УДК 620.178.7: 669.14

В. И. Серебряков

БАЛАНС ЭНЕРГИИ В ПРОЦЕССЕ ДРОБЕУПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Политехника, Зеленогурска
Зелёна Гура, Польша

Формирование и изменение таких характеристик качества поверхностного слоя как шероховатость, остаточные напряжения, микротвердость и др. в процессе дробеупрочнения стальными шариками зависит от количества энергии, вносимой в поверхностный слой при ударе шарика о поверхность [1, 2].

В процессе соударения с различной скоростью абсолютно жесткого шара с упругопластическим полупространством кинетическая энергия шара расходуется на упругопластическое сопротивление материала упрочняемой поверхности с учетом тепловых потерь. Под действием нормальной составляющей силы давления шара при упругопластическом деформировании образуется лунка, глубина которой определяет высоту неровности при единичном или многократном ударах. Совместное силовое и тепловое воздействие изменяет в поверхностном слое его свойства. Степень таких изменений зависит от его исходного, до упрочнения, состояния. Поэтому прогнозирование изменения свойств и характеристик поверхности при упрочнении может быть осуществлено при известном энергетическом влиянии силового и теплового воздействия на упрочняемую поверхность.

На рис.1 показана общая схема взаимодействия абсолютно жесткого шара с полубесконечной плоскостью при ударе под углом β со скоростью подлета (соударения) V. В процессе упрочнения угол может изменяться от 0 до 90.

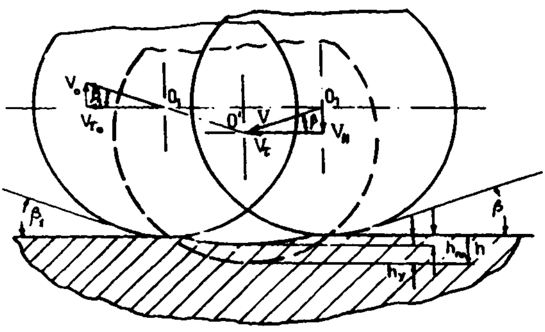

Рис.1 Схема упругопластического контакта сферы с плоскостью

Рассмотрим характер взаимодействия шара с поверхностью при прямом ударе. В процессе соударения абсолютно жесткого шара с полубесконечным пространством кинетическую энергию упругопластической деформации можно выразить как:

$$E_K = \frac{mV_{\text{н}}}{t}h + E_{\text{п}}, \tag{1}$$

где m – масса шара; $V_{\text{н}}$ – нормальная составляющая скорости подлета; t – время упругопластического внедрения в материал; h – величина упругопластического внедрения; $E_{\text{п}}$ – энергия потерь при ударе.

Согласно условному разделению свойств материала на упругие и пластические, предложенному еще Ньютоном, при деформации на величину h единичного микростолбика, выделенного под площадью контакта шара с материалом, вся кинетическая энергия шара расходуется на преодоление упругих и пластических сил сопротивления материала с учетом тепловых потерь:

$$E = E_{\text{у}} + E_{\text{пл}} + E_{\text{п}} \tag{2}$$

Согласно закону Герца упругие и пластические деформации при нагружении развиваются независимо друг от друга, поэтому:

$$h = h_{\text{у}} + h_{\text{пл}}, \tag{3}$$

где $h_{\text{у}}$ – величина упругого внедрения шара, м; $h_{\text{пл}}$ – величина пластического внедрения шара, м.

Энергия упругой обьемной деформации поверхности переходит в энергию упругого восстановления $E_{\text{у}}$ этой поверхности, сообщающей шару скорость отлета $V_0 : E_{\text{у}} = V_0^2/2$

Энергию пластического деформирования поверхности $E_{\text{пл}}$ и энергию потерь на трение и тепловыделение $E_{\text{п}}$ можно определить исходя из следующих соображений.

Учитывая, что энергия деформации при ударе равна работе ударных импульсов или произведению сил ударных импульсов на путь обьемной деформации, а величина импульса силы – это произведение силы на время деформации (действия силы), можно определить силы, действующие в процессе удара шара о поверхность, следующим образом.

Силы пластической деформации (сила ударного импульса, направленного на преодоление пути пластического внедрения шара в материал):

$$F_{\text{пл}} = \frac{m(V_{\text{н}} - V_{\text{о}})}{t_{\text{пл}}},$$

где $t_{\text{пл}}$ – время преодоления пути пластического деформирования при изменении скорости от $V_{\text{н}}$ до $V_{\text{о}}$.

Сила упругого внедрения шара за время $t_{\text{у}}$ составляет: $F_{\text{у}} = mV_{\text{о}}/t_{\text{у}}$.

Сила упругопластического внедрения шара за время изменения скорости от $V_{\text{н}}$ до 0: $F_{\text{упл}} = mV_{\text{н}}/t$.

На основании равенства энергии и работы ударных сил составим систему уравнений:

$A_{упл} = E_{упл} = mV_{н}h/t$; $A_{пл} = E_{пл} = m(V_{н} - V_{о})h_{пл}/t_{пл}$; $A_{у} = E_{у} = mV_{о}h_{у}/t_{у} = mV_{o}^{2}/2$

Подставляя эти значения в уравнение (2) и обозначив $V_{н}=V$, можно получить:

$mV^2/2 = mV/t + E_{п} = m(V - V_{о})\, h_{пл}/t_{пл} + mV_{о}h_{у}/t_{у} + E_{п} = m(V - V_{o})\, h_{пл}/t_{пл} + m V_{o}^{2}/2 + E_{п}$;

$mV^2/2 = mV_{о}h_{у}/t_{у}$; $V_{о}/2 = h_{у}/t_{у}$; $(V - V_{o})\, h_{пл}/t_{пл} + V_{o}h_{у}/2 = Vh/t$ (5)

Используя систему уравнений и подставляя значение уравнения (3), определяем значения энергий, входящих в уравнение (2):

$mV^2/2 = m(V - V_{о})(h - h_{у})/t_{пл} + m V_{o}^{2}/2 + E_{п}$ (6)

Учитывая, что $(mV^2/2 - E_{п})\, t/mV = h$; $h_{у} = V_{о}t_{у}/2 = V_{о}(t - t_{пл})/2$ и, подставляя эти значения в уравнение (6), имеем:

$mV^2/2 = m(V - V_{о})\{[mV^2/2 - E_{п}]t/mV - V_{о}(t - t_{пл})/2\}/t_{пл} + m V_{o}^{2}/2 + E_{п} =$

$= m(V - V_{о})[Vt/2 - E_{п}t/mV - V_{о}t/2 + V_{о}t_{пл}/2]/t_{пл} + m V_{o}^{2}/2 + E_{п}$,

и после преоразований

$E_{п}\, Vt_{пл} - t(V - V_{о})/Vt_{пл}(V - V_{о}) = m[t_{пл}(V + V_{о}) - t(V - V_{о}) - Vt_{пл}]/2t_{пл} =$

$m[Vt_{пл} - t(V - V_{о})]/2t_{пл}$; $E/V(V - V_{о}) = m/2$; $E = mV(V - V_{о})/2$; (7)

Из системы уравнений (5) с учетом уравнений (7) следует:

$E_{упл} = mV^2/2 - mV^2/2 + mVV_{o}/2 = mVV_{o}/2$;

$E_{пл} = E - E_{у} - E_{п} = mV^2/2 - m V_{o}^{2}/2 - mV(V - V_{o})/2$ (8)

$E = mVV_{о}/2 - m V_{o}^{2}/2 = mV_{о}(V - V_{o})/2$ (9)

Используя коэффициент восстановления $K = V_{о}/V_{н}$, полученные значения энергий можно записать в следующем виде:

$E_{у} = K^2 mV^2/2$; $E_{пл} = K(1 - K)\, mV^2/2$; $E_{п} = (1 - K)\, mV^2/2$; $E_{упл} = K\, mV^2/2$

$E_{у} = K^2E$; $E_{пл} = K(1 - K)E$; $E_{упл} = кE$ $E_{п} = (1 - K)E$ (10)

На рис.2 приведены графические зависимости вышеприведенных формул, которые наглядно характеризуют распределение кинетической энергии шара при соударении его с полубесконечным пространством. Из общего количества этой энергии на пластическую деформацию поверхности затрачивается не более 25%, при этом коэффициент восстановления не превышает 0,5.

Общие тепловые потери на нагрев при трении обратнопропорциональны энергии упругопластического деформирования: для малоупругих тел (К<0,5) уменьшение тепловых потерь компенсируется, в большей мере, ростом пластических деформаций, а для упругих тел ($K > 0{,}5$) – в большей мере – за счет роста упругой деформации.

Баланс энергии при ударе шара под углом β о поверхность может быть выражен следующим образом:

$$E = E_{упл} + E_{тр} + E_{у} + E_{п}, \quad (11)$$

где $E_{п}$ – энергия, затрачиваемая на преодоление сил внутреннего трения материала и связанных с этим тепловых потерь при его упругопластической деформации; $E_{тр}$ – работа или энергия, затрачиваемая на преодоление внешних сил трения при ударе.

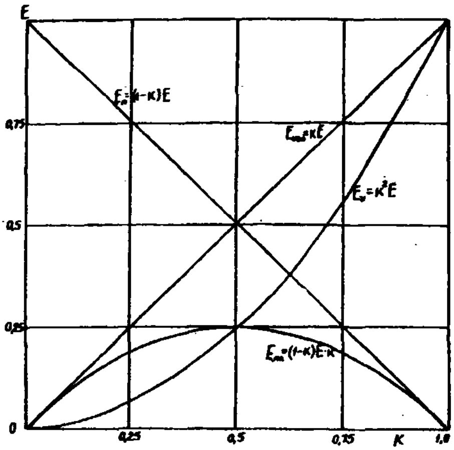

Рис.2 Изменение составляющих энергии удара шара о упругопластическую поверхность в зависимости от коэффициента восстановления К

Считая, что при подлете шара кинетическую энергию можно разделить на два направления – нормальное и тангенциальное к соударяемой поверхности, тогда:

$$E = mV^2/2 = \frac{mV_{\text{Н}}^2}{2} + \frac{mV_{\tau}^2}{2}$$

Для направления, нормального к поверхности:

$$\frac{mV_{\text{Н}}^2}{2} = E_{\text{упл}} + E_{\text{тп}}$$

Энергия упругопластического внедрения $E_{\text{упл}}$ шара определяется аналогично прямому удару по формуле (10), поэтому:

$$\frac{mV_H^2}{2} = \frac{mV_o(V_H - V_o) + mV_o^2}{2} + \frac{mV_H^2}{2}K + E_{\text{тп1}} \qquad (12)$$

Для направления, тангенциального к поверхности:

$$\frac{mV_{\tau}^2}{2} = \frac{m(V_{\tau} - V_{\tau o})}{\tau}X + E_{\text{тп2}} \qquad (13)$$

С учетом того, что путь скольжения шара $X = h\,\mathrm{ctg}\,\beta_1$, а $\tau = 2h/V_o$, решая уравнения (12) и (13) имеем:

$$E_{\text{тп1}} = \frac{mV_H^2}{2}(1 - K);\ E_{\text{тп2}} = \frac{mV_{\tau}(V_{\tau} - V_{\tau o})}{2}.$$

Общая энергия, затрачиваемая на преодоление внутренних сил при сопротивлении материала упругопластическому деформированию в нормальном и тангенциальном направлениях, равна:

$$E_{\text{тп}} = \frac{mV_H^2}{2}\,[(1+K) + K(\text{ctg}\,\beta - \text{ctg}\,\beta_1)].$$

Энергия упругого восстановления материала в тангенциальном направлении:

$$E_y^{\tau} = \frac{mV_{\tau o}^2}{2} = \frac{mV_o^2}{2}\text{ctg}\beta_1 = \frac{mV_H^2}{2} = K^2\text{ctg}\beta_1$$

Потери энергии, связанные с проскальзыванием шара в тангенциальном направлении на пути их преодоления сил внешнего трения, определяются как:

$$E_{\text{ТР}}^{\tau} = \frac{m(V_\tau - V_{\tau o})}{\tau}\;X = \frac{m(V_\tau - V_{\tau o})V_o}{2}\,\text{ctg}\,\beta_1 = \frac{mV_H^2}{2}\;\text{K}(\text{ctg}\,\beta - \text{ctg}\,\beta_1)\,\text{ctg}\,\beta_1$$

Таким образом, энергия шара, соударяемого с поверхностью под углом β с нормальной к этой поверхности скоростью $V_{\text{н}}$ и отлетающего от поверхности под углом β_1 с нормальной скоростью $V_{\text{о}} = K\,V_{\text{н}}$ состоит, согласно формуле (11) из:

$$E_{\text{упл}} = KE;\; E_{\text{п}} = E[(1 - K) + K(\text{ctg}\,\beta - \text{ctg}\,\beta_1)];$$

$$E_y^{\tau} = K^2\,E\text{ctg}\,\beta_1;\; E_{TP}^{\tau} = KE(\text{ctg}\beta - \text{ctg}\beta_1)\,\text{ctg}\,\beta_1 \qquad (14)$$

Учитывая, что при инженерных расчетах глубина пластического внедрения шара в поверхность формирует, при неоднократных ударах, шероховатость этой поверхности, пренебрегая разностьтю углов подлета и отлета (принимая $\beta = \beta_1$), а также выражая скорость подлета шара через нормальную составляющую скорость $V_{\text{н}}$, приведенные формулы могут иметь вид:

$$E_{\text{упл}} = KE;\; E_{\text{п}} = E(1-K)E;\; E_y^{\tau} = K^2\,E\,E\text{ctg}\,\beta_1;\; E_{TP}^{\tau} = \text{K}(1\text{-K})\text{E ctg}^2\,\beta \qquad (15)$$

Эти формулы могут быть выражены через скорость подлета V как:

$$\text{E}_{\text{упл}} = \text{KEsin}^2\beta;\; \text{E}_{\text{п}} = (1 - \text{K})\text{Esin}^2\beta;\; E_y^{\tau} = 0{,}5\text{K}^2\,\text{Esin}2\beta;\; E_{TP}^{\tau} = \text{K}(1\text{-K})\text{E cos}^2\beta \qquad (16)$$

Найденные расчетные значения составляющих энергии удара шара с плоской поверхностью с учетом коэффициента восстановления позволяют рассчитать степень влияния силового и теплового факторов при ударе на формирование таких характеристик качества поверхности, как шероховатость и остаточные напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. – К.: Наукова думка, 1976.– 315 с. 2. М.С.Дрозд, Матлин М.М.,Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. – М.: Машиностроение, 1986. – Машиностроение. – 220 с.