_{k=1}^n \left[a_1 x_k \omega_0 k \cdot \sin(\omega_y y_m + \psi_{1y}) \cdot \cos\left(\frac{k\omega_0 x}{V_S} + \psi_k\right) \right]^2.$$

Ранее показано, что стол как инерционная упруго-диссипативная система имеет передаточную функцию перемещения по силе в виде колебательного звена:

$$W_x(s) = \frac{K_x}{T^2 S^2 + 2\xi_x T_x S + 1},$$

где K_x – статический коэффициент передачи; T – постоянная времени; ξ – коэффициент демпфирования.

Силовое воздействие на стол пропорционально ординате профиля. При этом перемещение стола определяется частотными характеристиками системы, определенными в виде:

$$W_x(\omega) = \frac{K_x}{(1 - \omega^2 T_x^2)^2 + 4\xi_x^2 \omega^2 T_x^2},$$

$$\psi_x(\omega) = -\arctg \frac{2\xi_x \omega T_x}{1 - \omega^2 T_x^2}.$$

Соответствующее перемещение стола под действием силы резания составляет

$$x_c(t) = \rho K_q \sum_{k=1}^n a_1 x_k \omega_0 k \cdot \sin(\omega_y y_m + \psi_{1y}) \cdot W_x(k\omega_0) \cdot \sin[k\omega_0 t + \psi_k + \psi_x(k\omega_0)].$$

Перемещение стола имеет вид полигармонического процесса. При наличии колебаний стола по закону $x_c(t)$ скорость взаимного движения инструмента и стола будет зависеть от их взаимного перемещения.

Представим перемещения стола в виде полигармонической функции

$$x_c(t) = \sum_{q=1}^m b_q \sin(q\omega_c t + \psi_q),$$

где b_q – амплитуда q -й гармоники перемещения стола; ω_c – характерная частота колебаний стола; ψ_q – массив начальных фаз гармоник, описывающих колебания стола.

Путем дифференцирования определим скорость перемещения стола:

$$V_c(t) = \sum_{q=1}^m b_q \omega_c q \cdot \cos(q\omega_c t + \psi_q).$$

Относительная скорость перемещения инструмента и стола:

$$V(t) = V_I(t) - V_c(t).$$

Подставив значение скорости, получим

$$V(t) = \sum_{k=1}^n x_k k \omega_0 \cos(k\omega_0 t + \psi_k) - \sum_{q=1}^m b_q \omega_c q \cos(q\omega_c t + \psi_q).$$

Примем, что число составляющих n и m одинаковое. Это можно сделать, учитывая, что часть амплитуд x_k или b_q можно принять равными нулю.

В формуле примем одинаковые базовые значения частот. При этом скорость относительного движения инструмента и заготовки будет определена полигармонической функцией:

$$V(t) = \sum_{k=1}^n k \omega_0 \left[x_k \cos(k\omega_0 t + \psi_k) - b_q \cos(k\omega_0 t + \psi_q) \right].$$

Используем формулы тригонометрии для косинуса суммы двух углов. При этом:

$$\cos(k\omega_0 t + \psi_k) = \cos(k\omega_0 t) \cdot \cos \psi_k - \sin(k\omega_0 t) \cdot \sin \psi_k,$$

$$\cos(k\omega_0 t + \psi_q) = \cos(k\omega_0 t) \cdot \cos \psi_q - \sin(k\omega_0 t) \cdot \sin \psi_q.$$

Подставив значения тригонометрических функций в формулу для относительной скорости, получим:

$$V(t) = \sum_{k=1}^n k \omega_0 \left[(x_k \cos \psi_k - b_q \cos \psi_q) \cdot \cos(k\omega_0 t) + (b_q \sin \psi_q - x_k \sin \psi_k) \cdot \sin(k\omega_0 t) \right].$$

Преобразуем выражение под знаком суммы к виду:

$$V(t) = \sum_{k=1}^n k \omega_0 A_{V_k} \cdot \sin(k\omega_0 t + \psi_{V_k}),$$

где новые значения амплитуд и начальных фаз определены зависимостями:

$$A_{V_k} = \sqrt{(x_k \cos \psi_k - b_q \cos \psi_q)^2 + (b_q \sin \psi_q - x_k \sin \psi_k)^2},$$

$$\psi_{V_k} = \arctg \frac{(x_k \cos \psi_k - b_q \cos \psi_q)}{(b_q \sin \psi_q - x_k \sin \psi_k)}.$$

Это значит, что при наличии перемещений стола закономерности формирования обработанной поверхности будут аналогичными случаю не подвижного стола, а подвижного инструмента.

Формообразование поверхности будет определено ординатами профиля согласно формуле:

$$H(x, y) = \frac{\rho K_q}{V_S} \sum_{p=1}^B a_p \cos(p\omega_y y + \psi_{py}) \cdot \sum_{k=1}^n A_{V_k} k \omega_0 \sin(k\omega_0 t + \psi_{V_k}).$$

Для заготовки, которая имеет неизменную форму в направлении, перпендикулярном подаче:

$$H(x) = \frac{\rho K_q}{V_S} \sum_{k=1}^n A_{V_k} k \omega_0 \sin(k\omega_0 t + \psi_{V_k}).$$

Из формулы следует, что обработанная поверхность будет идеально ровной, если колебания стола будут повторять колебания инструмента. При этом $x_k = b_q$, $\psi_k = \psi_q$, а, соответственно, $A_{V_k} = 0$ при всех k .

Комплексные методы обработки применяются для заготовок из разнородных материалов. Примером является обработка заготовки с бронзовыми вставками в виде стержней (рисунок 3).

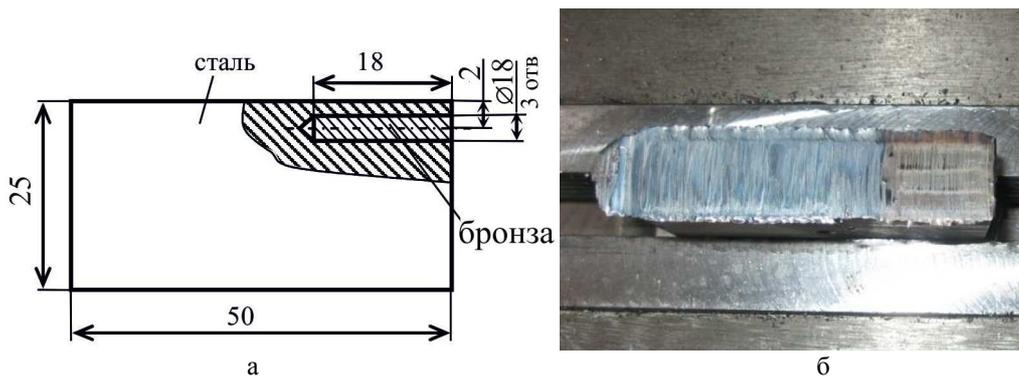


Рисунок 3 – Заготовка из стали 45, в которой помещены стержни из бронзы (а) и общий вид детали после комплексной обработки (б)

В результате на обработанной поверхности формируются продольные выступы (рисунок 4).

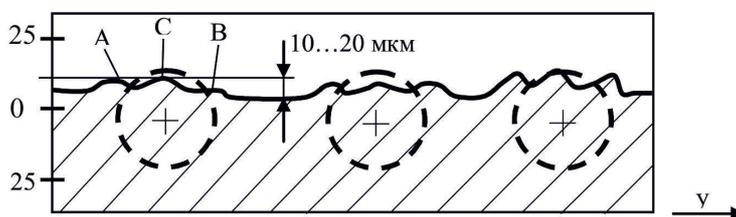


Рисунок 4 – Формирование продольных выступов при обработке заготовки с бронзовыми вставками

На обработанной поверхности в месте расположения стержня образуются три продольных волнистых выступа. Они обусловлены неравномерностью обработки материала. Общая средняя высота выступов А, В и С превышает нулевой уровень, который соответствует основной поверхности заготовки. Центральный выступ С обусловлен повышенной плотностью материала стержня (бронзы) относительно материала заготовки (сталь 45). Выступы А и В, которые находятся на границе между бронзовым стержнем и материалом заготовки, обусловлены поднятием края отверстия по причине наличия избыточного давления в расплавленном слое бронзы.

Полученная математическая модель профиля скорректирована по результатам экспериментальных измерений. Коэффициенты модели определены при проведении спектрального анализа формы обработанной поверхности.

Предложено учесть соответствие отклонения микропрофиля случайным отклонением коэффициентов модели. Соответственно для заготовки постоянной формы в поперечном направлении имеем случайную высоту профиля в виде зависимости:

$$H(x) = \frac{\rho K_q}{V_S} \sum_{k=1}^n A_{V_k}^* \sin(k\omega_0 t + \psi_{V_k}^*),$$

где символами (*) обозначены случайные составляющие модели.

В результате экспериментальных измерений установлено, что диапазон случайных изменений параметров не превышает 10...15 % от номинального значения параметра.

Поэтому случайные параметры модели микропрофиля представлены в виде:

$$A_{V_k}^* = A_{V_k}^0 + \delta A, \quad \omega_0^* = \omega_0^0 + \delta \omega, \quad \psi_{V_k}^* = \psi_{V_k}^0 + \delta \psi,$$

где случайные отклонения параметров δA , $\delta \omega$, $\delta \psi$ не превышают по модулю 5...7% номинальных значений параметров.

Рассмотрено течение жидкого металла на периферии диска после того, как он перестал контактировать с заготовкой. Жидкий металл, соединенный с поверхностью инструмента, движется по кругу. Капли жидкого металла периодически срываются с поверхности инструмента (рисунок 5).

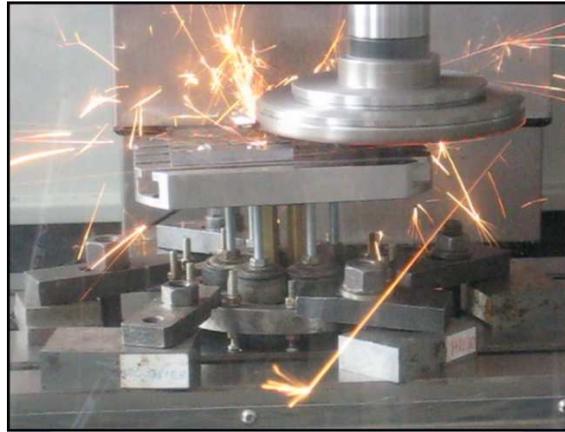


Рисунок 5 – Срыв капель жидкого металла с периферийной части инструмента

В результате анализа видеосъемки установлено, что жидкий металл находится на периферии инструмента, на длине 180-240° от заготовки. Установлено, что при отрыве капель на поверхности инструмента возникает обратное течение металла. Определен характер перемещения металла при отрыве и формировании потоков металла, которые распространяются по касательной к контуру инструмента (рисунок 6).

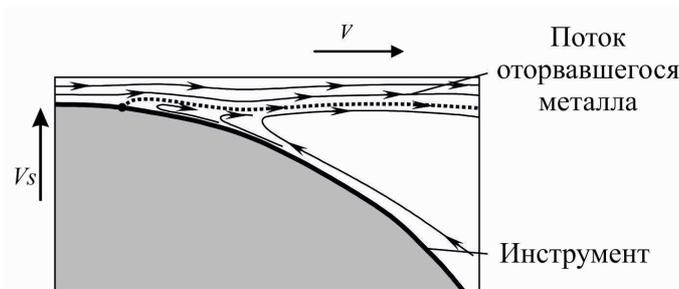


Рисунок 6 – Формирование потока жидкого металла, который срывается с поверхности инструмента

При наличии вибраций инструмента поток металла отрывается более интенсивно и имеют место вихревые течения. Они проявляются в формировании парных вихревых слоев и определяются центробежными силами, которые действуют на жидкий металл в потоке.

Это приводит к возникновению спиралевидного движения частиц металла. В результате действия центробежных сил в жидком металле на периферии инструмента может возникнуть вихревая пелена.

Вихревая пелена возникает при режимах движения, которые являются промежуточными между ламинарным и турбулентным. Для рассматриваемой схемы течения в зазоре между инструментом и заготовкой стойкая вихревая пелена имеет место в диапазоне чисел Тейлора:

$$40 < Ta < 400.$$

Число Тейлора определено в виде безразмерного комплекса:

$$Ta = \frac{U \cdot \Delta}{\nu} \sqrt{\frac{\Delta}{R}},$$

где Δ – промежуток между инструментом и заготовкой, в котором имеется слой жидкого металла; U – окружная скорость поверхности инструмента; R – радиус цилиндрической поверхности инструмента; ν – кинематическая вязкость жидкого металла.

При числах Тейлора $Ta < 40$ имеет место ламинарное послойное движение металла типа течения Куэтта, а при числах Тейлора больших 400 течение становится турбулентным.

Вихревая пелена в слое металла имеет вид набора вихрей (рисунок 7). Она образуется в слое жидкого металла толщиной δ , имеет регулярный характер и сопровождается возникновением набора изолированных вихревых трубок. Вихревые трубки являются квазиустойчивыми и располагаются равномерно в слое металла λ . Возле них формируются вторичные течения.

Образование системы изолированных вихрей является характерным явлением, которое сопровождается сложное пространственное движение вязкой жидкости.

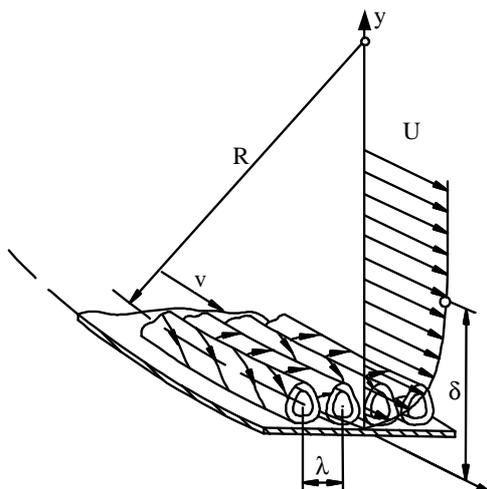


Рисунок 7 – Образование вихрей при движении жидкого металла в зазоре между инструментом и заготовкой

Наличие вихрей обуславливает спиралевидное движение жидкого металла на поверхности инструмента вне зоны резания. При срыве части металла с поверхности инструмента спиралевидное движение жидкого металла проявляется в виде волновой теории капли расплавленного металла. Волнообразное движение металла также обусловлено вибрацией инструмента.

Выводы. Установлен механизм формообразования поверхности при ТФО. Вследствие взаимных смещений заготовки и инструмента изменяется толщина слоя расплавленного металла. При этом возникают дополнительные силы давления, которые вызывают увеличение потока расплавленного металла между заготовкой и кромкой инструмента. Интенсивность потока металла пропорциональна скорости относительного перемещения инструмента и заготовки. Вследствие этого на обработанной поверхности формируются наплывы (выступы), которые пропорциональны локальной скорости относительного движения инструмента и заготовки. При наличии в заготовке продольных пазов или вставок из разнородных материалов неровности возникают в поперечном направлении. Для описания формы поверхности рекомендуется использовать полигармонические функции двух переменных в виде произведения отрезков тригонометрических рядов.

Перспективным направлением дальнейших исследований является определение механизма влияния динамических характеристик специальных приспособлений на показатели качества обработанных поверхностей.

Библиографический список использованной литературы

1. Зарубицкий Е.У. Розробка й дослідження процесу ефективності термофрикційної обробки матеріалів / Е.У. Зарубицкий. — Київ: ВИПОЛ, 1993. — 76 с.
2. Струтинський В.Б. Комплексні методи механічної обробки деталей, що реалізують особливості динаміки технологічної системи верстата / В.Б. Струтинський, М.І. Покінтеліца // Вестник НТУУ «КПІ». Сер.: Машиностроение: сб. науч. тр. — Киев: НТУУ «КПІ», 2012. — Вып. 64. — С. 35 – 42.
3. Струтинський В.Б. Динамічні процеси в металорізальних верстатах / В.Б. Струтинський, В.М. Дрозденко. — Київ.: Основа-Принт, 2010. — 440 с.
4. Зарубицкий Е.У. Температура снимаемого припуска при термофрикционном резании / Е.У. Зарубицкий // Оптимизация процессов резания жаропрочных и особопрочных материалов. —Уфа: УАИ, 1986. —С. 106–110.
5. Зарубицкий Е.У. Исследование конструкций режущих дисков при термофрикционной обработке плоскостей / Е.У. Зарубицкий, Н.И. Покінтеліца // Высокие технологии в машиностроении. — Харьков: ХГПУ, 1998. — С. 121–122.

Поступила в редакцию 03.11.2013 г.

Струтинський В.Б., Покінтелиця М.І. Механізм формування хвилястої поверхні при термофрикційній обробці деталей

Наведено результати досліджень механізму формування показників якості при термофрикційній обробці плоских поверхонь деталей, що дозволить прогнозувати ступінь відхилення реальної форми оброблених виробів від її номінальних значень, а також встановити детерміновані та випадкові помилки геометричних параметрів отриманих поверхонь.

Ключові слова: термофрикційна обробка, хвилястість, коливання, функція, шар, потік, профіль, схема, модель.

Strutinskiy V.B., Pokintelitsa N.I. Mechanism of formation of a wavy surface at thermofrictional processing details

The results of studies on the mechanism of formation of quality when processing thermofrictional flat surfaces of details that will predict the degree of deviation of the real form of processed products from its nominal value, and establish deterministic and random errors in the geometric parameters obtained surfaces.

Keywords: thermofrictional treatment, waviness, oscillation, function, layer, flow, profile, scheme, model.