

Расчет температуры при резании закаленных сталей на основе
термомеханического подхода

А.А. Крутько, А.М. Бадамшин

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. Представлена методика определения действительных механических характеристик при резании закаленных сталей, учитывающая влияние температуры на изменение предела прочности. Расчеты температуры, выполненные с учетом этих характеристик и взаимовлияния температуры и предела текучести, сопоставлены с результатами экспериментального измерения температуры, полученными различными методами.

Ключевые слова: температура, касательные напряжения, закаленная сталь

Температура при резании материалов широко используется многими исследователями для обобщения влияния условий резания на усадку стружки, силы резания, характеристики изнашивания и износостойкости режущих инструментов [1], а также для расчета или экспериментального определения минимальных целесообразных (оптимальных по критерию изнашивания) и предельных (по критерию теплостойкости) скоростей резания. В подавляющем большинстве случаев исследователи ограничивались экспериментальными сведениями о средней температуре контакта режущего лезвия со стружкой и деталью (о температуре резания). Однако для решения многих практических задач необходимо знать не только средние, но и максимальные температуры, а также распределения температуры по контактными поверхностям режущего инструмента. Кроме того, экспериментальные сведения о температуре, полученные для одних условий резания, не могут быть распространены на другие условия, отличающиеся от тех, которые соответствовали эксперименту. В связи с этим предпочтительны теоретические методы расчета температуры при резании. Однако, поскольку эти методы в значительной мере зависят от допущений, принимавшихся при схематизации процесса резания, по мере развития научных представлений о закономерностях стружкообразования, о взаимосвязи и взаимовлиянии тепловых и механических явлений необходимо совершенствовать и методы расчета температуры при резании.

Методы расчета температуры при резании по основным принимаемым допущениям можно разделить на две группы: теплофизические и термомеханические. Теплофизический метод расчета температур, представленный в работе [2], основан на теории движущихся источников теплоты, на использовании сведений из механики резания о силах резания и на допущении, что касательные напряжения (и, соответственно, плотности тепловых потоков) при резании не зависят от температуры. Термомеханический метод, представленный в работе [3], в качестве исходных данных использует сведения действительных механических характеристиках обрабатываемого

материала при резании и учитывает изменение предела текучести на сдвиг при повышении температуры.

Согласно сложившимся общенаучным представлениям, положенным в основу термомеханического метода, предел текучести деформируемого материала зависит от деформации (ε), скорости деформации ($\dot{\varepsilon}$) и гомологической температуры (T'). Для адиабатических условий деформации эта зависимость описывается определяющим уравнением (1) [3]:

$$\frac{\tau}{S_b} = \frac{dA_w}{d\varepsilon} = AK_\varepsilon \varepsilon^m \exp(-B_\tau \Delta T'), \quad (1)$$

$$\text{где } A = \left\{ \sqrt{3} \left[\sqrt{3} \ln(1 + \varepsilon_z) \right]^m \right\}^{-1}, A_w = \int_0^{\varepsilon_p} \frac{\tau}{S_b} d\varepsilon, \Delta T' = A_w A_1, A_1 = \frac{S_b}{C_V T_{nl}}.$$

Анализ многих известных работ показал, что теоретические методы определения температуры недостаточно сопоставлялись с экспериментальными методами [1, 2, 3].

Таким образом, в настоящей работе необходимо учесть специфику взаимовлияния температуры и предела текучести при резании закаленных сталей, а также сопоставить результаты расчета температуры при резании закаленных углеродистых сталей с известными экспериментальными результатами других исследователей, полученными различными методами измерения температуры.

В связи с тем, что токарная обработка закаленных сталей сопровождается образованием сливной стружки, согласно сложившимся современным представлениям [1, 4, 5], зону стружкообразования целесообразно разбить на две области деформаций А и А'. Данное разбиение допускает не только упрочнение материала, но и его возможное разупрочнение (локализацию) в этой области под влиянием температуры деформации, зависящей от конечного истинного сдвига ε_u (рис. 1).

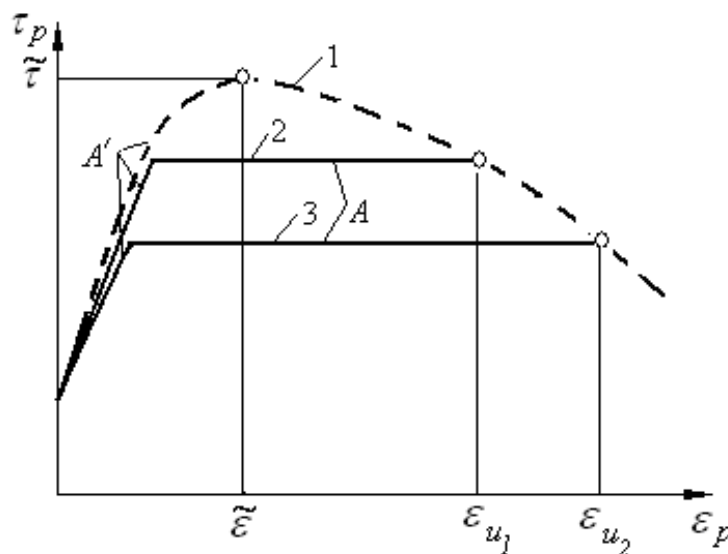


Рисунок 1 - Зависимости предела текучести от текущего истинного сдвига в зоне стружкообразования: 1 - типичная кривая; 2, 3 – кривые, учитывающие локализацию части деформации.

Описание процесса упрочнения закаленной стали при резании в области А' производится по известной термомеханической зависимости (1) после интегрирования. При этом коэффициенты динамичности для зоны стружкообразования и передней поверхности, соответственно, равны: $K_\varepsilon=1,6$; $K_q=1,8$.

Так как зависимости предела текучести от истинного сдвига имеют вид выпуклых кривых с точкой максимума ($\tilde{\varepsilon}_p, \tilde{\tau}/S_b$) (рис.1) следовательно:

$$\tilde{\varepsilon}_\tau = \left[\frac{m(1+m)}{AK_\varepsilon A_1 B_\tau} \right]^{\frac{1}{1+m}} \quad \text{и} \quad \frac{\tilde{\tau}}{S_b} = \frac{AK_\varepsilon \tilde{\varepsilon}_\tau^m}{1+m}, \quad (2)$$

Для описания процесса разупрочнения материала под влиянием температуры при резании закаленной стали в области А (при $\tau_p > \tilde{\tau}$) получено уравнение:

$$\frac{\tau_p}{S_b} = \frac{\tilde{\tau}}{S_b} \left(1 - \frac{T' - T_0'}{1 - T_0'} \right), \quad (3)$$

где $T' = B_1 \cdot \frac{\tilde{\tau}}{S_b} \cdot A_1 \cdot T_{nl} \cdot \varepsilon_u$ - гомологическая температура, соответствующая

разупрочнению материала при резании, B_1 – коэффициент, учитывающий снижение касательных напряжений при локализации деформации под влиянием температуры.

Расчеты показали, что при точении закаленных сталей от твердости НВ = 2500 до 5000 МПа средние касательные напряжения $\bar{\tau}/S_b$ в зоне стружкообразования снижаются с 0,7 до 0,6 вследствие локализации деформаций вблизи конечной границы при $\varepsilon_p > \tilde{\varepsilon}$. При этом максимальные касательные напряжения $\tilde{\tau}/S_b$ изменяются с 0,94 до 1,0.

Полученные максимальные значения касательных напряжений на передней поверхности $\tilde{q}/S_b = 1,02 - 1,13$ (НВ = 2500 - 5000 МПа), использовалось в дальнейшем для расчета температур на контактных поверхностях режущего инструмента.

При расчете температур на передней и задней поверхностях режущего инструмента 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 установленного влияния температуры на предел текучести:

$$K_{j,p} = \frac{q_0 - q_A}{2}, \quad q_A = q_0 \left(1 - \frac{T'}{1 - T_0'} \right), \quad (4)$$

$$\text{где } T' = \frac{\Delta\theta_{II}}{T_{nl}}, \quad T_0' = \frac{\theta_0 + 273}{T_{nl}}$$

Данные зависимости положены в основу программы, позволяющей рассчитывать распределения температур по передней и задней поверхностям инструмента (рис.2), а также средние температуры (температуры резания).

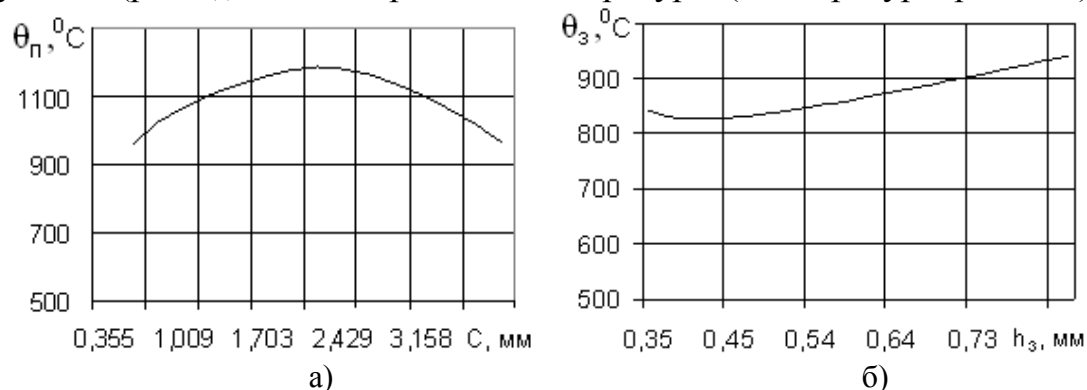


Рис. 2. Распределение температуры на а) передней; б) задней поверхностях резца при точении стали 60, твердостью НВ=2850 МПа резцом Т14К8 при режимах: $v = 45$ м/мин, $s=1,2$ мм/об $\varphi=75^\circ$, $\gamma=10^\circ$, $\alpha=10^\circ$, $r=4$ мм, $t = 8$ мм

Сопоставление расчетных данных производилось с известными экспериментальными данными [1 – 3, 5 – 7].

Наибольшее число опытов по измерению температуры выполнено методом естественной и искусственной термопары (рис.3). Это связано, по-видимому, с простотой измерения температуры резания этим методом.

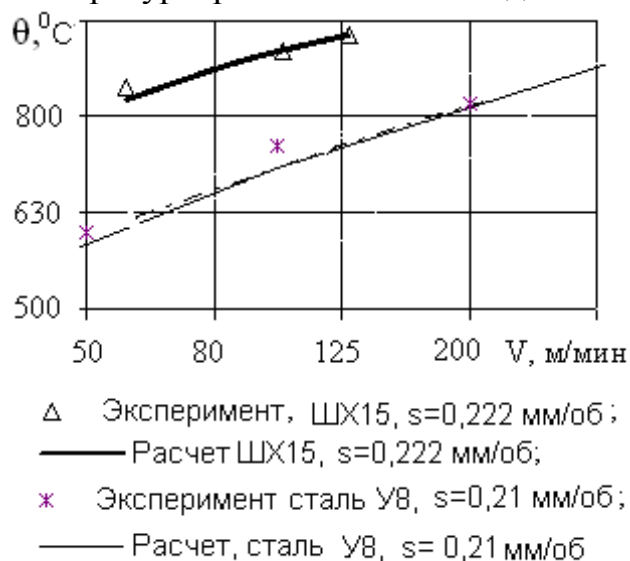


Рис.3. Сопоставление результатов расчета температуры резания с экспериментальными результатами: Г. Л. Куфарева [6] и А.Д.Макарова [7]

Так, при сопоставлении данных, полученных Г. Л. Куфаревым и А.Д. Макаровым при точении закаленных сталей ШХ15 (НВ=3000 МПа) и У8 (НВ=2200 МПа), наблюдается хорошее совпадение расчетных значений с экспериментальными.

В работах Г. Бутройда [2], Б.Т.Чао, Х.Л.Ли и К.И.Триггера и др. сведения о температурах передней и задней поверхностей режущего лезвия получены по

инфракрасному излучению (рис.4). Достоинством этого метода является более точное тарирование.

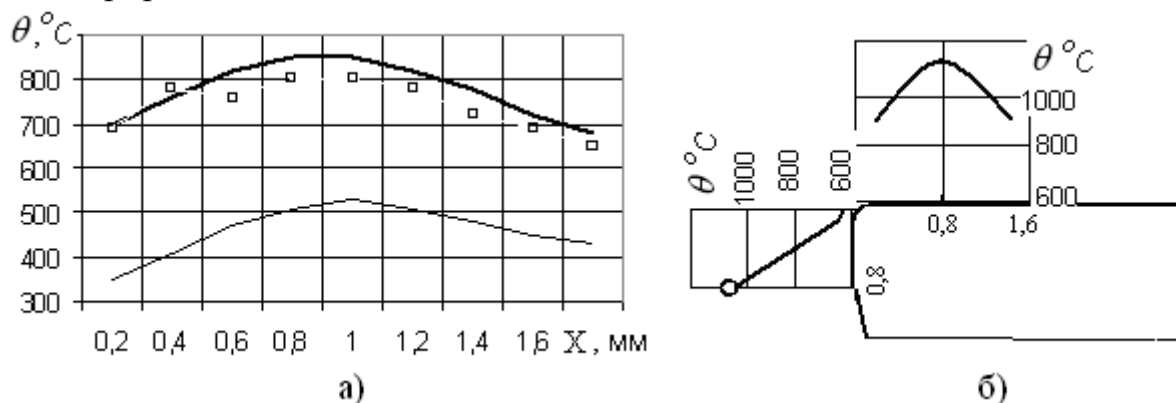


Рис. 4. а) - распределение температуры по передней поверхности резца при токарной обработке стали 45 НВ = 2290 МПа, $V = 23$ м/мин, $S = 0,6$ мм/об, $t = 5$ мм: \square - по экспериментальным данным Г. Бутройда [2]; — - расчетные результаты авторов; — - расчетные результаты А.Н. Резникова [2], б) - температура 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, $\gamma = 5^\circ$, $\phi = 60^\circ$ [2]. \circ – экспериментальные данные; — – расчетные результаты.

Экспериментальные данные Г.Бутройда и Б.Т.Чао, Х.Л.Ли и К.И.Триггера [2] хорошо согласуются с результатами, полученными по предлагаемой модели, но не подтверждают результатов, полученных теплофизическим методом [2].

Таким образом, представленный метод расчета температур, основанный на термомеханическом подходе, имеет преимущества перед теплофизическим методом, поскольку не требует исходных данных в виде сил резания, так как основывается на механических свойствах материала. Экспериментальная проверка модели, показала достаточно хорошее согласование расчетных данных температуры с известными экспериментальными данными различных исследователей. Следовательно, данный метод может быть использован для расчета температуры и касательных напряжений при резании закаленных сталей.

Библиографический список

1. Развитие науки о резании металлов. Колл. авт. – М.: Машиностроение, 1967. – 420 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.: ил.
4. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента –М.:Машиностроение, 1969, - 148 с.
5. Кушнер В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных металлов. - Иркутск: Изд-во Иркутского университета,

1982. - 180 с.

6. Куфарев Г. Л. Характер износа инструмента и его влияние на основные параметры процесса резания при точении закаленной стали ШХ-15 / Г. Л. Куфарев, Н. И. Ховах // Известия ТПИ. — 1970. — Т. 157 : Механика и машиностроение. — С. 129-135

7. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976, - 278 с.