

УДК 621.9.025

Е.А. Левченко, ассистент*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г.Севастополь, Украина, 99053**tm@sevntu.com.ua***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ РАЗРЕЗКЕ ТРУБ**

В работе приведены результаты исследований процесса взаимодействия отрезного круга и разрезаемой трубной заготовки на основе теплодеформирующего анализа с установлением взаимосвязи условий обработки, режимов резания с конструктивными параметрами абразивного инструмента.

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, температурные деформации заготовки, источники тепла, температурные напряжения, удельная теплоемкость материала.

Абразивная резка материалов, с точки зрения физических процессов, происходящих в поверхностных слоях разрезаемых заготовок, является одним из самых высокотемпературных и высокоскоростных процессов механической обработки. Возникающий при резке тепловой процесс характеризуется температурами порядка 200 – 800°C, мгновенностью нагрева со скоростями в сотни тысяч градусов в секунду. Вслед за быстрым нагревом следует отвод тепла от поверхностных слоев вглубь материала трубы со скоростью охлаждения примерно того же порядка, как и при нагреве.

Наличие теплообмена с окружающей средой обуславливает перераспределение тепловых потоков в системе «отрезной круг – разрезаемая труба – стружка», и как следствие этого, приводит к изменению основных кинетических параметров теплового процесса. Температурные деформации деталей по длине и диаметру зависят от коэффициента теплопроводности их материала [1, 3]. Известно, что жаропрочные стали 1X18H9T менее теплопроводны, чем нержавеющие стали 4X13, 3X13 и стали марок 08кп и 1пс. Однако они обладают примерно в 1,5 раза большим коэффициентом линейного расширения и, как следствие, в зоне резки возникают более высокие температуры. Такие обстоятельства определяют склонность жаропрочных сталей к высоким температурным деформациям, превышающим деформации нержавеющих сталей и конструкционных сталей марок 08кп и 1пс. Как известно, параметры качества поверхностного слоя заготовки в значительной степени зависят от теплового фактора. Физико-механическое состояние поверхностного слоя разрезаемых заготовок определяется не только контактной температурой, которую можно измерить экспериментально, а всем пространственно-временным температурным полем [1]. В частности, важнейшее значение при формировании поверхностного слоя имеют градиенты температур и скорости изменения температуры. Все эти факторы имеют однозначные функциональные связи с кинематическими и динамическими параметрами режима обработки, свойствами материала, характеристиками круга и т.д. Управление качеством разрезаемой поверхности заготовки в значительной мере сводится к установлению этих связей и воздействию через них на тепловой режим резки и физико-механические свойства поверхностного слоя. Поэтому целью данной работы является выбор и обоснование метода определения температуры в зоне обработки, учитывающего влияние на эффективность технологической операции температурных факторов, сопровождающих процесс резания.

Для выяснения причин погрешностей был проведен теплодеформирующий анализ процесса. С этой целью установлена закономерность распределения температуры в заготовке. Предполагалось, что ширина паза заготовки увеличивается только в результате теплового расширения (рисунок 1).

В процессе работы происходит внедрение круга в целом и его абразивных зерен в металл заготовки. Отрезной круг неравномерно нагревается по длине рабочей части. Поскольку нормальные составляющие силы резания при абразивной резке достигают больших значений, наиболее выступающие зерна и связка, удерживающая их, испытывают упругую деформацию и число зерен, контактирующих с поверхностью металла, существенно увеличивается. В процессе снятия металла будут участвовать не все контактирующие зерна. Но если оценивать зерна как источники тепла, нагревающие металл, то скользящие по поверхности зерна внесут не меньший вклад, чем те, которые снимают стружку. Режущие зерна, расположенные на боковых поверхностях круга поглощают в целом меньшую часть энергии, так как она расходуется еще и на работу деформации и нагревание образуемой стружки.

В начальный момент резки вследствие интенсивного нагрева происходит существенное расширение материала заготовки в сторону образующегося паза. Затем по мере перемещения инструмента в направлении подачи, линейное расширение протекает медленнее. В результате формируется сечение паза, профиль которого существенно отличается от номинального.

Температурные деформации заготовки обуславливают искажение формы паза, которую она приняла бы после остывания (рисунок 2). Действительная форма сечения паза получается с учетом тепловых деформаций заготовки.

При разрезке металла отрезными кругами основную теплообразующую функцию выполняет процесс трения его рабочих поверхностей о поверхность заготовки. При изменении режимов резания изменяются условия трения между инструментом, стружкой и заготовкой вследствие изменения скорости скольжения и температуры трущихся поверхностей, что приводит к изменению механических свойств металла разрезаемого слоя.

С ростом радиальной подачи круга глубина проникновения температурных напряжений увеличивается из-за того, что увеличивается глубина проникновения одинаковых температур. Изменение скорости круга мало влияет на величину напряжений вблизи поверхности, так как температура также весьма слабо изменяется при изменении V_k от 60 до 80 м/с. Однако увеличение скорости круга с 80 до 100 м/с приводит к более заметному возрастанию как величины напряжений, так и глубины их проникновения, поскольку значительно увеличивается глубина прогрева поверхностного слоя за счет трения и нагрева зоны контакта инструмента и заготовки.

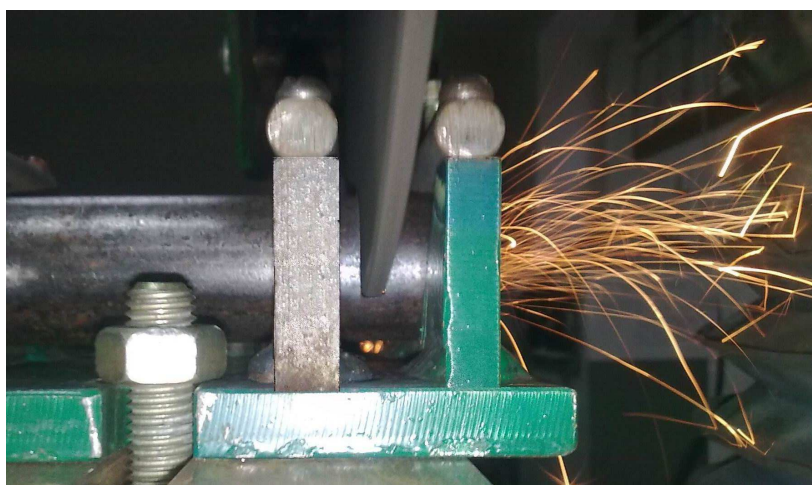


Рисунок 1 – Схема разрезки заготовки

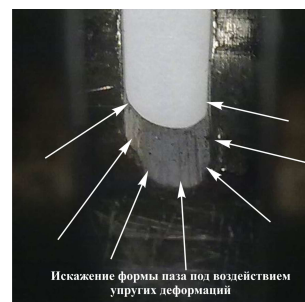


Рисунок 2 – Схема изменения паза под воздействием температурных деформаций

Как показывают экспериментальные исследования [4], процесс массового резания абразивными зернами при разрезке, протекающий на весьма высоких скоростях, создает в поверхностном слое большое число высокотемпературных очагов. Источниками теплоты, возникающей при разрезке, являются работа деформирования металла и работа внешнего трения абразивных зерен о поверхность металла. В отличие от резания металлическим инструментом при абразивной разрезке теплота резания отводится главным образом в массу металла детали, отрезной круг при этом практически не теплопроводен. Знание температур разрезки и тепловых явлений, сопровождающих этот процесс, необходимо не только для получения качественного поверхностного слоя, но и для установления истинной картины процесса снятия тончайших стружек при высоких скоростях.

Известно, что процесс теплопередачи в неподвижной твердой среде осуществляется за счет теплопроводности и описывается уравнением [2]

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\lambda}{C\gamma} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

При наличии движения теплового источника необходимо систему координат связать с движущимся источником. При совмещении оси x с направлением движения теплового источника дифференциальное уравнение теплопроводности (1) запишется в виде

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\lambda}{C\gamma} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) + V \frac{d\Theta}{dx}, \quad (2)$$

где V – скорость перемещения теплового источника, м/с; C – удельная теплоемкость, Дж/кг·К; γ – плотность, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К.

Для решения теплофизических задач в процессах абразивной резки металлов применен метод источников (метод Грина), суть которого заключается в том, что если известен закон изменения температуры $\Theta(x, y, z, t)$ в точке $B(x, y, z)$ теплопроводящего пространства от источника теплоты, помещенного в точку $A(x', y', z')$, выделившего количество теплоты Q в момент времени t' , то температура в точке $B(x, y, z)$ от системы распределенных в пространстве источников определяется суперпозицией из температурных полей. Решение задачи сводится к определению функции $\Theta(x, y, z, t)$ от источника теплоты Q (функция Грина). Для того чтобы решение $\Theta(x, y, z, t)$ являлось единственным решением поставленной задачи, оно должно одновременно удовлетворять некоторым начальным и граничным условиям.

Начальное условие $\Theta = \Theta(x, y, z, t_0)$ определяет распределение температуры внутри исследуемой области в начальный момент времени.

Граничные условия в теории теплопроводности разделяют на четыре вида.

1. Граничные условия первого рода задают распределение температуры на границе области в любой момент времени, т.е. $\Theta(x_S, y_S, z_S, t) = \varphi(t, S)$.

2. Граничное условие второго рода задает плотность теплового потока для каждой точки теплового пространства в любой момент времени, т.е. $q(x_S, y_S, z_S, t)$.

3. Граничное условие третьего рода задает теплообмен на границе области с окружающей средой, который может быть задан в форме закона Ньютона-Рихмана:

$$q = \alpha(\Theta_O - \Theta_C); \quad \alpha(\Theta_O - \Theta_C) + \lambda \left. \frac{\partial \Theta}{\partial n} \right|_S = 0,$$

где Θ_O – температура поверхности заготовки; Θ_C – температура окружающей среды; α – коэффициент теплообмена, зависящий от свойств материала заготовки, среды и температуры.

4. Граничные условия четвертого рода выражают равенство тепловых потоков на границе раздела двух теплопроводящих сред и записываются в виде равенства:

$$-\lambda_1 \left. \frac{\partial \Theta_1}{\partial x} \right|_S = \lambda_2 \left. \frac{\partial \Theta_2}{\partial x} \right|_S.$$

Распределение тепловых источников в пространстве, время их действия и движения учитываются интегрированием.

Фундаментальным решением уравнения теплопроводности (2) является функция источника с непрерывно изменяющейся координатой x' по закону $(x' - Vt)$.

На рисунке 2 показан тепловой источник, движущийся в плоскости XOY вместе с подвижными осями координат [2].

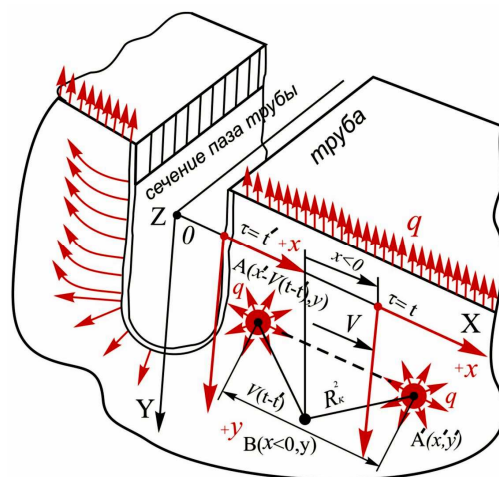


Рисунок 2 – Схема движения источника теплоты

В начальный момент времени $\tau = t'$ источник занимает положение в точке $A(x' - V(t - t'), y')$, а в конечный момент времени – в точке $A'(x', y')$. При перемещении осей координат на расстояние $V(t - t')$ температура в точке $B(x, y)$ равна суперпозиции от всех положений движущегося теплового источника.

При перемещении осей координат квадрат расстояния R^2 изменяется и в конечном положении осей координат (для $\tau = t$) в точке $A'(x', y')$:

$$R_k^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2,$$

а в начальном положении осей координат в точке $A(x' - V(t - t'), y')$:

$$R_n^2 = [x - x' + V(t - t')]^2 + (y - y')^2.$$

Известно, что если в n -мерном пространстве в точке A с координатами $x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_n$ в момент времени t' выделилось количество теплоты Q , то температура тела в точке B с координатами $x_1, x_2, \dots, x_n$ в момент времени $(t > t'_n)$ описывается функцией

$$\Theta(x_1, x_2, \dots, x_n, x'_1, x'_2, \dots, x'_n, t, t') = \frac{Q}{C\gamma[\sqrt{4\pi a(t - t')}]^n} \cdot \exp\left\{-\frac{R^2}{4a(t - t')}\right\}, \quad (3)$$

где R^2 – квадрат расстояния между точками A и B , причем $R^2 = (x_1 - x'_1)^2 + (x_2 - x'_2)^2 + \dots + (x_n - x'_n)^2$; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Функция (3) является решением фундаментального уравнения теплопроводности (2). На основании данного решения можно записать функцию Грина для различных условий задачи.

Как известно, параметры качества поверхностного слоя заготовки в значительной степени зависят от теплового фактора. Если режимы резания и другие условия обработки изменятся таким образом, что количество теплоты, генерируемой в зоне резки, возрастает, то следует ожидать изменения формы и размеров паза резки.

На основании вышесказанного, вопрос о распределении тепла между контактирующими телами должен решаться исходя из условия теплового контакта между двумя телами: разрезаемой заготовкой и абразивным кругом.

Рассмотрим вопрос о доле тепла, идущего в отрезной круг. Эта задача должна решаться из предположения дискретности контакта круга и заготовки. Если для разрезаемой поверхности быстрая смена тепловых импульсов на наиболее активных зернах сливается в сплошной фон, то для отрезного круга контакт всегда является дискретным, действующим в течение короткого времени, зависящего от скорости круга. Преимущественное тепловыделение на зернах по сравнению со связкой позволяет моделировать каждое зерно в виде полупространства, имеющего контакт на небольшом участке с другим полупространством, движущимся относительно первого со скоростью подачи боковых поверхностей круга. Вопрос о распределении тепла между этими полупространствами решается на основе равенства средних контактных температур. Это условие [1-2] приведет к формуле для определения коэффициента ввода α_g , показывающего, какая доля тепла идет в полупространство (применительно к абразивной резке α_g является коэффициентом, показывающим, какая доля тепла идет в заготовку):

$$\alpha_g = \frac{1}{1,25 \frac{\lambda_k}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{d_u \cdot V_k}} + 1}, \quad (4)$$

где λ_k – коэффициент теплопроводности отрезного круга, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; λ – коэффициент теплопроводности материала заготовки, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; a – коэффициент температуропроводности материала заготовки, $\text{м}^2/\text{с}$; V_k – скорость отрезного круга, $\text{м}/\text{с}$; d_3 – средний диаметр площадки контакта режущего зерна с заготовкой (площадка износа на зерне), м .

Эта форма записи для коэффициента ввода удобна для анализа, так как о численном значении α_g можно судить по величине безразмерного комплекса в знаменателе по сравнению с единицей. При абразивной резке на всех практически применяемых режимах комплекс

$$1,25 \frac{\lambda_k}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{d_u \cdot V_k}}, \quad (5)$$

значительно меньше единицы. Если учесть, что для большинства абразивных материалов теплопроводность в десятки раз меньше, чем теплопроводность металлов, самые приблизительные оценки показывают, что долей тепла, идущего в круг, можно пренебречь. В самом деле, если положить для всех входящих в выражение (5) величин наиболее характерные для резки значения, например для стали 08кп:

$$\frac{\lambda_k}{\lambda} = 0,1; \quad a = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad d_u \approx 0,1 \text{ мм}; \quad V_k = 80 \text{ м}/\text{с},$$

получим

$$1,25 \cdot 0,1 \sqrt{\frac{8 \cdot 10^{-6}}{0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 80}} = 0,4 \cdot 10^{-2}.$$

Подставляя это значение в выражение (4), получим, что $\alpha_g \approx 0,99$, т.е. в круг поступает не более 1% общего количества тепла. Поэтому при расчете контактной температуры в зоне разрезки, долей тепла, идущего в отрезной круг, можно пренебречь.

Общая плотность теплового потока, образующегося в зоне разрезки

$$q = \frac{P_z \cdot V_k}{F_k},$$

где P_z – тангенциальная составляющая общей силы резания, Н; V_k – скорость отрезного круга, м/с; F_k – площадь контакта круга и разрезаемой заготовки, м².

Используя принцип наложения температурных полей от элементарных источников теплоты с учетом интегрирования в пространстве и во времени, можно определить температурное поле источника, произвольным образом распределенного в пространстве и действующего в течение любого промежутка времени по формуле [3]:

$$\Theta(x) = \frac{q}{2C\gamma\sqrt{\pi a\tau}} \exp\left[-\frac{(x-h/2)^2}{4a\tau}\right],$$

где C – удельная теплоемкость разрезаемого металла, Дж/(кг·°C); $h/2$ – начальный размер половины паза разрезки, мм; x – расстояние от средней линии паза до рассматриваемого сечения, мм; τ – время разрезки, с; γ – плотность материала разрезаемой заготовки, кг/мм³.

На рисунке 3 представлен график изменения температуры по длине заготовки при разрезке трубной заготовки из стали 08кп.

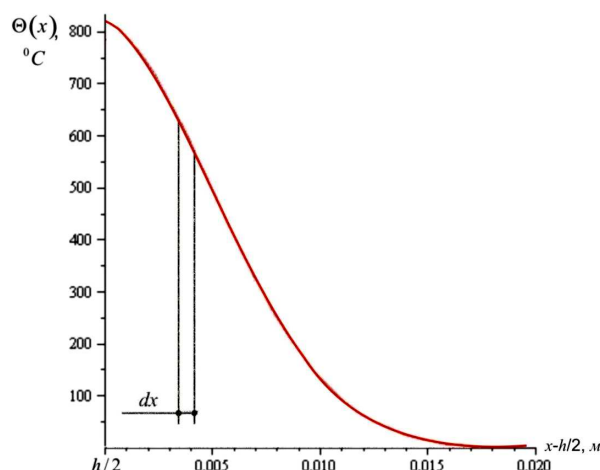


Рисунок 3 – График изменения температуры по длине заготовки:
 $d_3 = 42,4$ мм, материал заготовки – сталь 08кп, круг 400×4×32, 14AF30

Из рисунка 3 видно, что температура изменяется по кривой с максимумом ее значений на определенном расстоянии от зоны контакта инструмента и заготовки. Такое расположение максимума на кривой $\Theta = f(x)$ соответствует теплофизической природе процессов, протекающих в зоне контакта. По мере перемещения источника теплообразования происходит локализация процесса контактного пластического деформирования и, следовательно, повышение интенсивности тепловыделения в единице объема металла с приближением источника тепловыделения и контактной поверхности. На некотором расстоянии происходит переход от пластического течения к граничному трению и смена теплоисточника от объемного к источнику, в котором тепловыделение происходит в тонком граничном слое. Далее по мере перемещения вдоль контакта интенсивность тепловыделения падает. В итоге формируется следующая закономерность. В пределах пластического контакта интенсивность тепловыделения в зоне контактных пластических деформаций выше интенсивности стока теплоты в инструмент. Поэтому идет накопление теплоты и температура $\Theta(x)$ возрастает. На участке контакта картина меняется:

интенсивность стока теплоты из зоны граничного трения в инструмент выше, чем интенсивность тепловыделения, поэтому температура $\Theta(x)$ на этом участке уменьшается.

Как показали расчеты, заготовка неравномерно нагревается по всей длине. Вследствие этого линейное тепловое расширение заготовки в каждом диаметрально сечении ее различно и может быть рассчитано по формуле [3]:

$$\Delta h = \alpha_0 \int_{h/2}^l \Theta(x) dx,$$

где α_0 – температурный коэффициент линейного расширения материала; l – размер исследуемого участка заготовки.

Тепловое расширение материала паза заготовки зависит от теплофизических свойств (C , λ) его материала и изменения температуры в зоне резания.

На рисунке 4 показано изменение ширины паза резки от температурного воздействия на одну из двух рабочих боковых поверхностей отрезного круга.

Необычный характер теплового процесса при абразивной резке, характеризующийся высокими скоростями нагрева, приводит к существенной зависимости глубины и характера структурных превращений от кинетических параметров теплового процесса. Это видно из следующего анализа.

В процессе резки уголки периферийной части круга скругляются, и ширина прорезаемого паза получается меньше, чем толщина круга на некотором удалении от периферийной части.

В результате теплового расширения прорезаемый паз сужается больше и по мере резки круг все сильнее заклинивает, т.е. создается как бы защемляющий эффект.

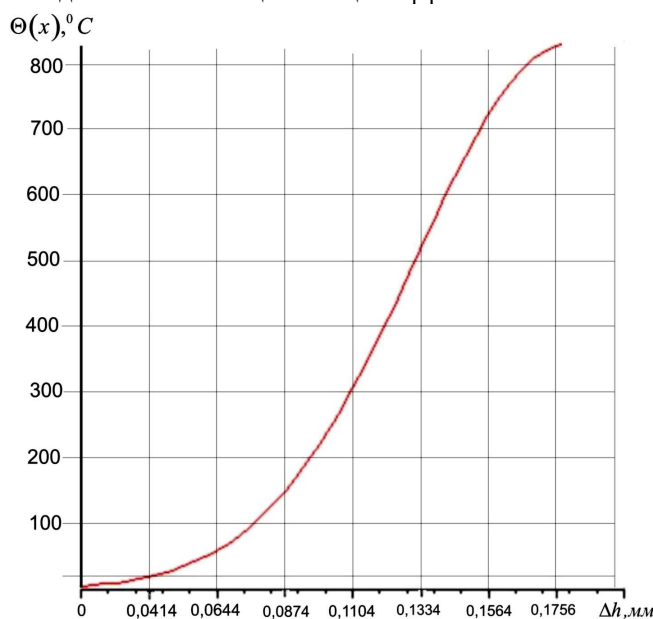


Рисунок 4 – График воздействия температуры на изменение паза резки:
разрезаемый материал – сталь 08кп

У отрезных кругов с гладкими боковыми поверхностями эффект процесса резания по ширине паза резки отсутствует, в результате чего защемляющий эффект по мере внедрения круга в заготовку все усиливается, что приводит к большому боковому трению, высокой теплонапряженности процесса. Как известно [1], появление прижогов и трещин при резке непосредственно связано с увеличенной контактной температурой, превышающей допустимую величину Θ_{np} .

При резке кругами с шероховатой боковой поверхностью наблюдается совсем иная картина. Шероховатые боковые поверхности имеют высокую режущую способность и поэтому легче удаляют припуск с торцов заготовки, который образуется за счет износа уголков круга и теплового расширения.

Защемляющий эффект, а, следовательно, боковое трение и теплонапряженность процесса резки снижаются, что способствует уменьшению вероятности образования прижогов на поверхностях реза и приводит к уменьшению энергозатрат.

Действие всех рассмотренных выше факторов обеспечивает заметное снижение составляющих силы резания, контактной температуры и увеличение режущей способности при резке кругами с

шероховатими торцями. Это позволяет отрезным кругам с шероховатой боковой поверхностью сохранять длительное время высокую стойкость и работоспособность, в то время как торцы обычных кругов быстро засаливаются, теряют свои режущие свойства, что способствует их интенсивному износу [1, 3].

Анализируя выше сказанное можно сделать вывод: процесс абразивной резки сопровождается выделением большого количества тепла, которое приводит к образованию на поверхности реза дефектного слоя. Установлено, что контакт боковых сторон круга с металлом происходит из-за расширения материала заготовки под действием теплоты, возникающей при резке, колебаний высоты круга и неравномерности износа его боковых поверхностей.

Перспективой дальнейших исследований является определение кинематических параметров процесса абразивной резки и их связь с геометрией рабочей поверхности отрезного круга.

Бibliографический список использованной литературы

1. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. — М.: Машиностроение, 1978. — 167 с.
2. Основы тепловых явлений при шлифовании деталей машин / А.В. Якимов [и др.]. — Одесса: ОГПУ, 1997. — 272 с.
3. Якимов А.В. Теплофизика механической обработки / А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. — К.: Одесса: Лыбидь, 1991. — 240 с.
4. Новосёлов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. — 232 с.

Поступила в редакцию 11.04.2012 г.

Левченко О.О. Дослідження процесу взаємодії інструменту та заготовки при абразивній розрізці труб

В роботі приведені результати досліджень процесу взаємодії відрізного круга та заготовки, що розрізується на основі теплодеформуючого аналізу зі встановленням взаємозв'язку умов обробки, режимів різання з конструктивними параметрами абразивного інструменту.

Ключові слова: коефіцієнт теплопровідності, температурні деформації заготовки, джерела тепла, температурні напруження, питома теплоємність матеріалу.

Lewtschenko L.A. The study of the interaction of tool and workpiece during abrasive cutting labor

The paper presents the results of studies of the interaction cutoff wheel and cut tube stock, based on analysis heatdeforming with the establishment of the relationship of processing conditions, the cutting of the design parameters of the abrasive tool.

Keywords: thermal conductivity, thermal deformation of the workpiece, heat sources, thermal stresses, the specific heat of the material.