МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 658.56:621.924.93

В. Д. Кревчик, В. А. Скрябин, Г. В. Тарабрин

К ТЕОРИИ ДИСЛОКАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ УПЛОТНЕННЫМ АБРАЗИВОМ

В рамках простейшей модели Гранато-Люкке теоретически рассмотрен механизм дислокационного упрочнения поверхностного слоя деталей в процессе обработки незакрепленным абразивом. Показано, что на этапе микрорезания, когда мгновенная контактная температура достаточно высока, происходит увеличение дефекта модуля упругости за счет расплывания зон Коттрелла. Последующий процесс диффузии термически генерированных вакансий к стокам сопровождается значительным уменьшением дефекта модуля упругости, т.е. дислокационным упрочнением, при котором возможно образование микротрещин.

Как известно [1, 2], вопросы изучения тепловых явлений при шлифовании имеют первостепенное значение в теории абразивной обработки. Изучение тепловых процессов важно с точки зрения предотвращения вредного воздействия температурного поля на поверхность обрабатываемых деталей. Необходимо отметить, что реальные материалы, как правило, содержат дислокации, точечные дефекты и различные примесные включения, что значительно снижает их прочностные характеристики.

Тепловые процессы, инициированные мгновенной контактной температурой на этапе микрорезания, могут стимулировать изменение дефектной структуры в поверхностном слое материала, толщина которого соизмерима с глубиной микрорезания. Такие изменения при определенных условиях могут существенно сказаться на фактическом сопротивлении материала сдвигу и на характере его разрушения.

В настоящей работе в рамках простейшей модели Гранато–Люкке [3] теоретически рассмотрен процесс дислокационного упрочнения при микрорезании в поверхностном слое материала обрабатываемой детали. Теоретический подход основан на двухэтапном механизме дислокационного упрочнения. На первом этапе в процессе микрорезания возникает достаточно сильный температурный импульс за счет мгновенной контактной температуры. В результате дислокации освобождаются от закрепляющей примеси (диффузия «облаков Коттрелла») и дефект модуля упругости увеличивается. Характерное время данного процесса t_0 определяется средней шириной микровыступов $\overline{L}_m$ и средней скоростью $\overline{\upsilon}$ движения абразивного зерна: $t_0 = \overline{L}_m / \overline{\upsilon}$. Оценка величины t_0 при следующих значениях величин: $\overline{\upsilon} = 2$ м/с и $\overline{L}_m$ = 20 мкм, дает t_0 = 10^{-5} с. Для оценки величины мгновенной контактной температуры рассмотрим простейшую краевую задачу – задачу Коши с мгновенным точечным источником тепла $F(x,t) = Q_0\delta(x-\xi)\delta(t-\tau)$, где $Q_0 = 2M\overline{\upsilon}^2/(\pi\overline{L}_m^2)$ –

мощность источника; M – среднее значение массы абразивного зерна. Решение задачи Коши хорошо известно [4] и имеет вид

$$T(x,t)=\frac{Q_0}{c\rho}\frac{1}{2\sqrt{\pi a^2(t-\tau)}}e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2(t-\tau)}}, \tag{1}$$

где c – удельная теплоемкость материала; ρ – его плотность; a^2 – коэффициент температуропроводности.

После усреднения выражения (1) по эффективной длине дислокации l с весовой функцией $N(l)$ гауссова вида

$$N(l)dl=\frac{\Lambda}{\sqrt{\pi}L^2}e^{-\frac{l^2}{L^2}}, \tag{2}$$

где Λ – общая длина дислокаций в материале детали; L – средняя длина дислокационной петли, получим

$$\left\langle T(x,t)\right\rangle_l=\frac{Q_0}{c\rho}\frac{1}{2\sqrt{\pi}}\frac{\Lambda}{L^2}\operatorname{Arcth}\sqrt{\frac{2a\sqrt{t}}{L}+1}, \tag{3}$$

где $\operatorname{Arcth} z$ – гиперболический арккотангенс [5].

Оценим величину $\left\langle T(x,t)\right\rangle_l$ при следующих значениях входящих в (3) величин: $\Lambda=6\cdot10^{-2}$ м; L = 60 мкм; c = 460 Дж/(кг·К); $\rho=$ 7800 кг/м^3; $Q_0\approx10^3$ Дж/м^2; M = 6,7 мг при зернистости 80; $t=t_0\approx10^{-5}$ с, в результате получим для мгновенной контактной температуры $\left\langle T(x,t)\right\rangle_l\approx1820$ К. Таким образом, мгновенная контактная температура может достигать достаточно больших значений вплоть до температуры плавления металла [2]. Как было показано в работе [6], дефект модуля упругости $\Delta E/E_0$, связанный с процессом расплывания зон Коттрелла, можно представить в виде

$$\left(\frac{\Delta E}{E_0}\right)_t=\left(\frac{\Delta E}{E_0}\right)_0\frac{\pi\tau^*}{4r_0^2}, \tag{4}$$

где $(\Delta E/E_0)_t$ – мгновенное значение дефекта модуля упругости; $(\Delta E/E_0)_0$ – значение дефекта модуля упругости в начальный момент времени; r_0 – радиус облака Коттрелла вокруг дислокационной петли; τ^* определяется как [6]

$$\tau^*=\int_0^t D(t')dt', \tag{5}$$

где $D(t)=D_0\exp\left[-Q/(k\left\langle T(x,t)\right\rangle_l)\right]$ – коэффициент диффузии примеси, декорирующей дислокации; Q – энергия активации диффузии.

Подставляя (3) в (5) и выполняя интегрирование по t' в приближении, когда $2a\sqrt{t}/L << 1$, получим

$$\tau^* \approx D_0 t \left[1 + \frac{4QL^2}{a^2 A_0 kt} li\left(\frac{a^{2t}}{L^2} \right) \right], \qquad (6)$$

где $A_0 = Q_0 \Lambda / (\rho c 2\sqrt{\pi} L^2)$; $li(z)$ – интегральный логарифм [5].

Оценка величины $\varepsilon_1 = (\Delta E / E_0)_t / (\Delta E / E_0)_0$ при следующих значениях параметров, входящих в (4): $2r_0 = 0{,}1$ мкм, $D_0 \approx 10^{-7}$ м^2/с, $Q \approx 1{,}3$ эВ, $t \approx 10^{-7}$ с, $a^2 \approx 12 \cdot 10^{-6}$ м^2/с, дает $\varepsilon_1 \approx 2{,}8$, т.е дефект модуля упругости может увеличиться примерно в три раза. Следует отметить, что при некотором критическом напряжении возможно полное открепление дислокационных петель [7] с последующим дрейфом дислокации совместно с примесной атмосферой. Накопление дислокаций вблизи примесных включений является одной из возможных причин образования микротрещин [8]. Из (4) видно, что эффект увеличения дефекта модуля упругости имеет место, когда $D_0 t > 4r_0^2 / \pi$, т.е. определяется типом декорирующей дислокацию примеси и геометрией облака Коттрелла. На втором этапе рассматриваемого механизма происходит диффузия вакансий к стокам. Действительно, следствием мгновенной контактной температуры является тепловая генерация вакансий. За время $t_\upsilon = h / \upsilon$ (h – величина шага профиля шероховатой поверхности) вакансии диффундируют к стокам – дислокациям. Коэффициент диффузии вакансий D_υ можно представить в виде

$$D_\upsilon = D_{0\upsilon} e^{-\frac{(Q_\upsilon - W_\alpha)}{k\langle T(x,t)\rangle_l}}, \qquad (7)$$

где Q_υ – энергия активации диффузии вакансий; W_α – энергия взаимодействия вакансии с дислокацией [9],

$$W_\alpha = \frac{4}{3} \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \frac{Gb\varepsilon_c r^3}{R} \sin\alpha, \qquad (8)$$

где – число Пуассона; G – модуль сдвига; b – величина вектора Бюргерса; R и α – полярные координаты в плоскости, перпендикулярной дислокационной линии; ε_c – доля объема кристалла, занимаемая цилиндрическими областями дислокационных линий ($\varepsilon_c < 0{,}7$).

Усредняя (8) по возможным значениям R с весовой функцией $f(R) = c\exp(-\alpha R / r_0)$ ($c = e / r_0$, e – основание натурального логарифма), получим

$$\langle W_\alpha \rangle_R = \frac{4}{3} \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} Gb\varepsilon_c r^3 \frac{e}{r_0} [-E_i(-1)] \sin\alpha, \qquad (9)$$

где $Ei(z)$ – интегральная показательная функция [5].

Далее, усредняя (9) по всем возможным значениям α с весовой функцией $\varphi(\alpha)=\exp(-\alpha)/\left[1-\exp(-2\pi)\right]$, получим

$$\left\langle W_\alpha \right\rangle_R = \frac{4}{3}\frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} Gb\varepsilon_c r^3 \frac{e}{r_0}\left[-E_i(-1)\right]\frac{1}{\pi}\left(1-e^{-2\pi}\right). \tag{10}$$

Для оценки величины $\left\langle W_\alpha \right\rangle_{R,\alpha}$ примем следующие численные значения величин, входящих в соотношение (10): $\nu = 0{,}3$; $2r_0 = 0{,}1$ мкм; $G = 8\cdot 10^{10}$ Н/м^2; $b = 10^{-10}$ м; $r^3 \approx 7\cdot 10^{-28}$ м^3, в результате получим $\left\langle W_\alpha \right\rangle_{R,\alpha} \approx 0{,}28$ эВ.

Рассмотрим диффузию вакансий к стокам. В этом случае простейшая краевая задача может быть записана $\dfrac{\partial n_\upsilon}{\partial t} = D(t)\dfrac{\partial^2 n_\upsilon}{\partial x^2}$ в виде $-\infty < x < +\infty$

$$\frac{\partial n_\upsilon}{\partial t} = D(t)\frac{\partial^2 n_\upsilon}{\partial x^2}; \tag{11}$$

$$t_0 < t < +\infty;$$

$$n_\upsilon(x,t_0) = n_0 e^{-\frac{x^2}{D_\upsilon(t_0)t_0}}. \tag{12}$$

Предполагается, что в течение времени t_0 за счет тепловой генерации формируется облако вакансий гауссова вида (12). Решение задачи (11), (12) легко получить методом интегрального преобразования Фурье:

$$c(d,\tau) = \frac{\sqrt{\pi D_\upsilon(t_0)t_0}}{d}\Phi\left(\frac{d}{\sqrt{D_\upsilon(t_0)t_0\left(\dfrac{4\tau}{D_\upsilon(t_0)t_0}+1\right)}}\right), \tag{13}$$

где $c = n_\upsilon / n_0$ – концентрация вакансий в относительных единицах; d – среднее расстояние до стоков; $\Phi(z)$ – интеграл вероятности [5]; τ имеет следующий вид:

$$\tau = D_0(t-t_0) + D_0\frac{4\left(Q_\upsilon - \left\langle W_\alpha \right\rangle_{R,\alpha}\right)L^2}{a^2 k A_0}\left[li\left(\frac{a^2 t}{L^2}\right) - li\left(\frac{a^2 t_0}{L^2}\right)\right]. \tag{14}$$

Нетрудно показать, что кинетика возврата описывается следующим соотношением:

$$\left(\frac{\Delta E}{E_0}\right)_t = \left(\frac{\Delta E}{E_0}\right)_0\left[1+\frac{c(d,\tau)}{M(t_0)}\right]^{-2}, \tag{15}$$

где M – число точек закрепления дислокационной линии по истечении времени t_0.

Оценим величину $\varepsilon_2 = (\Delta E / E_0)_t / (\Delta E / E_0)_0$, полагая $Q_\upsilon \approx 1$ эВ, $\langle W_\alpha \rangle_{R,\alpha} \approx 0{,}3$ эВ, $t_0 = 10^{-5}$ с; $D_{0\upsilon} \approx 10^{-4}$ м^2/с; $M(t_0) = 1$ [7] (остальные параметры, входящие в (15), имеют такие же значения, как и в случае предыдущих оценок), в результате получим $\varepsilon_2 \approx 0{,}25$.

Приведенная оценка показывает, что поверхностный слой материала в результате процесса микрорезания получает дислокационное упрочнение, при котором возможно образование микротрещин. При этом толщина такого слоя порядка $\sqrt{\rho D_\upsilon(t_0) t_0}$ и составляет 6 мкм. Таким образом, в рамках простейших модельных представлений продемонстрировано существенное влияние дефектной структуры металла на физико-механические характеристики поверхностного слоя в процессе обработки уплотненным абразивом. Эти характеристики важны, поскольку оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей и в том числе на износостойкость, усталостную прочность, а также контактную и коррозионную стойкость [1].

Список литературы

1. **Мартынов, А. Н.** Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами / А. Н. Мартынов. – Саратов, 1981. – 210 с.
2. **Скрябин, В. А.** Основы процесса субмикрорезания при обработке деталей незакрепленным абразивом / В. А. Скрябин. – Пенза, 1992. – 120 с.
3. **Труэлл, Р.** Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. – М., 1972. – 307 с.
4. **Тихонов, А. Н.** Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М : Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 2004. – 798 с.
5. **Янке, Е.** Специальные функции / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш. – М., 1977. – 252 с.
6. **Артемов, И. И.** Исследование влияния дефектной структуры материала болтового соединения на процесс ослабления затяжки / И. И. Артемов, В. Д. Кревчик, С. В. Суменков // Новые промышленные технологи. – 2002. – № 5–6. – С. 67.
7. **Артемов, И. И.** Дислокационная модель фреттинг-усталости в условиях вибрационного нагружения материала / И. И. Артемов, В. Д. Кревчик // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 5. – С. 42.
8. **Кулемин, А. В.** Ультразвук и диффузия в металлах / А. В. Кулемин. – М. : Металлургия, 1978. – С. 199.
9. **Коттрелл, А. Х.** Дислокации и пластическое течение в кристаллах / А. Х. Коттрелл. – М. : Металлургия, 1958. – С. 200.