

УДК 621.791.75.042

Бережная Е. В., Турчанин М. А., Малыгина С. В.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКЕ

Восстановление рабочих размеров и свойств изношенных поверхностей деталей машин является более предпочтительным по сравнению с заменой их новыми, так как позволяет существенно сэкономить высококачественный металл, а также энергетические и трудовые ресурсы. Известно, что для восстановления работоспособности изношенных деталей машин необходимо произвести в 5–8 раз меньше технологических операций по сравнению с изготовлением новых деталей [1]. Электроконтактная наплавка компактными материалами (проволоками, лентами) является одним из прогрессивных и эффективных способов восстановления изношенных деталей при незначительных материальных и энергетических затратах [2]. Преимущества этого способа заключаются, в частности, в возможности использования широкого ассортимента присадочных компактных материалов, в возможности восстановления поверхностей с большим интервалом износа и минимальным припуском на последующую механическую обработку наплавленных поверхностей [3]. Кроме того процесс электроконтактной наплавки характеризуется локализованным выделением тепловой энергии, обеспечивающим малую зону термического влияния и отсутствие коробления детали.

Однако практика эксплуатации восстановленных деталей показывает, что их реальный ресурс зачастую оказывается ниже ожидаемого [4]. Это связано с пониженной прочностью сцепления основного металла детали с наплавленным слоем, что приводит к преждевременному разрушению рабочей поверхности и выходу детали из строя. Предварительная обработка поверхности детали является одним из основных факторов, оказывающих существенное влияние на прочность сцепления наплавленного слоя с основным металлом. Сложный механизм образования межмолекулярных связей на границе сплавления приводится в действие рядом процессов, важнейшим из которых является механическое взаимодействие наплавленного слоя с микрорельефом поверхности [5].

Цель работы – исследование влияния шероховатости поверхности, на основные закономерности механического взаимодействия наплавленного слоя с поверхностью детали.

Процесс электроконтактной наплавки представляет собой совокупность кратковременного термического и механического воздействия на наплаваемый материал, что позволяет получить прочное покрытие. При наличии шероховатости на поверхности детали прочность сцепления может значительно возрасти за счет внедрения компактного материала в неровности поверхности. При этом процесс электроконтактной наплавки будет протекать две стадии: внедрение компактного материала в неровности поверхности и оплавление выступов шероховатости, сопровождающееся совместным деформированием рельефа и наплаваемого металла. Для определения глубины внедрения h на первой стадии электроконтактной наплавки компактными материалами необходимо нахождение геометрических координат всей совокупности особых точек по отношению к осям Z и Y , имеющим свое начало на острие выступа, представленного в виде идеализированного неравнобедренного треугольника с углом при вершине $(\alpha_1 + \alpha_2)$. Рассматривая только правую половину этого треугольника, по рекомендациям [6], запишем геометрическое соотношение (рис. 1):

$$Z_{f_1} = \frac{L_{t_n}}{\operatorname{tg} \beta} = (h - L_{t_n}) \cdot \operatorname{tg} \alpha_1, \quad L_{t_n} = \frac{h \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_1 + \frac{1}{\operatorname{tg} \beta}}, \quad (1)$$

где α_1 – угол наклона боковой поверхности выступа, град; β – угол наклона плоскости внедрения компактного материала, град.

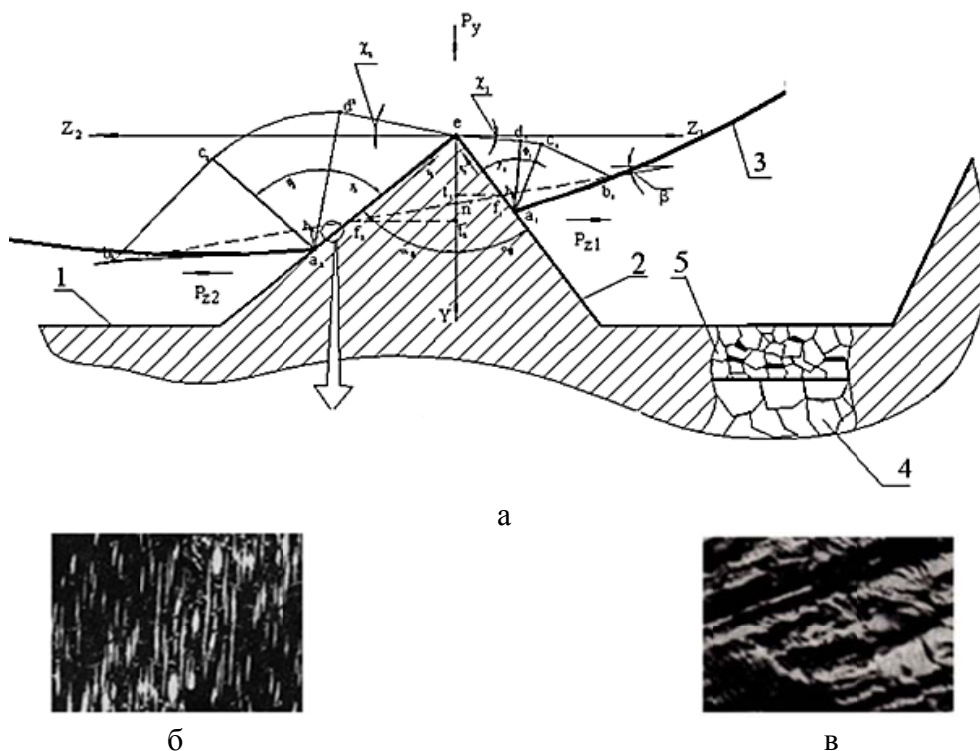


Рис. 1. Расчетная схема механического внедрения компактного материала в неровность поверхности основного металла детали (а), зона образования первоначальных узлов схватывания ($\times 2$) (б) и вид термдеформационного рельефа с поверхности разрушенного образца ($\times 200$) (в):

1 – поверхность металла после механической обработки; 2 – выступ; 3 – компактный материал; 4 – исходный металл; 5 – деформированная под действием режущего инструмента зона

Тогда геометрические координаты точки f_1 :

$$Z_{f_1} = \frac{h \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}{1 + \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \beta}, \quad Y_{f_1} = h - L_{f_1 n} = h \cdot \left[1 - \frac{\operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \beta}{1 + \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \beta} \right], \quad F_{\Delta en f_1} = h \cdot \frac{Z_{f_1}}{2}, \quad (2)$$

Протяженность отрезка $L_{f_1 a_1}$ мала, поэтому геометрические координаты точки a_1 :

$$Z_{a_1} = Z_{f_1} + L_{f_1 a_1} \cdot \sin \alpha_1; \quad Y_{a_1} = Y_{f_1} + L_{f_1 a_1} \cdot \cos \alpha_1. \quad (3)$$

Тогда высота треугольника $\Delta b_1 f_1 a_1$:

$$L_{h a_1} = L_{f_1 a_1} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1 + \beta \right), \quad (4)$$

откуда из условия равенства площадей треугольников $\Delta b_1 f_1 a_1$ и $\Delta en f_1$ протяженность отрезка $b_1 f_1$, а вместе с ней и геометрические координаты точки b_1 могут быть определены как:

$$L_{f_1 b_1} = \frac{2 \cdot F_{\Delta en f_1}}{L_{h a_1}}; \quad Z_{b_1} = Z_{f_1} + L_{f_1 b_1} \cdot \cos \beta; \quad Y_{b_1} = Y_{f_1} - L_{f_1 b_1} \cdot \sin \beta \quad (5)$$

Учитывая свойства линий скольжения [6], угловые характеристики треугольника $\Delta b_1 c_1 a_1 f_1$ равны $\angle b_1 c_1 a_1 = \pi/2$; $\angle c_1 a_1 b_1 = \angle a_1 b_1 c_1 = \pi/4$, а протяженность гипотенузы $a_1 b_1$ равна:

$$L_{a_1b_1} = \sqrt{(Z_{b_1} - Z_{a_1})^2 + (Y_{a_1} - Y_{b_1})^2}. \quad (6)$$

Количественные оценки катетов c_1a_1 и c_1b_1 :

$$L_{c_1a_1} = L_{c_1b_1} = L_{b_1a_1} / \sqrt{2}. \quad (7)$$

Поскольку угол подхода гипотенузы a_1b_1 к горизонтали равен $\arctg \left[\frac{(Y_{a_1} - Y_{b_1})}{(Z_{b_1} - Z_{a_1})} \right]$, геометрические координаты точки c_1 составят:

$$Z_{c_1} = Z_{b_1} - L_{c_1b_1} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{4} - \arctg \left[\frac{(Y_{a_1} - Y_{b_1})}{(Z_{b_1} - Z_{a_1})} \right] \right\}, \quad (8)$$

$$Y_{c_1} = Y_{b_1} - L_{c_1b_1} \cdot \sin \left\{ \frac{\pi}{4} - \arctg \left[\frac{(Y_{a_1} - Y_{b_1})}{(Z_{b_1} - Z_{a_1})} \right] \right\}. \quad (9)$$

В точке a_1 линии характеристик c_1a_1 и d_1a_1 образуют центрированный веер с углом φ_1 . Учитывая, что $L_{d_1a_1} = L_{c_1a_1}$, геометрические координаты точки d_1 :

$$Z_{d_1} = Z_{a_1} + L_{d_1a_1} \sin(\gamma_1 - \alpha_1); \quad Y_{d_1} = Y_{a_1} - L_{d_1a_1} \cos(\gamma_1 - \alpha_1). \quad (10)$$

Поскольку $L_{ed_1} = L_{d_1a_1} \cdot \tg \gamma_1$, угол подхода отрезка к горизонтали $\chi_1 = \pi/2 - \alpha_1 - (\pi/2 - \gamma_1) = \gamma_1 - \alpha_1$ расчетные значения геометрических координат точки e :

$$Z_{e\text{-расч}} = X_{d_1} - L_{ed_1} \cdot \cos(\gamma_1 - \alpha_1); \quad Y_{e\text{-расч}} = Y_{d_1} - L_{ed_1} \cdot \sin(\gamma_1 - \alpha_1) \quad (11),$$

где расчетные значения $Z_{e\text{ расч}}$ и $Y_{e\text{ расч}}$, согласно принятой расчетной схеме (см. рис. 1), должны соответствовать началу координат, т. е. должны быть равны нулю. Выполнение данного условия может быть обеспечено, согласно [6], на основе организации дополнительной итерационной процедуры определения требуемой протяженности отрезка f_1a_1 с использованием, например, метода целенаправленного перебора вариантов:

$$L_{f_1a_1}(k+1) = L_{f_1a_1}(k) - A_L \cdot \text{sign } Y_{e\text{-расч}}(k), \quad (12)$$

где k - порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры решения;

A_L - шаг изменения протяженности отрезка f_1a_1 ;

$\text{sign } Y_{e\text{-расч}}$ - функция знака соответствующая знаку расчетной геометрической координаты точки e . При выполнении условия $Y_{e\text{-расч}} \approx 0$ искомая угловая характеристика φ_1 :

$$\varphi_1 = \arctg \frac{Z_{c_1} - Z_{a_1}}{Y_{a_1} - Y_{c_1}} - \arctg \frac{Z_{d_1} - Z_{a_1}}{Y_{a_1} - Y_{d_1}}. \quad (13)$$

С учетом этого гидростатическое напряжение σ_e в точке e , а вместе с этим и нормальное напряжение σ_{ye1} , и приведенное к единице ширины значение усилия наплавки P_{Y1} , составят соответственно:

$$\sigma_{ze1} = K_c + 2K_c \cdot \varphi_1 = K_c(1 + 2\varphi_1); \quad \sigma_{ye1} = \sigma_{ze1} + K_c \cdot \sin 2\varphi_1; \quad P_{Y1} = \sigma_{ye1} \cdot Z_{a_1} + \tau_1 \cdot Y_{a_1}. \quad (14)$$

Аналогично были найдены геометрические координаты особых точек для левой половины неравнобедренного треугольника, представляющего идеализированный выступ. Предварительная механическая обработка поверхности режущим инструментом позволяет получить микрорельеф в виде чередующихся выступов и впадин, имеющих сравнительно упорядоченное строение. На основании результатов построенной математической модели был проведен анализ процесса внедрения компактного материала в неровности поверхности с использованием метода конечных элементов в его программной реализации в пакете Abaqus (рис. 2).

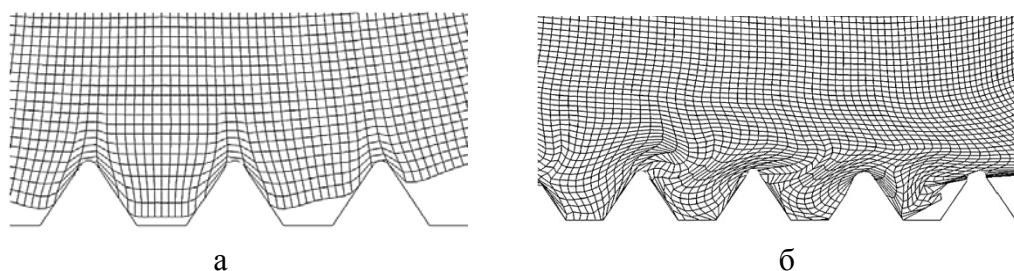


Рис. 2. Поэтапное моделирование полного физического контакта наплавленного слоя с микрорельефом поверхности детали и вид конечных элементов на начальном этапе формирования контакта (а) и на этапе полного физического контакта (б)

Исходными данными для моделирования процесса служили: соотношение геометрических характеристик наплаваемого металла и шероховатости поверхности детали, материал и механические свойства. Как и высокая температура, давление, возникающее в зоне контакта компактного материала с микрорельефом поверхности под действием усилия на ролико-электроде, является движущей силой физико-химического взаимодействия. При этом компактный материал внедряется в неровности рельефа, разогревает выступы за счет выделения тепловой энергии при протекании тока в зоне контакта, и происходит совместная упругопластическая деформация соединяемых материалов, которая сопровождается эффектом сдвига по плоскости контакта с последующим сплавлением контактирующих материалов.

ВЫВОДЫ

Процесс внедрения компактного материала в неровности поверхности является необходимым условием для создания полного физического контакта материалов, а также служит источником значительного количества дополнительной тепловой энергии на стадии оплавления выступов микрорельефа, необходимой для активации взаимодействующих поверхностей, а благодаря своей локализации практически не оказывает существенного воздействия на макрообъемы соединяемых металлов. Полученные зависимости позволяют изучить механизм образования физического контакта между взаимодействующими металлами и управлять качеством наплавленного слоя за счет оптимизации рельефа поверхности и силовых параметров процесса электроконтактной наплавки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Схиртладзе А. Г. Расчет эффективности восстановления изношенных деталей / А. Г. Схиртладзе // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2004. – № 2. – С. 2–4.
2. Черноиванов В. И. Восстановление деталей машин / В. И. Черноиванов – М. : ГОСНИТИ, 1995. – 278 с.
3. Нафиков М. З. Электроконтактная наплавка – эффективный способ восстановления валов / М. З. Нафиков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 11. – С. 21–24.
4. Бережная Е. В. Технично-экономические преимущества электроконтактной наплавки режущего инструмента / Е. В. Бережная, М. А. Турчанин, С. В. Малыгина // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – № 32. – С. 198–202.
5. Гончаров В. Д. Оптимизация микрорельефа поверхности с целью повышения прочности сцепления покрытия с основой / В. Д. Гончаров, Д. В. Перишина // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2013. – Вип. 8. – С. 30–38.
6. Соколовский В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский – М. : Высшая школа, 1968. – 608 с.