

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**Ташкентский Государственный Технический Университет  
им. Абу Райхана Беруни**

**МЕХАНИКО-МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра «Технология машиностроения»**

**РЕФЕРАТ**

на тему:

**“Исследование температуры в зоне резания металлов”**

Выполнил Жураев Ж.

**Ташкент 2011 г.**

## **СОДЕРЖАНИЕ**

1. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ.  
ТЕПЛОТА РЕЗАНИЯ.
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ.
3. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ РЕЗАНИЯ  
ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ.
4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ.

## 1. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ. ТЕПЛОТА РЕЗАНИЯ

Один из главнейших факторов, определяющих процесс резания, — теплота, образующаяся в результате работы резания. Законы теплообразования объясняют ряд явлений, связанных с нагрузкой резца, его стойкостью, качеством обработанной поверхности. Чтобы правильно использовать режущий инструмент, необходимо знать эти законы.

Теплота  $Q$  в процессе резания образуется в результате:

- 1) внутреннего трения между частицами обрабатываемого металла в процессе деформации  $Q_{\text{деф}}$ ;
- 2) внешнего трения стружки о переднюю поверхность резца  $Q_{\text{п.т}}$ .
- 3) внешнего трения поверхности резания и обработанной поверхности о задние поверхности резца  $Q_{\text{з.тр}}$ ;
- 4) отрыва стружки, диспергирования  $Q_{\text{дисп}}$  (образования новых поверхностей)

$$Q = Q_{\text{деф}} + Q_{\text{п.тр}} + Q_{\text{з.тр}} + Q_{\text{дисп}}$$

Предполагая, что механическая работа резания полностью переходит в теплоту, получим

$$Q = \frac{R}{E} = \frac{P_z v}{E} = \frac{P_z v}{427} \text{ ккал/мин,}$$

где  $Q$  — количество теплоты в ккал/мин;  $R$  — работа резания в кгс м/мин ( $R = P_z v$ );

$E$  — механический эквивалент теплоты ( $E = 427$  кгс м/ккал).

В действительности в теплоту обращается не вся работа резания: небольшая часть ее переходит в потенциальную энергию искаженной кристаллической решетки. Поэтому более правильно формулу выразить так:

$$Q = \frac{P_z v}{427} \alpha_0$$

где  $\alpha_0$  — коэффициент, учитывающий указанные потери, незначительные по величине. В обычных расчетах этой потерей пренебрегают.

Для успешного воздействия на процесс резания важно знать не только количество теплоты, но и распределение ее, т. е. степень концентрации теплоты в различных участках изделия, стружки и резца. Если бы вся образующаяся теплота быстро и равномерно распределялась по всему объему изделия и инструмента, она быстро отводилась бы в пространство, не причиняя им вреда. В действительности процесс протекает иначе: большое количество теплоты концентрируется в определенных зонах, сильно повышая их температуру. Здесь неизбежны потеря резцом твердости и затупление его и даже возможно изменение структуры тончайшего слоя обработанной поверхности, если не будут приняты соответствующие меры.

Некоторые исследователи (А. Я. Малкин) полагают, что регулированием потока теплоты можно воздействовать на процесс резания в благоприятную сторону и тем облегчить работу инструмента и повысить качество обработанной поверхности.

На основе теоретического и экспериментального исследований процесса теплообразования можно выявить законы изменения температуры резания (на поверхности контакта стружки с передней гранью резца), а также температуры режущего инструмента и обрабатываемой детали в зависимости от различных факторов.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ

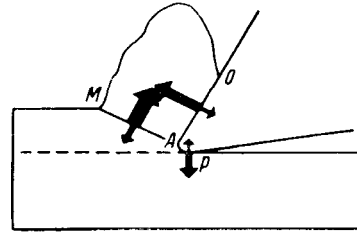
Надо полагать, что в процессе образования сливной стружки теплота концентрируется в трех основных зонах (рис. 1): в зоне сдвига элементов стружки  $AM$ , где происходит пластическая

деформация; на площади контакта стружки по передней поверхности инструмента  $AO$ ; на площади контакта задней грани инструмента с обрабатываемой деталью.

Работой диспергирования обычно пренебрегают.

Каждый источник теплоты имеет свою сферу непосредственного воздействия (рис. 1)

Следовательно, наиболее высокая температура — температура резания — должна наблюдаться в стружке в зоне контакта ее с передней поверхностью инструмента, так как здесь концентрируется наибольшее количество теплоты,



образующейся в результате деформации стружки и трения ее по передней поверхности резца. Например, наибольшее количество теплоты, образующейся вследствие деформации (на поверхности  $AM$ ), остается в стружке и частично поглощается обрабатываемой деталью. Теплота трения стружки (на поверхности  $AO$ ) остается в основном в стружке и частично (3—5%) направляется в инструмент. Теплота трения по задним граням инструмента (поверхность  $AP$ ) направляется в деталь и резец. При обработке металлов с низкой теплопроводностью, например жаропрочных и титановых сплавов, в резец отводится до 20—40% всей теплоты.

Потери теплоты от конвекции и радиации в процессе резания ничтожно малы; невелико количество теплоты, уходящей в деталь, так как стружка весьма быстро формируется в зоне резания и столь же быстро проходит зону контакта с резцом. Однако теплота, поглощаемая изделием из жаропрочных сталей и сплавов, резко возрастает и при малых скоростях может достичь 35—45% всей теплоты резания.

Пренебрегая работой трения по задним граням инструмента (которая мала при достаточно острой режущей кромке и большом заднем угле), можно полагать, что подавляющее количество теплоты должно сосредотачиваться в стружке. Опыты Н. Н. Савина, Я. Г. Усачева, С. С. Можаяева и др., определявших количество теплоты в стружке калориметрическим методом, показали, что в зависимости от скорости резания, глубины резания и подачи при обработке конструкционной стали в стружке содержалось 60—80% всей теплоты резания, а при скоростных режимах резания свыше 90%.

На рис. 2, *a* показана схема сил, действующих в зоне резания. Считая, что вся работа резания в единицу времени  $R_z = P_z v$ , работа трения стружки по передней поверхности

$R_{II} = F_{II} v_{CTP} = F_{II} v \frac{1}{\xi}$  ( $\xi$  — усадка стружки), получим работу деформации стружки

$$R_{ДЕФ} = R_z - R_{II} = P_z v - F_{II} v \frac{1}{\xi}.$$

Но  $F_{II} = P_z \sin \gamma + P_y \cos \gamma$  (пренебрегаем силой трения по задней поверхности резца) и, следовательно, работа деформации стружки

$$R_{ДЕФ} = P_z v \left[ 1 - (\sin \gamma + \mu_0 \cos \gamma) \frac{1}{\xi} \right],$$

где  $\mu_0 = \frac{P_E}{P_z}$ .

Повышение температуры стружки благодаря ее деформации составит в среднем

$$(\theta_{ДЕФ} - \theta_0)_{CP} = \frac{\alpha_0 P_z v \left[ (1 - \beta_0) - (\sin \gamma + \mu_0 \cos \gamma) \frac{1}{\xi} \right]}{Ecdbav}$$

где  $\theta_{ДЕФ}$  — средняя температура стружки, когда последняя покидает зону деформации, в °С;  $\theta_0$  — температура окружающей среды в °С;  $\alpha_0$  — коэффициент, учитывающий потерю теплоты на скрытую энергию деформации (принимается  $\alpha_0 = 0,95$ );  $\beta_0$  — коэффициент, учитывающий переход части тепла в изделие (по Вейнеру  $\beta_0 = 0,1$  при  $v = 100$  м/мин,  $\beta_0 = 0,05$  при  $v = 300$  м/мин);  $E$  — механический эквивалент теплоты ( $E = 427 \cdot 10^{-3}$  кгс м/ккал);  $c$  — теплоемкость нагретой стружки в ккал/кгс град;  $d$  — плотность стружки ( $7,8 \cdot 10^{-6}$  кгс/мм<sup>3</sup>);  $b$  — ширина среза в мм;  $a$  — толщина среза в мм.

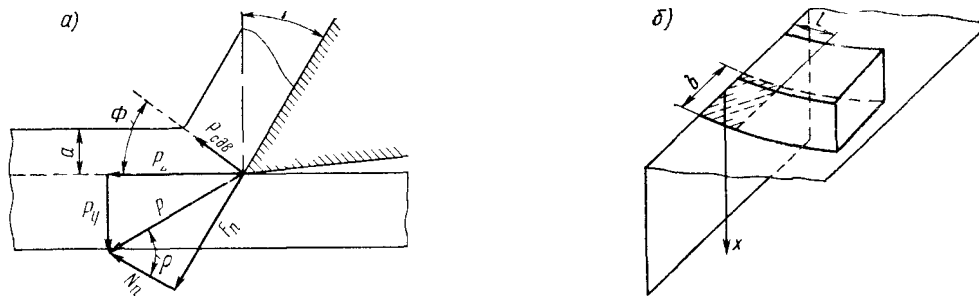


Рис. 2. Схема сил, действующих в процессе резания (а) и схема контакта стружки и резца (б)

Принимая  $\frac{P_z}{ba}$  —  $p$  кгс/мм<sup>2</sup> (удельная сила резания) и пренебрегая значением  $\theta_0$ , получим

$$\theta_{ДЕФ.СР} = \frac{\alpha_0 p \left[ (1 - \beta_0) - (\sin \gamma + \mu_0 \cos \gamma) \frac{1}{\xi} \right]}{Ecd}$$

Покидая зону деформации, нагретая до температуры  $\theta_{ДЕФ.СР}$  стружка трется по передней поверхности резца со скоростью  $\frac{v}{\xi}$  на площади контакта шириной  $b$  и длиной  $l$  (рис. 2, б).

Теплота работы силы трения по передней грани в единицу времени

$$Q_{ТР.П} = \frac{F_{П} v}{E \xi}$$

Чтобы определить температуру на передней поверхности резца, полученную в результате трения стружки, будем рассматривать резец как твердый стержень с поперечным сечением, равным  $bl$ , на одной стороне которого поддерживается постоянная температура  $\theta_{ТР.П}$ . Для решения поставленной задачи используется уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial \theta_{ТР.П}}{\partial \tau} = \omega \frac{\partial^2 \theta_{ТР.П}}{\partial x^2},$$

где  $\omega = \frac{\lambda}{c'd'}$  — температуропроводность;  $\lambda$  — теплопроводность резца;  $c'$  — теплоемкость резца;  $d'$  — плотность;  $\tau$  — время, в течение которого стружка проходит площадь контакта длиной  $l$ ;

$$\tau = \frac{l}{v_{СТР}} = \frac{l \xi}{v}.$$

Решая уравнение по М. П. Левицкому, при начальных и граничных условиях  $\theta_x = \theta_{ТР.П}$  при  $x = 0$ ,  $\theta_{ТР.П} = 0$  при  $\tau = 0$ , получим уравнение

$$\theta_{\tau,x} = \theta_{\text{ТР.П}} \left( \frac{x}{\Delta} - \frac{2}{\pi} e^{\frac{\pi^2 \sigma^2}{\Delta^2}} \sin \frac{\pi x}{\Delta} \right),$$

где  $\theta_{\tau,x}$  — температура, возникающая от теплоты трения в данной точке и в данный момент времени  $\tau$ ;  $\Delta$  — глубина, на которую проникает теплота трения за время  $\tau$ .

Минус промежуточные вычисления и пренебрегая температурой внешней среды, получим

$$\theta_{\text{ТР.П}} = \frac{F_{\text{П}} \sqrt{v \frac{1}{\xi} \pi}}{2Eb\sqrt{\lambda c d l}}.$$

Суммируя температуры деформации стружки и трения ее по передней поверхности инструмента, получим температуру резания, т. е. среднюю температуру на площади контакта стружки и инструмента,

$$\theta_{\text{РЕЗ}} = \theta_{\text{ДЕФ}} + \theta_{\text{ТР.П}} = \frac{\alpha_0 p \left[ (1 - \beta_0) - (\sin \gamma + \mu_0 \cos \gamma) \frac{1}{\xi} \right]}{Ecd} + \frac{F_{\text{П}} \sqrt{v \frac{\sqrt{\pi}}{\xi} \frac{1}{2}}}{Eb\sqrt{\lambda c d l}}.$$

Формула показывает закономерность изменения температуры резания в зависимости от разных факторов. На основе ее построены графики изменения составляющих температуры резания в зависимости от скорости резания для минералокерамического (рис.3, а) и для твердосплавного резца (рис. 3, б). Как видим, с увеличением скорости резания уменьшается температура деформации, но возрастает температура трения. В результате температура резания повышается, но в значительно меньшей степени, чем сама скорость.

Вместе с тем при одних и тех же условиях температура резания получается более высокой при работе минералокерамическим резцом (рис. 3, а) сравнительно с твердосплавным (рис. 3, б), что подтверждается практикой.

Надо ожидать, что температура резания в действительности должна быть более высокой, чем это получается расчетом по теоретической формуле, так как здесь не учтена теплота трения по задней поверхности резца. Последняя будет все более проявляться с увеличением скорости резания по мере затупления резца; при этом особенно заметно будет повышаться температура обрабатываемой детали.

Обрабатываемая деталь нагревается в основном теплотой деформации. Очевидно температура детали должна уменьшаться с увеличением скорости резания, поскольку при этом уменьшается  $\theta_{\text{ДЕФ}}$  (рис. 3). Подобный вывод подтверждается на практике при работе острым резцом в нормальных условиях. Однако по мере затупления резца и значительного уменьшения

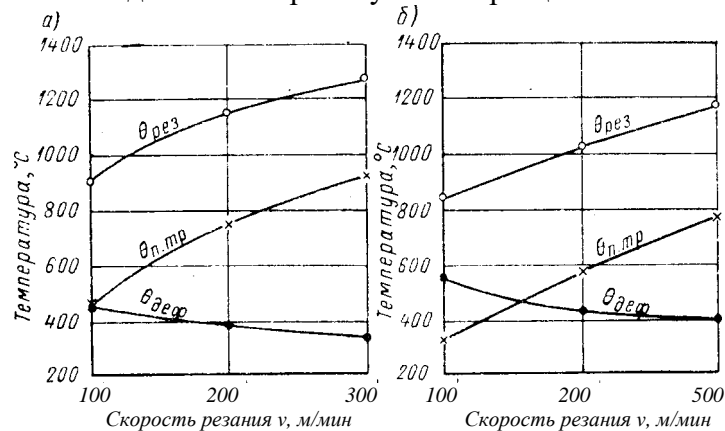


Рис. 3. Изменение составляющих температур резания при обработке стали: а — для минералокерамического резца; б — для твердосплавного резца; сталь ОХН4М;  $t = 2$  мм;  $s = 0,14$  мм/об;  $\gamma = 10^\circ$

заднего угла  $\alpha$  и угла в плане  $\varphi$  положение меняется. В этом случае с увеличением силы трения заметно растут работа и теплота трения по задней поверхности резца, и поэтому температура детали повышается с увеличением скорости резания  $v$ . На рис. 4 показано изменение температуры детали при фрезеровании резьбы вращающимся резцом (вихревое нарезание). Замечаем неизменное повышение температуры детали по мере затупления резца. Вместе с тем температура обрабатываемой детали уменьшается с увеличением подачи  $s$ . Это вполне закономерно, так как с увеличением  $s$  сила трения на задней поверхности резца остается почти неизменной, но при определенной длине детали сокращается относительный путь резца (время обработки) и, следовательно, уменьшается работа силы резания.

Сложнее обстоит дело с температурным полем резца. Можно было бы предполагать, что наибольшая температура должна быть вблизи режущей кромки, так как здесь располагаются основные источники теплоты  $Q_{ДЕФ}$ ,  $Q_{ТР.П}$ ,  $Q_{ТР.З}$ . На рис. 5 схематично представлено температурное поле стружки и резца, составленное Н. И. Резниковым по опытным данным других исследователей. Линии постоянных температур  $t \dots t$  (изотермы) в стружке расположены параллельно поверхности сдвига (ориентировочно), а у резца почти концентрично вокруг режущей кромки. В этом случае согласно теории теплопроводности тепловые потоки должны быть направлены нормально изотермам; в схеме они показаны соответствующими кривыми со стрелками:  $n$  — в деталь;  $n'$  — в стружку;  $k$  — в резец.

Наиболее высокие температуры наблюдаются вблизи режущей кромки и в зоне нароста В действительности положение более сложное, так как температура резания зависит и от длины контакта поверхности резания и стружки по задней и передней поверхностям инструмента. Чем меньше длина контакта на задней поверхности, тем ниже среднее значение температуры резания и тем ближе к режущей кромке располагается ее максимум. С уменьшением длины контакта стружки с передней поверхностью средняя температура также снижается, но максимум температуры удаляется от режущей кромки. При скоростной обработке температура в зоне резания доходит до  $800^\circ\text{C}$ , а на поверхности трения по передней грани достигает даже  $1200^\circ\text{C}$  и выше. Низкая теплопроводность твердых сплавов и особенно минералокерамики является

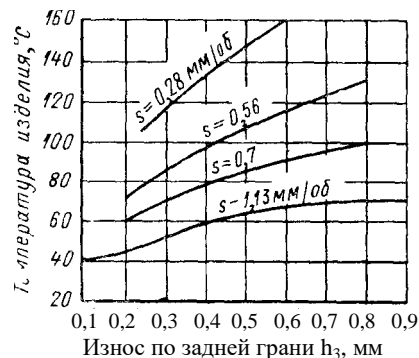


Рис. 4 Температура обрабатываемой детали при резании вращающимся резцом в зависимости от подачи  $s$  и износа резца

причиной того, что теплота резания сосредоточивается в передней части резца, прилегающей к его вершине, что способствует ее пластической деформации. При этом режущие способности инструмента сохраняются ввиду его значительной красностойкости. Однако очень высокий температурный градиент, свойственный минералокерамическому резцу, способствует тепловому удару, разрушающему режущую кромку инструмента.

Любопытно, что нагрев державки с малотеплопроводной режущей пластиной из твердого сплава и особенно минералокерамики происходит не только посредством контактной передачи тепла от пластины к державке, но и в значительной степени через лучеиспускание от стружки и поверхности резания, перемещающихся мимо резца и передающих ему часть теплоты. Это имеет

существенное значение для стойкости режущего инструмента и точности обработки детали, зависящей от температурной деформации резца.

На рис. 6 показаны кривые температурного удлинения минералокерамического резца при обработке стали ОХН4М. Можно заметить значительное уменьшение деформации резца

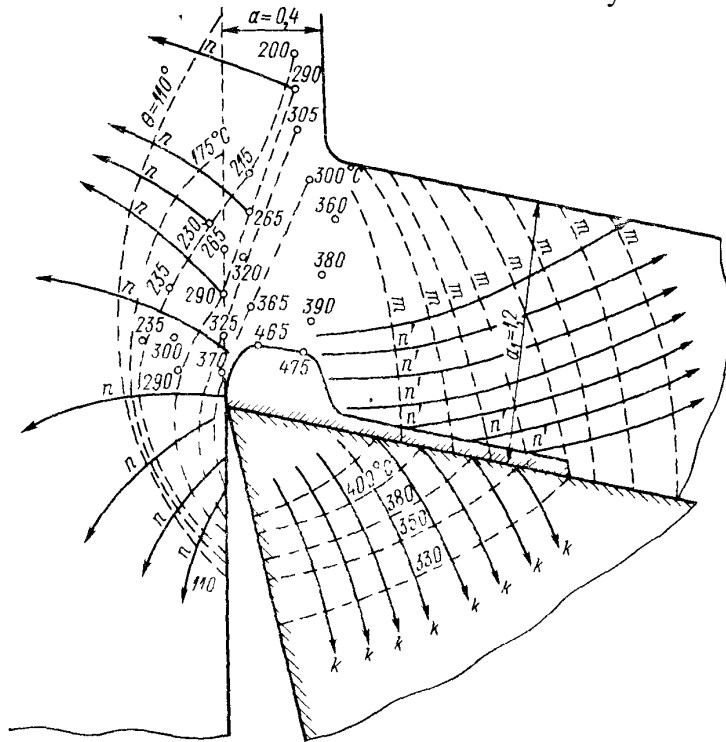


Рис. 5 Температурное поле в зоне резания и резца.



Рис. 6 Кривые температурного удлинения минералокерамического резца:  
1 —  $l = 1,5$  мм, 2 —  $l = 3$  мм, 3 — стружка отводилась от резца  
или задние грани державки изолировались

с удалением режущей кромки от державки резца или при изоляции задней поверхности резца.

Эффект лучеиспускания в большой степени зависит от способности тела поглощать тепловые лучи. Например, абсолютно черное тело поглощает все падающее на него тепло — условный коэффициент  $\varepsilon = 1$ :

Значения  $\varepsilon$  для различных тел

Чугун шероховатый, сильно окисленный .....	0,94
Железо матовое окисленное .....	0,96
Железо блестящее отполированное.....	0,29
Медь полированная.....	0,13—0,17
Медь прокатанная.....	0,64



Медь шероховатая.....	0,76
Серебро.....	0,03
Сажа, уголь.....	0,95

Эти данные представляют значительный интерес, так как показывают большую роль блестяще обработанных граней, режущего инструмента в отношении его стойкости и качества обработанной поверхности.

При весьма низкой температуре всего изделия и больших скоростях резания тонкий слой его обработанной поверхности может иметь достаточно высокую температуру, способную изменить структуру этого слоя. Поэтому, назначая режим резания, необходимо учитывать последующую чистовую обработку, при которой будет удален поврежденный слой детали.

Теоретический расчет температуры резания встречает значительные трудности, так как в соответствующих расчетных формулах независимые переменные являются в действительности взаимозависимыми параметрами. Так, теплоемкость  $C$  увеличивается, а теплопроводность  $\lambda$  уменьшается с возрастанием температуры. Длина контакта стружки и резца уменьшается с увеличением скорости резания, но заметно растет по мере износа резца и образования лунки на передней поверхности резца.

Значения постоянных коэффициентов ( $\alpha_0, \beta_0, \mu_0$ ) также изменяются в зависимости от различных факторов. К этому надо добавить, что температура резания зависит и от вида процесса резания: при несвободном резании резец нагревается больше, чем при свободном резании. Поэтому для расчета температуры резания чаще пользуются эмпирическими формулами, показывающими закономерности изменения температуры резания в зависимости от различных факторов и справедливыми в определенных границах и условиях.

### 3. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ РЕЗАНИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Как уже отмечено, температура резания растет менее интенсивно, чем скорость. По мере нагрева резца разность температур стружки и резца падает, а поэтому интенсивность передачи теплоты от стружки резцу уменьшается. Следовательно, с увеличением скорости резания  $v$  температура резца значительно поднимается, но в меньшей степени, чем скорость. Современные экспериментальные исследования процесса резания высокопрочных сталей с ультравысокими скоростями (до 72 000 м/мин), когда процесс происходил адиабатически (без теплообмена),

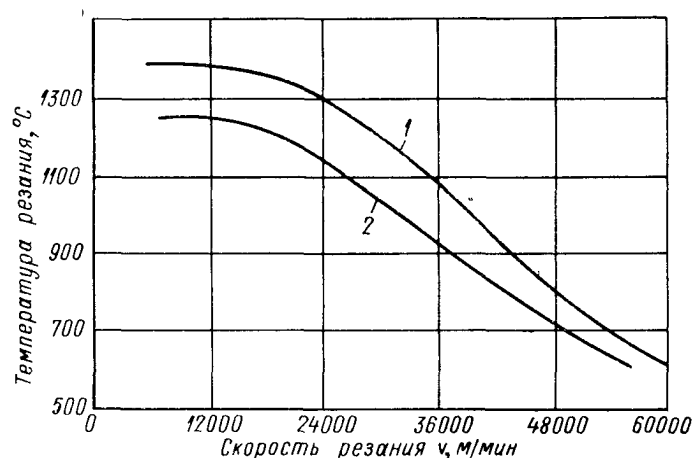


Рис. 7. Влияние скорости резания на температуру резания Ст.3:  
1 —  $a = 0,5$  мм;  $l = 4$  мм; 2 —  $a = 0,2$  мм

показали температуру в зоне резания на уровне 30—65° С, вполне допустимом стойкостью быстрорежущего резца<sup>1</sup>. Надо полагать, что кривые  $\theta-v$  с повышением скорости резания будут приближаться к уровню температуры плавления обрабатываемого материала, а затем снижаться с дальнейшим повышением скорости (рис. 7). Последние графики получены по опытным данным Д. Х. Касрадзе<sup>2</sup> при резании Ст.3 при  $v = 1000-60\ 000$  м/мин. Подобное явление сопровождается резким снижением сил резания и значительным охрупчиванием металла в зоне резания. Этот процесс способствует быстрому отрыву стружки при полном отсутствии пластической деформации (усадки) стружки. Наблюдающаяся отрицательная усадка (удлинение стружки) могла быть вызвана центробежными силами при весьма больших скоростях.

**Влияние глубины резания и подачи.** Не трудно предугадать зависимость между глубиной резания  $t$ , подачей  $s$  и температурой, если рассмотреть изменение прироста и отвода теплоты на резце с изменением  $t$  и  $s$ . С увеличением подачи возрастает давление стружки на резец, а вместе с ним и работа деформации. Но при этом, как известно, усадка стружки уменьшается и, следовательно, работа деформации, приходящаяся на 1 мм<sup>3</sup> стружки, также уменьшается. К тому же трение на задней поверхности инструмента с увеличением подачи мало изменяется. Поэтому количество теплоты, образующейся в стружке, будет увеличиваться в меньшей степени сравнительно с увеличением подачи. В то же время с утолщением стружки отвод теплоты улучшается, т.к. площадь контакта стружки с резцом расширяется. В результате температура резания повышается с увеличением подачи, но в меньшей степени, чем при повышении скорости.

Еще меньше влияет на температуру резания глубина резания, т.к. нагрузка на единицу длины режущей кромки не изменяется: с увеличением глубины резания при постоянном угле в плане  $\varphi$  пропорционально увеличивается длина работающей и режущей кромки, почти в такой же степени усиливается теплоотвод от нее и, следовательно, на единицу длины режущей кромки увеличение притока теплоты будет весьма незначительным; в результате температура мало изменится с увеличением глубины резания.

**Влияние материала резца и обрабатываемого материала на температуру резания.** Естественно ожидать, что при резании хрупких металлов, например чугуна, когда работа пластической деформации весьма мала и удельные силы резания незначительны, температура резания заметно ниже, чем при обработке стали. Давление чугунной стружки сосредотачивается непосредственно на режущей кромке или вблизи нее, но это весьма неблагоприятное обстоятельство влияет больше на абразивно-механический износ режущей кромки, чем на температуру резания.

Само собой разумеется, что нагрев инструмента зависит от теплоемкости и особенно от теплопроводности материала изделия и самого инструмента. Например, при обработке цветных металлов температура резания должна быть сравнительно низкой не только из-за малой нагрузки, но и вследствие большой теплопроводности цветных металлов. И, наоборот, при резании жаропрочных сталей и сплавов, обладающих низкой теплопроводности, значительно повышается температура резания (в два – три раза) сравнительно с конструкционными сталями. То же можно сказать относительно инструмента: чем ниже теплопроводность, тем выше температура его режущей кромки.

По этой причине температура резания при работе твердосплавными резцами получается более низкой по сравнению с минералокерамическими (рис. 3). То же самое можно сказать и о влиянии резца на температуру резания. Последняя уменьшается с увеличением площади поперечного сечения резца.

<sup>1</sup> Более того, оказывается возможным работать резцами из цветных металлов, поскольку при  $v = 27\ 000—36\ 000$  м/мин силы резания резко снижались.

<sup>2</sup> См.: Термические явления при сверхскоростном резании металлов. Труды ГИСХ, XIV, Сухуми, 1970 г.

**Влияние геометрии резца на температуру резания.** Как известно, с увеличением угла резания  $\delta$  увеличивается сила резания, следовательно, должны повышаться количество образующейся теплоты и температура резания. Отвод тепла в данном случае также будет усиливаться с увеличением угла клина  $\beta$  (угла заострения), но в меньшей степени, чем теплообразование, и в результате температура будет расти.

Величина угла в плане  $\varphi$  также влияет на температуру резания. С уменьшением угла  $\varphi$  несколько увеличивается нагрузка на резец и, казалось бы, нагрев его должен усиливаться. Однако на самом деле получается обратное: с уменьшением угла  $\varphi$  удлиняется режущая кромка, увеличивается угол при вершине  $\varepsilon$  и как следствие значительно улучшается теплоотвод.

В заключение надо отметить заметное влияние на температуру резания смазочно-охлаждающих жидкостей. При этом падение температуры вызвано как охлаждающим эффектом, так и уменьшением трения в процессе резания.

Путем математической обработки опытных графиков А. М. Даниелян вывел общую формулу зависимости температуры резания  $\theta$  от различных факторов при нормальной обработке стали быстрорежущим резцом

$$\theta = \frac{C_{\theta} v^{0.4} s^{0.24} t^{0.105} (\sin \varphi)^{0.26}}{k^{0.086} r^{0.11} F^{0.056}}.$$

Здесь  $k = \frac{t}{s}$ ;  $r$  — радиус закругления вершины резца;  $F$  — площадь поперечного сечения резца;

$C_{\theta}$  — постоянная, зависящая от обрабатываемого материала и инструмента, или в упрощенном виде для стали ( $\sigma_s = 77 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\delta = 22\%$ )

$$\theta = 166,5 v^{0.4} t^{0.105} s^{0.2}$$

и для чугуна (приблизительно)

$$\theta = 138 v^{0.36} t^{0.09} s^{0.133}.$$

#### 4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ

Среди многочисленных методов измерения температуры резания можно выделить две группы.

К первой группе относятся методы, с помощью которых измеряется средняя температура стружки, а также определенных участков изделия или резца: калориметрический метод; метод цветов побежалости; метод термокрасок.

Ко второй группе принадлежат методы, которыми измеряются температура узкоограниченных участков зоны резания или резца, например: метод термопар; оптический и радиационный методы.

*Калориметрический метод*, впервые примененный в лаборатории ЛПИ, иногда используется и в настоящее время. В этом случае температура стружки рассчитывалась по формуле

$$\theta_{стр} = \theta_{см} + \frac{g_s (\theta_{см} - \theta_s)}{g_{стр} C_{стр}}$$

где  $\theta_{стр}$  — температура стружки;  $g_s$  — вес воды;  $g_{стр}$  — вес стружки;  $\theta_s$  — начальная температура воды;  $\theta_{см}$  — температура смеси (воды и стружки);  $C_{стр}$  — теплоемкость стружки.

Этот метод может дать только среднюю температуру стружки и, следовательно, непригоден для исследования температуры на разных участках стружки и инструмента. Им иногда пользовались для подсчета силы резания; при этом количество теплоты делилось на механический эквивалент теплоты и определялась работа.

Простой метод определения температуры по *цветам побежалости* не требует каких-либо приспособлений. Цвета побежалости появляются в результате образования тончайших пленок окислов на нагретой стружке; их цвета зависят от степени нагрева стружки.

Цвета побежалости и соответствующие им температуры (в °С):

Чуть желтый	200	Темно-синий ....	290
Светло-желтый	220	Светло-синий . .	320
Темно-желтый	240	Синевато-серый .	350
Пурпуровый	270	Светло-серый, переходящий в белый ....	400

Считают, что при наличии некоторого опыта по цветам побежалости стружки нелегированной стали можно определить температуру с точностью  $\pm 5^\circ$ , т. е. около 2%. Однако в действительности этот метод дает значительно большую погрешность, доходящую иногда, как показали опыты Б. Т. Прушкова, даже до 20—30% в зависимости от толщины среза, времени работы и др. Столь большие отклонения вызваны тем, что цвета побежалости выражают лишь температуру поверхности стружки, определяющую толщину пленки окисла, а тем самым и ее цвет. Цвет побежалости меняется в зависимости не только от температуры, но и от продолжительности действия тепла. При охлаждении стружки смазочно-охлаждающими жидкостями цвета побежалости могут совсем исчезнуть, между тем как стружка сохраняет на поверхности контакта с резцом высокую температуру.

Неточным является и *метод термокрасок*, когда для выявления температуры пользуются свойством специальных красок менять цвет при определенных температурах. Например, при  $155^\circ \text{C}$  цвет из пурпурного переходит в голубой, при  $190^\circ \text{C}$  из белого — в зелено-коричневый, при  $255^\circ \text{C}$  из зеленого — в темно-коричневый, при  $305^\circ \text{C}$  из желтого — в красно-коричневый, при  $440^\circ \text{C}$  из фиолетового — в белый.

При пользовании этим методом краска смешивается с алкоголями и наносится ровным слоем на грани исследуемых резцов. Некоторая погрешность в данном случае заключается в том, что

оттенок переходящих красок меняется в зависимости от продолжительности действия тепла.

Один из наиболее точных и в то же время относительно простой способ — измерение температуры резца с помощью термопары, впервые примененной Я. Г. Усачевым. Как известно, при нагреве места спая проволочек из двух разнородных металлов, например железо — константан, медь — константан, платина — иридий и т. д., в нем образуются заряды противоположных знаков. Если свободные концы проволочек соединить, то в цепи возникает термоток, электродвижущая сила которого пропорциональна разности температур места спая и холодных концов проволочек.

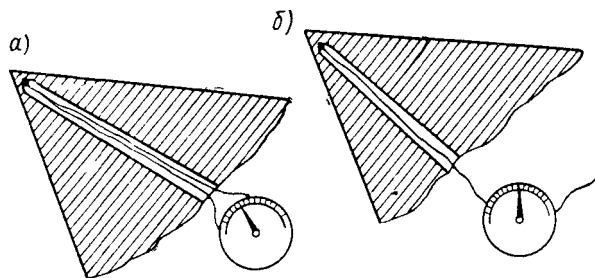


Рис. 8. Термопара Я. Г. Усачева

Величину электродвижущей силы или напряжения можно измерять с помощью гальванометра или милливольтметра. Для перевода величины электродвижущей силы в градусы термопару

необходимо тарировать. На рис. 8, *а* показана термопара Я. Г. Усачева. Здесь спай двух различных металлических проволок, изолированных слюдой или стеклянной трубкой, вставлен в канал, просверленный в резце снизу. Дно этого канала располагают возможно ближе к передней грани и режущей кромке резца, чтобы измерить температуру возможно ближе к источникам теплоты. Недостатки этого способа: удаленность спая термопары от участка максимальной температуры и необходимость поддерживать постоянным давление между спаем и дном отверстия.

Более удачной оказалась другая термопара (рис. 8, *б*), в которой проволока, например константановая, также изолированная от стенок канала, расклепывается на задней грани резца возможно ближе к режущей кромке. Здесь термопарой являются проволока и материал самого резца. С помощью такой термопары Я. Г. Усачев провел ряд температурных исследований с достаточной точностью. Ею воспользовался ряд наших исследователей при определении температурного поля резца. Для этого в головке резца просверливалось вдоль главной и вспомогательной режущих кромок определенное количество отверстий, куда вставлялись термопары. К головке резца сверху прикреплялась тонкая пластина (толщиной примерно 2 мм), служившая передней поверхностью резца. На рис. 9 показано температурное поле передней поверхности, полученное А. М. Даниеляном при обработке стали со скоростью  $v = 38$  м/мин,  $t = 2$  мм;  $s = 0,54$  мм/об.

Этот способ измерения имеет свои недостатки; измеряется температура на одном ограниченном участке и, к тому же несколько удаленном от основных источников теплообразования; необходимо иметь специальные резцы; недолговечность резцов, так как после одной-двух переточек термопара разрушается.

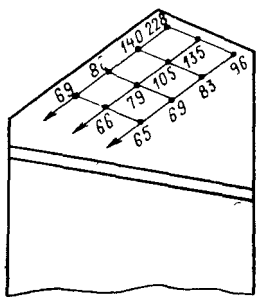


Рис. 9. Температурное поле на передней поверхности резца термопары

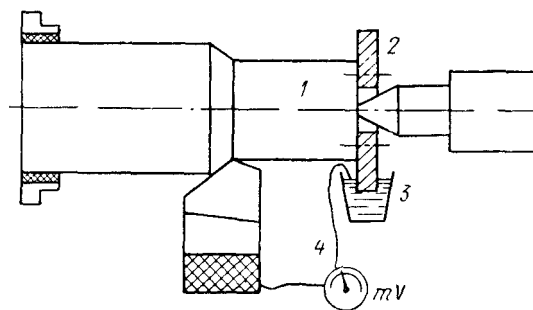


Рис. 10. Схема естественной термопары

В настоящее время температурные исследования производятся с помощью, так называемой естественной термопары, состоящей из самого изделия и режущего инструмента (рис. 10). В процессе резания в месте контакта разнородных материалов изделия и резца вследствие нагрева возникает электродвижущая сила. Ток в этом случае направляется по обрабатываемой детали 1 через медное кольцо 2, а затем через ртуть в ванне 3, служащей для контакта вращающегося кольца 2 с проволокой 4. При этом милливольтметр покажет напряжение термотока, по которому можно судить о температуре резания. Обрабатываемое изделие изолировано от патрона и заднего центра, а резец от суппорта — при помощи прокладок.

В практике этот метод измерения был значительно упрощен тем, что отказались от изолирования обрабатываемого изделия от станка. Контактное устройство через кольцо и ртуть, как показано на рис. 10, а также изолирование заднего центра от изделия были продиктованы желанием освободиться от второй дополнительной термопары, получающейся в месте контакта заднего центра и изделия; казалось бы, при этом дополнительный термоток должен нарушить правильность показаний основной термопары. Но в действительности роль второй термопары оказалась ничтожной вследствие слабого разогревания заднего центра по сравнению с резцом, и

поэтому практически стало вполне возможным работать и без изоляции заднего центра (рис. 11). Это значительно упростило все устройство, освободив его от дополнительных приспособлений, так как теперь второй провод присоединялся к любой точке станка.

В этом виде метод естественной термопары был бы вполне пригоден для применения, если бы не сложность тарирования подобного устройства, заключающаяся в том, что для каждого обрабатываемого материала и резца необходимо строить свою тарировочную кривую зависимости между температурой и показаниями милливольтметра. Для этого применяют различные методы тарирования.

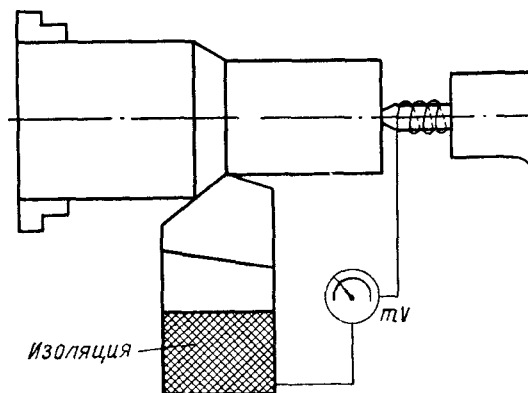


Рис. 11. Упрощенная схема естественной термопары

Наиболее простой из них состоит в следующем: в ванну с расплавленным оловом (или алюминием для тарировки выше  $600^{\circ}\text{C}$ ) погружаются сливная стружка, снятая с обрабатываемой детали, и резец. Стружка и резец соединяются проволоками с гальванометром. При нагреве ванны (например, в электропечи) температура ее регистрируется контрольной термопарой, и одновременно записываются показания гальванометра. В дальнейшем оказалось, что при тарировании вместо стружки можно использовать брусок обрабатываемого материала.

В действительности условия нагрева в процессе резания отличаются от условий тарирования, поскольку в обоих случаях не обеспечиваются одинаковые площади контакта обрабатываемого металла с резцом. К тому же при тарировании измеряется постоянная температура контакта образца и инструмента, между тем как на площади контакта стружки и передней поверхности инструмента в процессе резания развивается температура различной напряженности в разных точках контакта и естественная термопара измеряет некоторую усредненную температуру.

На рис. 12 показана схема полустественной термопары, примененной в ЛПИ для измерения температуры резания при тонком точении минералокерамическим резцом. *Оптический и радиационный методы.* Оптические пирометры для измерения температуры резания применяются при скоростной обработке металла, когда стружка и резец нагревались весьма сильно вплоть до светлого каления. Однако опыт использования этого метода недостаточен, чтобы можно было сделать определенные выводы.

*Радиационный метод* измерения температуры, предложенный Ф. Швердом, основан на измерении теплоты лучеиспускания (рис. 13). Он дает возможность измерять температуру резания на любом участке стружки и резца. Необходимо лишь изолировать другие лучи, отражаемые не из фиксируемых точек. Схема устройства этого прибора проста. Тепловой луч, направленный от наблюдаемого участка, проходит через две линзы, отверстие на экране и падает на фотоэлемент. Высокочувствительный гальванометр, соответственно проградуированный, показывает температуру наблюдаемого участка. Этот метод позволяет детальнее исследовать температуру стружки и инструмента, но он не получил широкого распространения из-за следующих недостатков.

1. Появление тонких окислов на поверхности стружки искажает правильность показаний прибора.

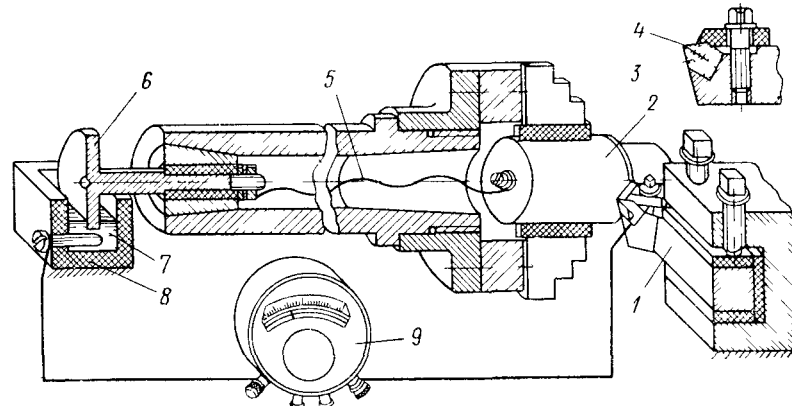


Рис. 12. Термопара для измерения температуры резания минералокерамическим резцом  
1 — резец, 2 — обрабатываемая деталь, 3 — минералокерамическая пластина, 4 — элемент термопары (алюмель), 5 — провод, 6 — диск, 7 — ртуть, 8 — ванна, 9 — гальванометр

2. Значительные затруднения представляет собой тарирование прибора, поскольку теплота излучения зависит не только от температуры нагретого участка, но еще от цвета и состояния

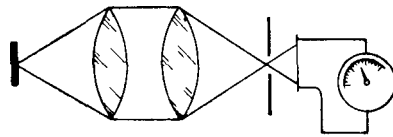


Рис. 93. Радиационный метод измерения температуры

его поверхности; шероховатая поверхность стружки излучает больше теплоты, чем гладкая тарлируемая поверхность.

3. Крепление прибора на резце неудобно, а при установке его вне резца колебания последнего в процессе резания мешают измерению температуры определенной точки.

4. Прибор сравнительно сложен.

Оригинальный способ измерения температуры в процессе резания путем анализа микроструктуры тончайшего слоя обработанной поверхности, претерпевающей заметные изменения предостаточно большом нагреве, применил Б. И. Костецкий. Но и этот метод пока не получил распространения, так как его можно использовать только при высоких режимах резания, когда поверхность резания или обработанная поверхность нагревается выше критических точек.

Необходимо отметить, что степень изменения температуры резания в процессе работы является в известной мере критерием обрабатываемости металла и качества режущего инструмента. Однако не всегда имеется закономерная связь между температурой резания и интенсивностью затупления режущего инструмента, так как затупление в значительной степени зависит от микроструктуры обрабатываемого материала.

### **Использованная литература:**

1. А.М. Вульф "Резание металлов" – М.: Машиностроение,1973
2. А.Н. Резников "Теплофизика резания" – М.: Машиностроение,1969
3. Г.И. Грановский "Резание металлов" – М.: Высшая школа,1985