

Расчет температур при резании стали 60 на основе термомеханического подхода

А.А. Крутько, А.С. Дзюба, В.Е. Жижелев

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация: на основе анализа экспериментальных данных и общенаучных закономерностей изменения предела текучести от температуры определены действительные механические свойства обрабатываемого материала при резании стали 60, которые были использованы в качестве исходных данных для расчета температуры на передней и задней поверхностях режущего лезвия. Результаты расчета, выполненные с учетом взаимовлияния температуры и предела текучести, сопоставлены с результатами измерения температуры, полученными различными экспериментальными методами

Ключевые слова: температура при резании, термомеханический подход, сталь 60

Как правило, исследователи для обобщения влияния условий резания на силы резания, характеристики изнашивания и износостойкости режущих инструментов используют температуру резания, определяемую экспериментально, как среднюю температуру контакта режущего лезвия со стружкой и деталью [1]. Но для решения многих практических задач необходимо знать распределение температуры по передней и задней поверхностям режущего инструмента.

В значительной мере теоретическое определение температуры при резании зависит от допущений, связанных со схематизацией процесса резания. Одним из наиболее распространенных методов расчета температуры является теплофизический метод [2], основанный на определении касательных напряжений на поверхностях режущего инструмента через экспериментальные сведения о силах резания. Таким образом, при изменении условий резания возникает необходимость вновь измерять силы резания и рассчитывать температуры.

Развитием теплофизического метода является термомеханический метод расчета температуры при резании, представленный в работах [3-5]. Данный метод основан на сложившихся общенаучных представлениях о зависимости предела текучести деформируемого материала от деформации, скорости деформации и гомологической температуры деформации. Для адиабатических условий деформации эта зависимость имеет вид [3]:

$$\frac{\tau}{S_b} = \frac{dA_W}{d\varepsilon} = A \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{k\Delta T} f(\Delta T'), \quad (1)$$

где $A = \left\{ \sqrt{3} \left[\sqrt{3} \ln(1 + \varepsilon_Z) \right]^m \right\}^{-1}$, $\Delta T' = A_W A_1$, $A_1 = \frac{S_b}{C_V T_{нл}}$

а $f(\Delta T')$ - функция гомологической температуры, отражающая влияние температуры на предел текучести. В работе [3] функция $f(\Delta T')$ задана в виде экспоненты: $f(\Delta T') = \exp(-B\Delta T')$.

Недостатком термомеханического метода расчета температуры при резании являлось использование единой для всех материалов обобщенной экспоненциальной зависимости предела текучести от гомологической температуры.

Общим недостатком теплофизических и термомеханических методов расчета температуры является то, что исследователи сопоставляли результаты расчетов в лучшем случае только со своими экспериментальными данными, оставляя без внимания многочисленные экспериментальные результаты других исследователей.

В связи с этим в настоящей работе решаются следующие задачи:

1. Уточнение методики расчета действительных характеристик стали 60 при резании;

2. На основании экспериментальных данных о влиянии температуры на предел прочности при растяжении учесть специфику влияния температуры на предел текучести при расчете контактных температур;

3. Сопоставить результаты расчета температуры при резании углеродистых сталей с известными экспериментальными результатами других исследователей, полученными различными методами измерения температуры.

Для решения первой задачи зависимости предела текучести от деформации определялись путем интегрирования уравнения (1) с учетом задания функции $f(\Delta T')$ на основании анализа экспериментальных данных [5] (рис. 1).

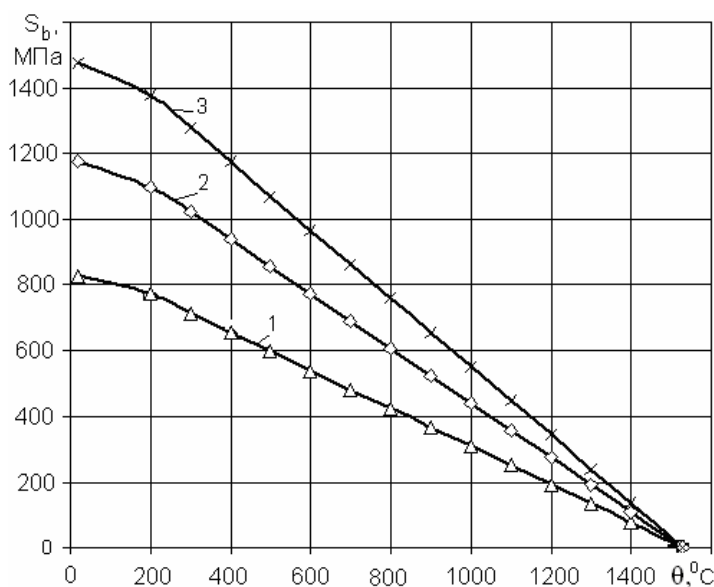


Рисунок 1 – Зависимости действительного предела прочности от температуры при растяжении стали 60: 1 – твердость НВ = 2050 МПа; 2 – твердость НВ = 2850 МПа; 3 – твердость НВ = 3600 МПа

Зависимости изменения механических свойств от температуры для закаленной стали 60 аппроксимировались ломаной линией в двух интервалах: до 200 °С и свыше 200 °С. При этом функция $f(\Delta T')$ имеет следующий вид:

$$f(\Delta T') = \begin{cases} S_{\theta_c} \left[1 + \left(\frac{S_{\theta_0}}{S_{\theta_c}} - 1 \right) \frac{T' - T'_c}{T'_0 - T'_c} \right] & \text{при } \theta < 200 \text{ } ^\circ\text{C} , \\ S_{\theta_0} \left(1 - \frac{T' - T'_0}{1 - T'_0} \right) & \text{при } \theta > 200 \text{ } ^\circ\text{C} . \end{cases} \quad (2)$$

С учетом выявленных закономерностей изменения механических свойств от температуры при испытаниях на растяжение для стали 60, зависимость предела текучести от деформации в зоне стружкообразования при резании имеет вид:

$$\frac{\tau}{S_b} = AK_\varepsilon \varepsilon_p^m \exp \left[\frac{AA_1 K_\varepsilon K_{Pe} \left(\frac{S_{\theta_0}}{S_{\theta_c}} - 1 \right)}{(1+m)(T'_0 - T'_c)} \varepsilon_p^{1+m} \right], \quad (3)$$

где $K_\varepsilon = 1,3$

Для передней поверхности и задней поверхности застойной зоны вследствие более равномерного распределения температуры предел текучести несколько выше, чем в зоне стружкообразования ($K_q = 1,6$)

$$\frac{q}{S_b} = AK_q \varepsilon_p^m \exp \left[\frac{AA_1 K_q \left(\frac{S_{\theta_0}}{S_{\theta_c}} - 1 \right)}{(1+m)(T'_0 - T'_c)} \varepsilon_p^{1+m} \right]. \quad (4)$$

Зависимости предела текучести от истинного сдвига имеют вид выпуклых кривых с точкой максимума ($\tilde{\varepsilon}_p, \tilde{\tau}/S_b$) или ($\tilde{\varepsilon}_q, \tilde{q}/S_b$), (рис.2):

$$\tilde{\varepsilon} = \left[\frac{m(T'_0 - T'_c)}{AK_\varepsilon K_{Pe} A_1 \left(1 - \frac{S_{\theta_0}}{S_b} \right)} \right]^{\frac{1}{1+m}}, \quad \frac{\tilde{\tau}}{S_b} = \frac{m(T'_0 - T'_c)}{K_{Pe} A_1 \left(1 - \frac{S_{\theta_0}}{S_b} \right) \tilde{\varepsilon}} \exp \left(-\frac{m}{m+1} \right) \quad (5)$$

$$\tilde{\varepsilon}_q = \left[\frac{m(T'_0 - T'_c)}{AK_q A_1 \left(1 - \frac{S_{\theta_0}}{S_b} \right)} \right]^{\frac{1}{1+m}}, \quad \frac{\tilde{q}}{S_b} = \frac{m(T'_0 - T'_c)}{A_1 \left(1 - \frac{S_{\theta_0}}{S_b} \right) \tilde{\varepsilon}} \exp \left(-\frac{m}{m+1} \right) \quad (6)$$

Выполненные расчеты показали, что сталь 60, применяющаяся для изготовления колесных пар, в процессе резания существенно упрочняется в сравнении с пределом текучести на сдвиг при растяжении, равным $S_b/\sqrt{3} = 0,577$: в зоне стружкообразования $\tilde{\tau}/S_b = 0,85$, т.е. почти в 1,5 раза выше, чем при растяже-

нии, а на передней поверхности $\tilde{q}/S_b = 1,02$, т.е. в 1,8 раз выше.

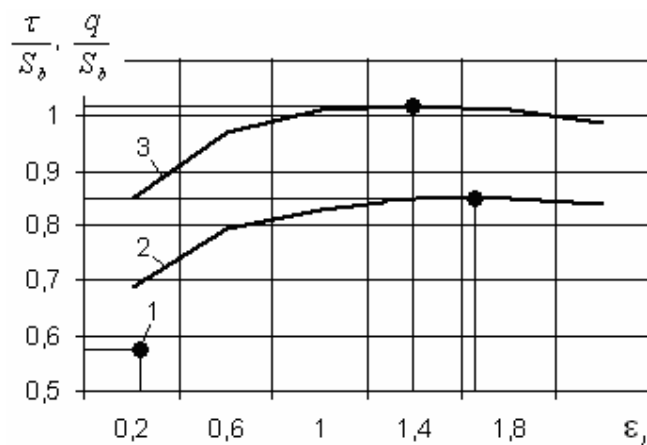


Рисунок 2 – Зависимости отношения предела текучести к действительному пределу прочности от деформации: 1 – при испытаниях на растяжение; 2 – зоны стружкообразования для стали 60; 3 – передней поверхности режущего лезвия для стали 60

Поскольку максимальные значения предела текучести не зависят от режима резания и геометрических параметров режущего инструмента, они используются далее как механические характеристики обрабатываемого материала при резании для расчета температур на передней и задней поверхностях режущего инструмента. При этом участки контакта инструмента со стружкой и деталью разбивались на достаточно большое число интервалов. Уменьшение предела текучести с ростом температуры на каждом интервале участка пластического контакта стружки с резцом (или застойной зоны с деталью) учитывалось путем введения на каждом интервале стоков тепла, интенсивность которых определялась с учетом принятой линейной зависимости:

$$K_{j,p} = \frac{q_0 - q_A}{2}, \quad (7)$$

$$\text{где } q_A = q_0 \left(1 - \frac{T'}{1 - T_0'} \right), \quad T' = \frac{\Delta\theta_{II}}{T_{nl}}, \quad T_0' = \frac{\theta_\delta + 273}{T_{nl}}$$

Разработанные программы на основе термомеханического подхода позволяют рассчитывать распределения температур по передней и задней поверхностям инструмента, а также средние температуры (температуры резания) для сопоставления с результатами эксперимента других авторов.

Как показали расчеты (рис.3), максимальные температуры на передней и задней поверхностях режущего инструмента при обработке стали 60 твердостью НВ=2850 МПа составляли 1150 °С и 950 °С соответственно. Наличие столь высоких температур практически подтверждается пластической деформацией твердосплавного режущего лезвия в процессе токарной обработки.

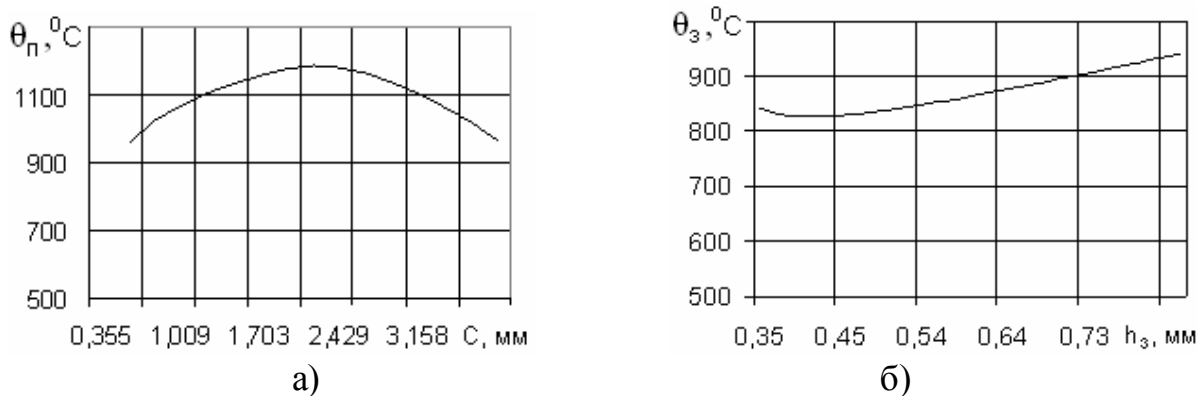


Рисунок 3 – Распределение температуры а) на передней поверхности по длине контакта; б) на задней поверхности по фаске износа при точении стали 60 твердостью НВ=2850 МПа резцом Т14К8 при режимах резания: $V = 45$ м/мин, $s=1,2$ мм/об $\varphi=75^\circ$, $\gamma=10^\circ$, $\alpha=10^\circ$, $r=4$ мм, $t = 8$ мм

Кроме того, сопоставление расчетных данных производилось с представленными в литературе экспериментальными данными, полученными отечественными и зарубежными исследователями в различное время с применением различных методик измерения температуры [2, 5,6].

Так как наибольшее число опытов по измерению температуры выполнено методом естественной термопары, было произведено сопоставление средней температуры резания, рассчитанной по температурам на передней и задней поверхностям, с экспериментальными данными [6] (рис.4).

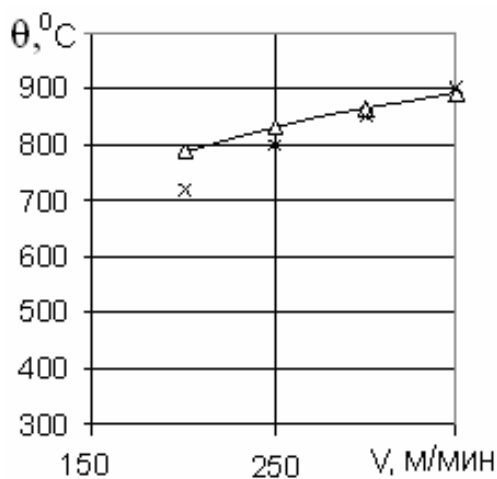


Рисунок 4 – Зависимость температуры резания от скорости резания: × - при обработке стали ШХ15 (НВ = 2200 МПа) резцом Т15К6 $\varphi=45^\circ$, $\gamma=10^\circ$, $t = 1$ мм, $S = 0,21$ мм/об, $h_3 = 0,15$ мм по экспериментальным данным Л.Б.Антоняна; △ - по расчетным данным

Необходимо отметить, что недостатками данного метода, являются погрешности при измерении температуры, связанные с возникновением застойных зон, нароста и их влиянием на термоЭДС, а также с несоответствием условий при резании и тарировании естественной термопары. Однако, расхождение

расчетных данных, полученных на основе термомеханического подхода, с экспериментальными данными не превышало 10-15 %.

Более достоверную информацию о температуре и ее распределении по передней поверхности, по мнению Е.М.Трента [5], представляет метод структурных превращений в инструментах из быстрорежущей стали (рис.5).

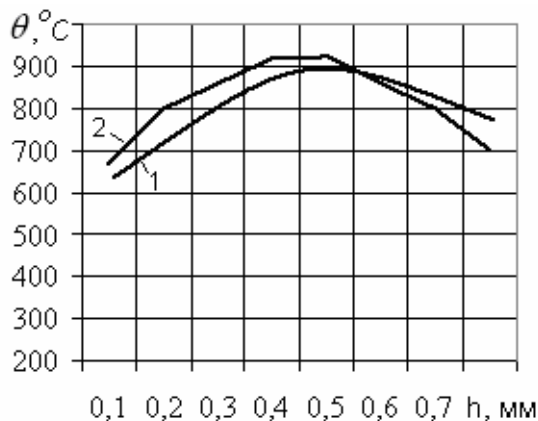


Рисунок 5 – Распределение температуры по передней поверхности резца из быстрорежущей стали при $V=183$ м/мин, $s=0,25$ м/об 1 - по Е.М.Тренту; 2 - расчетные данные

Сопоставление экспериментальных данных с расчетными данными по термомеханическому методу, показало хорошее согласование.

Сопоставление расчетной температуры на задней поверхности производилось с оптическим методом [2]: по инфракрасному излучению (рис.6).

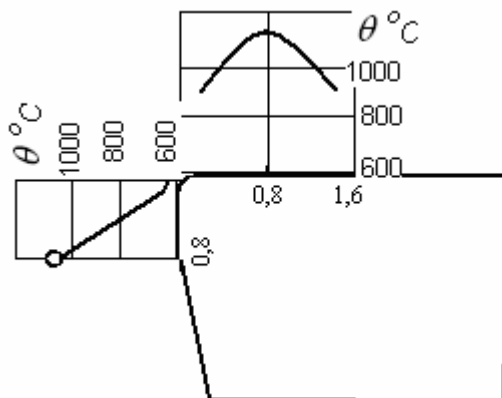


Рисунок 6 – Температура задней поверхности инструмента по Б.Т.Чао, Х.Л.Ли и К.И.Триггеру при обработке стали ХС45, $V = 95$ м/мин, $s = 0,41$ мм/об, $\gamma = 5^\circ$, $\varphi=60^\circ$. \circ – экспериментальные данные; — – расчетные данные.

Данный метод является более точным, так как существует возможность его достаточно точного тарирования. Однако область применения оптического метода ограничивается тем, что измерение температуры возможно только в доступных (видимых) местах.

Таким образом, термомеханический метод определения температур имеет преимущества перед теплофизическим методом, поскольку не требует исход-

ных данных в виде сил резания, так как основывается на свойствах материала, не зависящих от условий резания. Также, данный метод учитывает влияние температуры и всех факторов, изменяющихся при изменении уровня температур. Сопоставление расчетных данных температуры с известными экспериментальными данными различных исследователей, в целом показала хорошее совпадение.

Библиографический список

1. Развитие науки о резании металлов/ В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др.; Под ред. д-р техн. наук Н.Н. Зорева. – М.: Машиностроение, 1968. – 416 с.
2. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
3. Васин С.А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании/ С.А.Васин, А.С.Верещака, В.С.Кушнер.: Учеб. для техн. вузов. -М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001.-448 с.
4. Воробьев А.А. Разработка рекомендаций по режимам обработки колёсных пар повышенной твёрдости / А.А. Воробьев, И.А. Иванов, В.С. Кушнер, А.А. Крутько // Транспорт Урала. – 2009. – Вып.2. (21). – С. 48 – 51
5. Крутько А. А. Повышение эффективности восстановительной токарной обработки железнодорожных колёсных пар: монография / А.А. Крутько, В.С. Кушнер, А.А. Воробьев – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. –170 с.
6. Антонян Л.Б. Исследование эффективности термоэлектрического охлаждения реза. // Тезисы докладов конференции «Теплофизика технологических процессов» секции «Теплофизика резания». – Тольятти, 1972. – С. 76 – 80