

В.П. Маршуба, канд. тех. наук, И.Б. Плахотникова,  
Харьков, Украина

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ СПИРАЛЬНОГО СВЕРЛА

*The method for the investigation of distribution of the heat flows and heat sinks in the detail and cutting tool at peck feed drilling of linear aluminum alloys is proposed. On the basis of proposed method which allows to define the relationships for heat distribution, it is possible to determine the temperature fields both on the of drill's surface, and on its body. The usage of these relationships will allow determining the necessary conditions for processing of apertures with maximum productivity while processing of details from these alloys.*

**Введение.** Процесс превращения поверхностного слоя заготовки в стружку сопровождается интенсивным тепловыделением под действием ряда физических явлений и взаимодействием между ними. К этим явлениям, в частности, необходимо отнести следующие: пластическая деформация поверхностной части материала под действием удельного давления с последующим сдвигом этой части, относительно основной массы; сопротивление материала заготовки сдвигу под воздействием удельного давления; действие силы трения по передней и задней поверхности режущего инструмента и другие основные факторы, характеризующие процесс резания. Проявление этих факторов выражается в протекании сложных тепловых явлений, т.е. возникновении источников тепла и распределения потоков и стоков теплоты в системе деталь-инструмент-стружка. Это сложное тепловое взаимодействие принято называть температурой резания, т.е. это понятие, отображает в какой то мере взаимодействие между физическими явлениями, и используется при описании характеристик процесса резания, как в целом, так и частности.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Исследованиями вопроса возникновения источников тепла и распределения потоков и стоков теплоты при резании материалов, занимались видные ученые, среди которых Я.Г. Усачов и др. В изданиях вышедших в последнее время, посвященных теплофизике процесса обработки металлов резанием, в частности в работе А.М. Даниеляна [1], приведены данные по распределению потоков теплоты в детали, инструменте и стружке при неглубоком сверлении. Однако в этих работах процесс возникновения источников тепла и распределения потоков и стоков теплоты описан не полностью, так как не учитывает в полной мере взаимодействие всех физических явлений присущих глубокому сверлению и не учитываемых при неглубоком сверлении.

При описании характеристик процесса сверления глубоких отверстий пользуются данными о температуре резания, но когда речь идет о влиянии конструктивных элементов и геометрических параметров спирального сверла

на температуру, этих данных недостаточно, по данным работ П.А. Юджовского и др. [2]. Из данных этого источника следует, что необходимо знать распределение температурных полей по режущим кромкам, на поверхности, и в теле инструмента, что существенно влияет на стойкость сверла и его прочность. Но, тем не менее, и данная работа не учитывает в полной мере всех факторов присущих процессу обработки глубоких отверстий. В частности метод исследования, предложенный в работе [2], не учитывает той части теплоты, которая уходит в деталь. Поэтому необходимо с одной стороны использовать данный метод, с другой учесть теряемую часть общего количества теплоты.

Следовательно, необходимо создать метод, который с одной стороны учтет тепловые явления в режущем инструменте, с другой – в детали.

**Цель исследований.** Разработать комплексный метод определения закономерностей распределения теплоты в зоне резания при глубоком сверлении в зависимости от конструктивных элементов и геометрических параметров режущей части спирального сверла. Взяв за основу разработанный комплексный метод и найденные закономерности распределения теплоты, появляется возможность уточнить распределение тепловых полей по поверхности и в теле инструмента, а также в обрабатываемой детали.

**Изложение основного материала.** Как известно, для того чтобы узнать распределение тепловых полей на поверхности и в теле режущего инструмента, необходимо определить участки с повышенной и пониженной температурой. На основе этого возможно определить направление потоков и стоков теплоты, исходя из условий тепловой конвенции. Поэтому, для расчета температуры в любой точке тела, необходимо решить дифференциальное уравнение теплопроводности в конкретных условиях, называемых краевыми. Задача решается с помощью метода точечных мгновенных источников тепла (далее по тексту ТМИ). В основе этого метода, по данным работ П.А. Юджовского и др. [1], лежат два следующих положения:

1) Температурное поле в неограниченном теле, возникающее под действием источника теплоты любой формы, можно получить как результат комбинации температурных полей, возникающих под действием системы точечного мгновенного источника.

Под точечным мгновенным источником (ТМИ) понимается горячая точка, вспыхнувшая и погасшая одновременно, которая при этом выделила  $q$  калорий теплоты.

Мощность этого элементарного источника зависит в первую очередь от интенсивности тепловыделения. Представляя точечный мгновенный источник, как бесконечно большое количество ТМИ, можно рассчитать температуру в бесконечном теле от нагретой линии (т.е. от линейного ТМИ) или как в нашем случае от главной режущей кромки. Идя дальше, возможно системой мгновенных линейных источников имитировать действие плоского или объемного источника, т.е. рассчитать температуру в любой точке неограниченного тела от действия источника теплоты, возникающего на каком-либо ограниченном участке контактной поверхности инструмента с изделием, ли-

бо стружкой, или в ограниченном пластически деформированном объеме срезаемого слоя.

При определении температурных полей в теле спирального сверла необходимо сделать следующие допущения:

- если источник действует не мгновенно, а на протяжении некоторого времени, то температурное поле получается соответственно интегрированным во времени;

- если источник действует не мгновенно и перемещается линейно, то температурное поле получается соответственно интегрированным в пространстве;

- если источник не находится в определенном месте, а перемещается, то движение его может быть имитировано рядом последовательных вспышек и гашением.

Для расчета температуры вдоль главной режущей кромки в этом случае вновь производим интегрирование, суммируя значения температур, возникающих от бесконечно большого количества элементарных импульсов, с учетом координат, характеризующих мгновенное положение каждого из них во времени.

2) Изложенное положение метода источников тепла позволяет, применяя различные приемы интегрирования, рассчитать температуру от действия неподвижных или движущихся источников тепла в неограниченном теле. Однако в этом случае теплообмен на его наружных поверхностях не учитывается. В практических расчетах приходится иметь дело только с телами ограниченных размеров.

В подобных случаях при расчете температуры в теле конечных размеров влияние теплообмена его поверхностей с окружающей средой, учитывается введением системы фиктивных (отраженных) источников тепла. Для этого, ограниченное тело условно представляем в виде неограниченного. Симметрично действующему источнику, по отношению к граничной плоскости, размещается фиктивный источник такой же мощности. Тепловой поток от действующего источника компенсируется тепловым потоком от фиктивного, и в любой точке, лежащей на граничной плоскости, будет обеспечено отсутствие теплообмена в направлении, перпендикулярном этой плоскости. Таким образом, для определения распределения температуры в ограниченном теле с нетеплопроводной плоскостью (т.е. для случаев, которые приходится обычно рассматривать при резании материалов), необходимо суммировать поля, вызванные действительным и фиктивным источником. В случае если источник действует непосредственно на нетеплопроводной поверхности, оба источника (действительный и фиктивный), совмещаются в одной точке (линии или плоскости). Практически это приводит к необходимости принимать в расчет удвоенную мощность действительного источника.

При теоретическом анализе тепловых явлений и определении закономерностей расположения температурных полей по методу мгновенных источников теплоты, целесообразна схематизация процесса, позволяющая ис-

ключить отдельные второстепенные факторы и сделать процесс доступным математическому описанию.

Для схематизации процесса глубокого сверления отверстий принимаются следующие допущения:

- основное тепловыделение происходит от источников, расположенных на главных режущих кромках;

- фактическая мощность источников определяется суммарным тепловыделением от среза и деформации материала, трения стружки о поверхность  $A\gamma$  инструмента и изделия о поверхность  $A\alpha$  сверла, трения инструмента о обработанную поверхность заготовки;

- режущая часть сверла в зоне резания есть бесконечный клин, движущийся по полупространству (поверхность резания);

- значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности не зависят от значений температуры.

Температурное поле, возникающее от линейного источника, имеющего форму режущей кромки, определили суммированием значений температурных полей, вызванных действием системы точечных мгновенных источников. Температура в точке «А» от действия вращающегося точечного источника С (рис. 1, а) определится выражением, являющимся решением дифференциального уравнения теплопроводности с помощью метода точечных мгновенных источников теплоты для тела с проводящей тепловой поверхностью:

$$\Theta_{\text{точ}}^{\text{спрац}} = \frac{q}{C_p \gamma_0 (4\pi a)^{3/2}} \int \frac{dt_1}{(t - t_1)^{3/2}} \exp\left[-\frac{R^2}{4a(t - t_1)}\right] \quad (1)$$

где  $q$  – интенсивность точечного источника;  $(t - t_1)$  – время, прошедшее от теплового импульса до момента рассмотрения, в сек.;  $C_p \gamma_0$  – объемная теплоемкость, в Дж/мм<sup>3</sup>;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $R$  – расстояние от рассматриваемой точки до источника, в мм.

Тогда как,

$$\exp\left[-\frac{R^2}{4a(t - t_1)}\right] = e^{-\frac{R^2}{4a(t - t_1)}} \quad (2)$$

где  $e$  – основание натуральных логарифмов.

В реальном процессе резания тепловыделение в различных участках режущей кромки сверла неодинаково. Увеличение скорости резания приводит к увеличению интенсивности тепловыделения по мере удаления от оси сверла. Возрастание передних углов к периферии наоборот снижает тепловыделение. Эти выводы подтверждаются наличием на элементах стружки распределения всех цветов побежалости и распределением её интенсивности по направлению от центра сверла к периферии.

Совместное решение обеих закономерностей приводит к следующему выражению для определения интенсивности тепловыделения в каждой точке режущей кромки:

$$q = q_0(L - \ell)^{-d/2} \quad (3)$$

где  $q_0$  – максимальное значение интенсивности тепловыделения;  $L$  – длина главной режущей кромки, в мм;  $\ell$  – расстояние от рассматриваемой точки до оси вдоль кромки сверла, в мм.

Представим вращающийся мгновенный линейный источник, как сумму бесконечно большого числа точечных мгновенных источников.

В реальном процессе каждая режущая кромка сверла перемещается по конвольютной винтовой поверхности. Связав в этом случае координатный полюс с вершиной сверла, получим расстояние от точки до движущегося источника (рис. 1, б).

С учетом переменной величины интенсивности тепловыделения, выражение для определения температуры от движущегося, по конвольютной винтовой поверхности источника, принимает вид:

$$\Theta_{\text{МИН}} = \frac{q}{C_p \gamma_0 (4\pi a)^{3/2}} \int_0^L d\ell \int_0^t \frac{dt}{\tau^{3/2}} (1 - e^{-a/\tau}) \exp\left[-\frac{R^2}{4a\tau}\right] \quad (4)$$

Здесь:

$$R^2 = \rho_0^2 + 2\rho_0 \cdot U_s t_1 \cdot \cos \rho_0 + U_s^2 t_1^2 + \ell^2 - 2\ell [\cos(\omega t_1 - \varphi) \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta_0 \rho_0 + \cos \varphi (\cos \beta_0 \rho_0 + U_s t_1)]$$

где  $\beta_0, \rho_0$  – сферические координаты точки по отношению к начальному положению вершины сверла, в мм;  $U_s$  – скорость поступательного движения сверла, в мм/об;  $\omega$  – угловая скорость сверла, в рад.

Для решения выражения заменяем подынтегральную функцию некоторой функцией, принимающей в нескольких точках значение подынтегральной. С этой целью применяем интерполяционный полином Лагранжа. Это выражение значительно упрощается при использовании безразмерных критериев. При этом все линейные размеры выражаются в зависимости от длины режущей кромки, принимаемой за условную единицу. Выражение для определения температуры в этом случае принимает вид:

$$\Theta = \frac{q}{4\pi a} \cdot k \quad (5)$$

Величина  $k$ , содержащая интегралы, выраженные в безмерных величинах, принимает конкретное значение при определенном положении точки на главной режущей кромке.

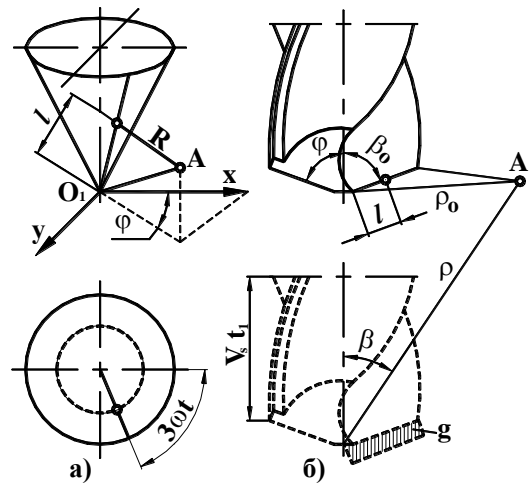


Рис. 1 – Схема к определению температурных полей на главной режущей кромке, поверхностях  $A\gamma$  и  $A\alpha$  сверл методом мгновенных источников: а) от вращающегося источника; б) при сложном движении источника.

Однако метод, описанный в работе [2], имеет существенный недостаток, в частности он, предусматривает только первичную конвенцию теплоты при срезе и деформации материала в деталь, инструмент и стружку, тогда как вторичная конвенция из стружки в инструмент и деталь не рассматривается.

Очевидно, влияние одного первичного источника теплоты на распределение тепловых полей вдоль главной режущей кромки не достаточно, необходимо определить количество теплоты, перешедшее в обрабатываемую деталь.

Распределение потоков теплоты в детали при сверлении глубоких отверстий определяется выражением, являющимся решением дифференциального уравнения теплопроводности и зависит от количества теплоты, полученной в результате трения по поверхности  $A\alpha$  и работы направленной на деформацию и срез материала.

Определяем температуру обрабатываемой поверхности  $A\gamma$  в местах контакта ее с поверхностью  $A\alpha$  инструмента по формуле, предложенной в работах Г.И. Грановского и др. [3–4]:

$$\Theta_{ТЗ} = \frac{2,07\tau_{F1}\sqrt{\xi_1 V}}{\sqrt{\lambda C_\gamma}} \quad (6)$$

где  $\tau_{F1}$  – удельная сила трения по поверхности  $A\alpha$ ,  $\tau_{F1} = \tau_\alpha + \tau_\gamma$ ;  $\xi_1$  – длина контакта поверхности  $A\alpha$  с поверхностью  $A\gamma$  отверстия;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Дж/см с °С;  $c$  – теплоемкость, в Дж/К;  $\gamma$  – удельный вес, в кгс/см

Определяем температуру резания в детали в момент процесса резания по формуле, предложенной в работах А.Н. Резникова и др. [5, 6]:

$$\Theta_P = \frac{g\sqrt{a}}{2\lambda\sqrt{\beta}} \exp\left[-|Y_{и} - Y|\sqrt{\frac{\beta}{a}}\right] \quad (7)$$

где  $\beta = 2\lambda\rho/C_p\gamma_0$ ;  $Y_{и}$  – координаты источника, мм;  $y$  – координаты точки тела, мм;  $p$  – периметр контактной площадки,  $p = (a + b)$ , мм<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, кал/(см сек град).

Значение  $\lambda$ , по данным работ [5] для алюминия марки А2, равно 0,536 Дж/см с °С;  $C_p = 9,64$  кал/см<sup>3</sup>град;  $\omega = 0,841$  см<sup>2</sup>/град. Тогда из уравнений 6 и 7 получаем уравнение распределения температуры в детали от воздействия двух источников в зоне резания:

$$\Theta_D = \frac{2,07\tau_{F1}\sqrt{\xi_1 V}}{\sqrt{\lambda C_\gamma}} + \frac{g\sqrt{a}}{2\pi\sqrt{\beta}} \exp\left[-|Y_{и} - Y|\sqrt{\frac{\beta}{a}}\right] \quad (8)$$

Для определения количества теплоты, перешедшей в деталь от стружки в зоне обработки, используем формулу, полученную аналитически, то есть  $Q_c = 1/3Q_c$ . По данным работы А.Н. Резникова [5], точное количество теплоты, перешедшее в стружку в результате ее деформации ( $Q_{dc}$ ), можно определить по формуле:

$$Q_{PC} = 0,6 \frac{\omega k}{\lambda V} b^* qd \quad (9)$$

где  $k$  – коэффициент продольной усадки стружки,  $k=0,2$ ;  $qd$  – интенсивность источника теплоты, возникающего под воздействием деформации стружки:

$$qd = 3,9 \frac{V \cos \gamma}{abk \sqrt{k^2 - 2k \sin \gamma + 1}} \times [(P_z - 0,252 \sigma_B b l_3)(k - \sin \gamma) - (P_N - 0,252 \sigma_B b l_3) \cos \gamma] \quad (10)$$

где  $b^*$  – доля теплоты в том теле, по которому перемещается источник, отсюда:

$$b^* = \frac{1}{1 + 1,33 \frac{k \sqrt{\sin \beta}}{\sqrt{Re_d}}} \quad (11)$$

где  $Re_d$  – безразмерный критерий Пекле для источника, эквивалентного теплоте деформации:

$$Re_d = \frac{1}{6} \cdot \frac{V_a}{\omega} \quad (12)$$

Количество теплоты, перешедшее из инструмента в деталь в результате вторичной конвенции потоков теплоты, можно определить по формуле приближенно из-за их значения:

$$Q'_{И} = 0,1 Q_{И} \quad (13)$$

На основе разработанного комплексного метода созданы следующие схемы расположения термопар для измерения температуры в режущем инструменте (см. рис. 2) и детали (см.рис. 3) в процессе обработки глубоких отверстий.

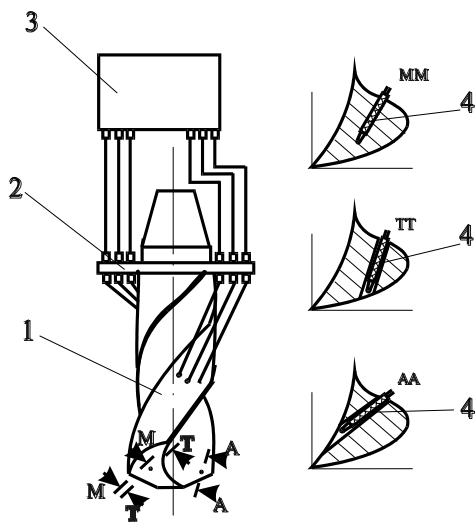


Рис. 2 – Схема измерения температуры в режущем клине сверла, по поверхностям  $A\gamma$  и  $A\alpha$ . 1) сверло; 2) плата контактов; 3) регистрирующая аппаратура; 4) термопары.

На рис. 2 показано расположение термопар в теле режущего инструмента, которые позволяют контролировать температуру на поверхностях  $A\gamma$  и  $A\alpha$ , кроме этого и в теле инструмента, что позволяет более точно определить расположение тепловых полей в инструменте по методу предложенному в работе [2].

На рис. 3 показано расположение термопар в теле обрабатываемой детали, которые позволяют контролировать температуру на поверхностях  $A\gamma$  и в теле заготовки, что позволяет более точно определить расположение тепловых полей в детали по методу предложенному автором. Расположение термопар в детали выполняется через

определенные промежутки (автор в своих опытах использовал расстояние в один диаметр сверла) со смещением одного комплекта относительно другого на половину диаметра. Первый комплект термопар 4 располагался таким образом, чтобы в процессе резания он перерезался, что позволяло измерять

температуру на вершине зуба. Второй комплект термопар устанавливался таким образом, чтобы в процессе обработки между ними и обрабатываемой поверхностью оставался минимальный промежуток не более 0,5 мм, что позволит контролировать температуру в теле детали.

**Вывод.** Теоретический анализ тепловых явлений при глубоком сверлении предложенный этим методом не позволяет учитывать некоторые конкретные условия, имеющие место в процессе резания материала. К ним можно отнести особенности конструкции и заточки сверла, изменение состояния поверхностей и кромок сверла в результате износа, допущенная систематизация процесса и т.д. Поэтому аналитические данные должны быть дополнены результатами непосредственных измерений температуры, как в зоне резания, так и в зоне обработки. Исходя из этого, делаем вывод:

1. На основе полученных теоретических и экспериментальных значений распределения температуры на поверхностях и кромках сверла, а также детали, возможно, представить распределение температурных полей в теле детали и инструмента.

2. Анализ опытных и теоретических данных о направлении потоков и стоков теплоты в детали при обработке глубоких отверстий показал, что распределение температурных полей зависит от конфигурации заготовки и расположения канала отверстия относительно внешнего и внутреннего контура детали, свойств обрабатываемого материала (теплопроводность) и т.д. Кроме этого, на расположение температурных полей в детали большое влияние оказывает вторичное перераспределение потоков и стоков теплоты в системе деталь–инструмент–стружка.

3. Предложенная схема расположения термопар позволяет наиболее полно определять температуру, как в сверле, так и в детали в процессе глубокого сверления отверстий.

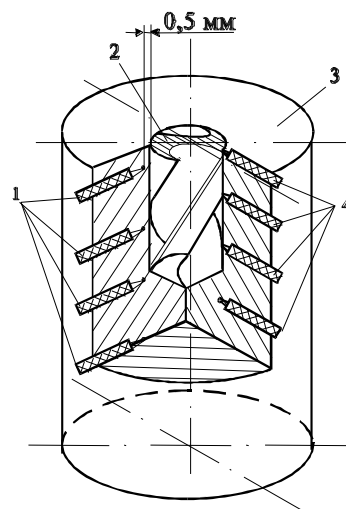


Рис 3. – Схема измерения температуры в детали при ГБС отверстий. 1) хромель-алюмелевая термопара; 2) сверло; 3) образец из обрабатываемых материалов; 4) срезаемая хромель-алюмелевая термопара.

**Список литературы:** 1. Даниелян А.М. Теплота и износ инструмента при резании металлов. - М.: Машгиз, 1954. - 276 с. 2. Юдковский П.А.. Повышение качества спиральных сверл. / Крючков И.К., Шевель А.П. - Челябинск: Южно-Уральское кн. изд., 1970. - 110 с. 3. Грановский Г.И. Кинематика резания. - М.: Машгиз, 1948. - 199 с. 4. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. - М.: Высш. школа, 1985. - 304 с. 5. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. - М.: Машиностроение, 1990. - 288 с.

Поступила в редакцию 10.12.04