А. И. Саградян

Исследование деформированного состояния приконтактных слоев инструмента при обработке конструкционных материалов

(Представлено академиком Л. А. Агаловяном 7/ VII 2005)

Решение проблемы износостойкости инструмента связано с изучением закономерностей процесса резания в зоне контактного взаимодействия. Одним из дополнительных резервов повышения износостойкости инструмента в процессе резания является управление взаимодействием дефектов кристаллической решетки поверхностных слоев инструментального материала. В этой связи наибольший интерес представляет исследование структурных изменений при резании [1-6].

Экспериментальное исследование изменения структуры в процессе резания в материаловедческом аспекте позволяет определить структуру поверхностей трения, ее влияние на износостойкость инструмента и дать структурную оценку трущихся пар резец - обрабатываемая деталь при пластическом деформировании их поверхностных слоев.

Целью данной работы является исследование структурных изменений на контактном участке поверхностных слоев инструмента вследствие действующих давлений, температур, контактных напряжений и деформаций. В условиях длительного воздействия температуры и давления физико-механические свойства деформированных материалов релаксируют. В работе рассматривается это явление, а также воздействие нормальных и касательных напряжений на свойства поверхностных слоев инструментального материала.

Эксперименты проводились на станке 1К62 с вариатором ВР-1 для плавного регулирования скоростей, при режимах резания, соответствующих 60-минутной стойкости инструмента, которые для пары B14M7K25-сталь 45 составляли: V₆₀ = 65 м/мин, S = 0.3 мм/об, t = 2 мм [2].

Идентичные условия термообработки всех исследуемых резцов и тщательный контроль на всех стадиях их изготовления обеспечили незначительный разброс стойкости инструмента. Были исследованы три одинаковых по физико-механическим свойствам резца так, чтобы можно было рельефно представить все три стадии износа, как при работе одного резца. Первый из них работал до конца приработки, т.е. самоорганизации и стабилизации процесса, второй - с начала до конца установившегося периода износа, а третий - с начала до полной потери работоспособности. Для каждой стадии износа испытывались по три резца и выбирались средние значения результатов эксперимента.

Для изучения структуры применены металлографические и рентгеноспектральные методы с использованием микроскопа МИМ-8И и рентгеновского микроанализатора INCA Energy 400, установленного на сканирующем электронном микрозонде VEGA-TS5130MM с разрешающей способностью 1мкм. Для изучения изменений структуры контактных слоев в теле резца измерялась микротвердость в исследуемых сечениях шлифов режущего клина с помощью микротвердомера ПМТ-3.

Важное значение с точки зрения стойкости инструмента имеет исследование структурных превращений на разных стадиях износа в зависимости от продолжительности работы резца и

связанных с ним явлений, происходящих на контактных поверхностях инструмента вследствие воздейстия на них высоких давлений и температур. При этом происходят необратимые структурные превращения, а точки фазовых превращений, в частности $\alpha \rightarrow \gamma$, перемещаются в сторону малых температур [4, 5].

Для исследования напряженно-деформированного состояния на передней поверхности инструмента изучено воздействие контактных напряжений [4], экспериментально подтверждено наличие двух участков в зоне контакта при резании - пластического и упругого (рис. 1,2).



Рис.1. Конфигурации застойного и белого слоев по ширине контакта в зависимости от касательных напряжений.

Область пластического контакта разделена на две части: C₂ - участок деформационного упрочнения, (C₁-C₂) - участок температурного разупрочнения (рис. 2).



Рис. 2. Изменение толщины застойного и белого слоев в зависимости от касательных напряжений по ширине контакта.

На участке упругого контакта (0 < x < (C – C₁)) касательные и нормальные напряжения меняются пропорционально [3]:

$$\tau_{\rm F} = \mu_{\rm F} \sigma_{\rm N},\tag{1}$$

где μ_{F} - коэффициент внешнего трения, σ_{N} - нормальное напряжение:

$$\sigma_{\rm N} = \sigma_{\rm M} ({\rm x/c})^{\rm n}, \tag{2}$$

где σ_{M} - нормальное контактное напряжение у режущей кромки, х - расстояние рассматриваемой точки передней поверхности от точки отрыва стружки, с - ширина контакта стружки с передней поверхностью, п - показатель степени, характеризующий неравномерность распределения напряжений.

Значения σ_{M} и
п рассчитываются по формулам [3]

$$\sigma_{\rm M} = \frac{N}{bc} \left\{ \frac{rc}{a\xi[\mu + tg(\beta - \gamma)]} + 1 \right\}, \quad n = 2 \left\{ \frac{c}{a\xi[\mu + tg(\beta - \gamma)]} - 1 \right\}, \quad (3)$$

где N - нормальная сила (N = 1580 H), r - расстояние текущей точки от начала координат, а и b - толщина и ширина среза, с - ширина контакта, ξ - усадка стружки, β - угол сдвига, γ - передний угол, μ - средний коэффициент трения по всей длине контакта.

Согласно условиям наших экспериментов: r = 2 мм, μ = 0.8, ξ = 2.95, β = 30°, γ = 10°, a = 0.21мм, b = 2.83 мм, c = 1.99 мм - получаем: $\sigma_{\rm M}$ = 1828 МПа, n = 3.54.

Определив $\sigma_{\rm M}$ и n, можно построить эпюру распределения нормальных и касательных напряжений на передней поверхности резца.

Длина пластического контакта C₁, рассчитанная согласно [3]:

$$C_1 = a[\xi(1 - tg\gamma) + sec\gamma], \qquad (4)$$

составляет: 0.75 мм.

Из рис. 2 значение коэффициента трения µ можно рассчитать как

$$\mu = (\mu_{DnC_2} + \mu_{Dn(C_1 - C_2)}) + \mu_{Dy(C - C_1)} \quad \text{или} \quad \mu = \begin{pmatrix} \tau_{DnC_2} & \tau_{Dn(C - C_2)} \\ \hline \sigma_N & + \hline \sigma_N \end{pmatrix} + \frac{\tau_{Fy(C - C_1)}}{\sigma_N}, \quad (5)$$

где τ_{DnC_2} , μ_{DnC_2} , $\tau_{Dn(C-C_2)}$, $\mu_{Dn(C_1-C_2)}$ и $\tau_{Dy(C-C_1)}$, $\mu_{D_y(C-C_1)}$ - касательные напряжения и коэффициенты трения, соответственно, на участках C_2 , (C_1-C_2) и $(C-C_1)$. Для нашего случая: $C_2 = C_1/2 = 0.375$ мм, а длина упругого контакта - $(C-C_1) = 1.25$ мм.

Уравнение (5) подтверждается экспериментально (рис. 1, 2); из него следует, что касательные напряжения в отличие от принятой модели [3] при обработке малоуглеродистых сталей на участке пластического контакта меняются по параболическому закону, увеличиваясь от начала режущего лезвия до конца участка деформационного упрочнения C_2 и несколько снижаясь на участке температурного разупрочнения (C_1-C_2). Эти же напряжения на участке упругого контакта имеют гиперболическую зависимость, коррелируя с нормальными напряжениями (рис. 2).

Изменение нормальных напряжений σ_N по длине контакта с передней поверхностью инструмента описывается гиперболической зависимостью. В [1, 3] на участке пластического контакта в основном принимается $\tau_F = \tau_S$, т.е. касательные напряжения постоянны.

Проведенные исследования экспериментально подтверждают качественное различие кинематических процессов и деформационного состояния на двух участках пластической зоны контакта (рис.1). Изменение касательных напряжений в этой зоне зависит от суммарного эффекта двух конкурирующих процессов: деформационного упрочнения и температурного разупрочнения (рис. 1, 2).

Под воздействием нормальных и касательных напряжений, а также давлений и температур на передней поверхности, и особенно на участке пластического контакта, наблюдается деформационное упрочнение тонких поверхностных слоев инструментального материала в результате концентрации дислокаций с повышением их плотности на расстоянии 25...45 мкм от контактных поверхностей (передней и задней) (рис. 3). На глубине 15...20 мкм наблюдается вторая граница концентрации дислокаций, что, по-видимому, является результатом волнового характера распределения деформаций с поверхности контакта в тело инструмента. Таким образом, в низлежащих слоях толщиной до 60 мкм происходит волновой процесс распределения деформаций, связанный с воздействием сходящей стружки, что и приводит к структурным изменениям этих слоев.

Распределение плотности и концентрация дислокаций отражают влияние давлений со стороны передней и задней поверхностей инструмента, и линия приобретает вид кривой, показывающей распределение деформаций на стадии установившегося износа - Т₂ (рис.3, 4,

г) в режущем клине резца.

Под влиянием указанных факторов в процессе резания формируются поверхностные слои твердых тел, обуславливающие механизм трения и износа при резании, отличающийся специфическим структурным состоянием.

Образующиеся в процессе трения поверхностные слои инструмента, особенно на участке пластического контакта, характеризуются повышенной свободной энергией, физической и химической активностью, а также вариацией механических свойств по сравнению с низлежащими слоями, не участвующими в процессе контактирования. Поверхностные слои определяют механизм контактного взаимодействия и уровень износостойкости инструментального материала, что свидетельствует о специфическом влиянии и роли пластической деформации поверхностных слоев на изменение структур приконтактных слоев.

Глубина структурных изменений в поверхностно-деформированном слое в наших экспериментах, определенная измерениями микротвёрдостей (рис.4), составляет ~ 100...150 мкм, о чем свидетельствует также рентгеноспектральное зондирование по сечению режущего клина инструмента (рис. 3).

Поверхностные эффекты в [5] объясняются образованием в поверхностной области контакта слоя с повышенной плотностью дислокаций, который является барьером для дислокаций, генерируемых в процессе деформации.

Согласно [5] определено действующее на дислокации эффективное напряжение т:

$$\tau = \tau_a - \tau_i, \tag{6}$$

где τ_a - внешнее напряжение, τ_i - обратное напряжение, возникающее в результате

пластической деформации внутренних слоев. Дополнив τ величиной τ_s, получим

$$\tau = \tau_a - \tau_i - \tau_S$$

где τ_S - внутреннее напряжение, создаваемое debirs-слоем (слоем с повышенной плотностью дислокаций).

Энергия активации пластической деформации U связана с напряжением деформированного приповерхностного слоя:

$$U = U_0 - V_a \tau = U_0 - V_a (\tau_a - \tau_i - \tau_S).$$
(7)

Отсюда видно, что при постоянном активационном объеме V_a и уменьшении τ_S энергия активации U также уменьшается. При этом активационный объем также является функцией τ_S , т.е.

$$V_{a} = KT\Delta ln \ \dot{\chi} / \Delta \tau = KT\Delta \dot{\chi} ln / [\Delta \tau_{a} - \Delta (\tau_{i} + \tau_{s})], \tag{8}$$

где 🗙 - скорость деформаций.

При этом в качестве критерия, оценивающего степень изменения структуры и свойств инструментального материала, было выбрано изменение значения микротвердости режущего инструмента в разные периоды работы резца.

Микрошлифы были изготовлены в сечениях, нормальных к главной режущей грани, в центре активной части режущей кромки, совпадающей примерно с центром лунки.

При рассмотрении поля микротвердости исходя из продолжительности работы резца видно, что структура инструментального материала претерпела изменения, так как в конце стадии начального износа микротвердость на непосредственном контакте со сходящей стружкой повышается по сравнению с матричной на 110...130 HV (рис.4, а). Причем граничное измерение микротвердости от передней поверхности примерно совпадает с линией распределения деформации со стороны как передней, так и задней поверхностей. На участке пластического контакта С1, где действуют наибольшие нормальные и касательные напряжения, экспериментально обнаружено (рис. 4, а), что на глубине до 100 мкм в конце стадии начального периода износа уровень микротвердости доходит до 1166 HV. В конце стадии установившегося износа резца замечено некоторое снижение микротвердости, однако на упругом участке контакта сохраняется высокая микротвердость - до 1000 HV, мало отличающаяся матричной, составляющей 1030...1050 HV. Как показали от экспериментальные данные, на участке пластического контакта повышение микротвердости по сравнению с матричной составляет до 130 HV и сохраняется на полочке контакта практически до 55 мин работы инструмента, при этом сохраняются высокие физикомеханические свойства. Причем по сравнению с обычными быстрорежущими сталями зона нормального периода работы у резцов из быстрорежущего сплава с интерметаллидным упрочнением В14М7К25 на 5 мин больше, что при скоростях 60-минутной стойкости, превышающих в 1.5 раза обычные быстрорежущие стали, обеспечивает высокую производительность, качество обработанных поверхностей,



Рис.3. Распределение плотности дислокаций в теле инструмента: а)сканирование по глубине, б) сканирование по площади



Рис.4. Зависимость микротвердости от продолжительности работы резца при обработке стали 45 резцами В14М7К25 в режимах: V₆₀ = 65 м/мин., S = 0.3 мм/об., t = 2.0 мм: а) в конце начального износа, б) в конце установившегося износа, в) в стадии катастрофического износа, г) зависимость износа от продолжительности, по стадиям.

долговечность инструмента и низкую себестоимость обработки.

Обнаружено, что распределение плотности и концентрация дислокаций отражают влияние давлений и температур со стороны передней и задней поверхностей инструмента, показывающих глубину и конфигурацию прилегания деформаций в теле резца. Установлено, что с повышением деформированного состояния поверхностных слоев инструмента и вследствие изменения структуры и микротвердости при соответствующих условиях резания повышается износостойкость инструмента.

Государственный инженерный университет Армении

Литература

1. *Полетика М. Ф.* - Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. М. Машиностроение. 1985. 160 с.

2. *Саградян А. И., Саркисян К. А.* - Межвуз. сб. науч. трудов "Машиностроение". Ереван. Сер. 16. Вып. 3. 1980. С. 29-35.

3. Зорьев Н. Н. - Развитие науки о резании металлов. М. Машиностроение. 1967. 405 с.

4. *Скотникова М. А., Касторский Д. А., Строкина Т. И.* - Инструмент и технология. 2002. №7-8. С. 62-68.

5. *Рыбакова Л. М., Кусенкова Л. И.* - Структура и износостойкость металлов. М. Машиностроение. 1982. 209 с.

6. Галкин С. Г. - В сб.: Судостроение и судоремонт. СПб. 1998. С. 148-151.

Ա. Ի. Սահրադյան

Գործիքի մերձկոնտակտային շերտերի դեֆորմացման վիճակի հետազոտումը կոնստրուկցիոն նյութերի մշակման դեպքում

Դիտարկված են մշակվող նյութ–գործիք զույգի (պողպատ 45, B14M7K25 արագահատ համաձուլվածք) մերձկոնտակտային շերտերում լարվածադեֆորմացման վիձակը և շփման գործընթացները, որոնք բնորոշում են գործիքի մաշման աստիձանը և կայունությունը։ Միկրոկառուցվածքային և ռենտգենյան մեթոդներով ուսումնասիրված են այդ շերտերում դիսլոկացիաների կուտակման և ամրացման երևույթները, որոնց աստիձանը և խտությունը հաստատված են միկրոկարծրությունների չափման շնորհիվ։

A. I. Sahradyan

Investigation of Deformational State of Instrument Contacting Layers under the Treatment of Constructional Materials

Tense - deformational state and the processes of friction of contacting layers of the pair material - instrument (steel 45, quick cutting alloy B14M4K25), which characterize the degree of deterioration and the stability of the instrument are viewed here. The concentration of dislocations and phenomenon of solidification of these layers, the degree and the depth of which are established by the measurements of microsolidities have been investigated by the microstructural and X-ray methods.