

УДК 621.9.048.6

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

*д-р техн. наук О.Г. ДЕВОЙНО, канд. техн. наук С.Ф. КУКИН, А.А. БАРКУН, А.М. КАЛЕНИК
(РУП «Минский тракторный завод»)*

Рассмотрены принципы формирования микрорельефа поверхности при лазерно-ультразвуковой обработке цилиндрических поверхностей деталей. Приводится метод расчета параметров процесса, обеспечивающих получение необходимых характеристик упрочненного слоя и микрогеометрии поверхности.

Процессы лазерного поверхностного термоупрочнения наружных цилиндрических поверхностей деталей традиционно производят по следующей схеме [1]: лазерный луч фокусируют на обрабатываемую поверхность в пятно требуемого диаметра (как правило, 2...5 мм), одновременно вращая деталь и перемещая лазерный луч по образующей. Лазерная обработка цилиндрической поверхности идет по винтовой линии. Наиболее экономично производить обработку без перекрытия дорожек, располагая их рядом без зазора. При такой обработке без оплавления обрабатываемой поверхности исходная ее шероховатость не изменяется, а только в направлении образующей профиль поверхности приобретает некоторую волнистость [2]. Обработка с некоторым незначительным оплавлением позволяет получить большую глубину упрочненного слоя, однако увеличивается шероховатость поверхности в зоне следа лазерной обработки и высота волнистости профиля. Поэтому при сплошной лазерной обработке профиль упрочненной поверхности условно имеет вид, представленный на рис. 1.

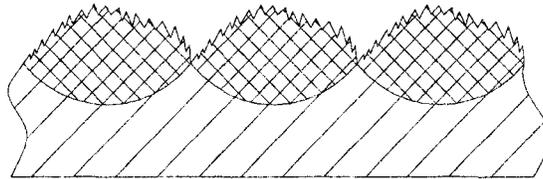


Рис. 1. Профиль упрочненной поверхности, получаемый лазерным термоупрочнением при сплошной обработке без перекрытия следов лазерной обработки

Характер изменения высоты волнистости профиля и глубины термоупрочненного слоя от скорости обработки приведен на рис. 2 [2].

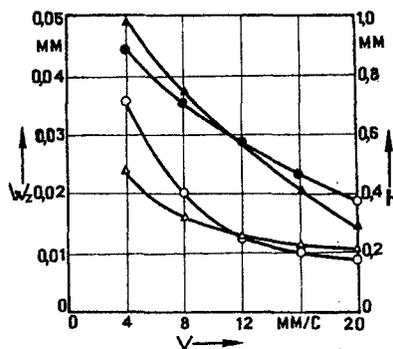


Рис. 2. Зависимость высоты волнистости (W_z) профиля поверхности, глубины термоупрочненного слоя (h) от скорости обработки (V):
▲△ – чугуны СЧ 20; ●○ – сталь 45; ○ △ – $W_z(V)$; ● ▲ – $h(V)$

Использование лазерного термоупрочнения без последующей финишной обработки существенно снижает опорную поверхность при работе ее в контакте с другой поверхностью в узлах трения. Поэтому, как правило, в большинстве случаев требуется последующая шлифовка с целью снижения наводимой лазерной обработкой шероховатости и волнистости профиля.

Однако шлифование приводит к снятию слоя определенной толщины, что снижает толщину первоначально полученного термоупрочненного слоя, а при обработке без перекрытия следов лазерной обработки после шлифования возможно образование промежутков с неупрочненными зонами.

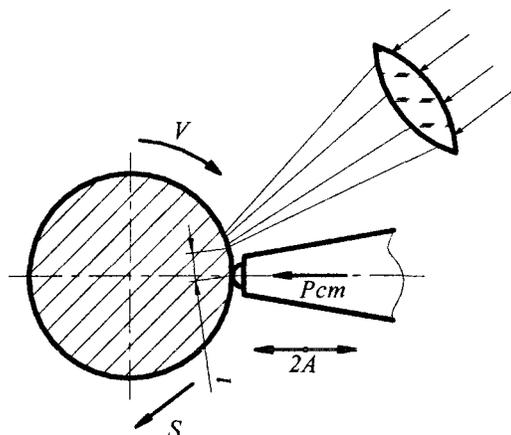


Рис. 3. Схема комбинированной лазерно-ультразвуковой обработки

Комбинированное лазерно-ультразвуковое упрочнение является высокопроизводительным способом обработки деталей машин и аппаратов с упрочняющим эффектом на финишной операции. Отличительной особенностью данного процесса является то, что ввод ультразвукового инструмента для высокоскоростной деформации осуществляется в неостывшую после лазерного воздействия зону упрочнения [3]. При оптимальном расстоянии I (рис. 3) от точки контакта ультразвукового инструмента до точки облучения существует максимальный прирост микротвердости упрочненного слоя и снижение высоты микронеровностей обработанной поверхности.

Наиболее целесообразным с практической точки зрения является схема ультразвукового воздействия за пятном лазерного луча в зоне следа лазерной обработки, где температура на поверхности снижается до 400...600 °С [4], а высокоскоростную деформацию

производить роликовым ультразвуковым инструментом за один проход синхронно с движением лазерного луча (рис. 4) [5].

Данные особенности ультразвукового воздействия на зону термического влияния от пятна лазерного луча требуют расчета распределения температурных полей по ширине и вдоль следа лазерной обработки от движущегося пятна лазерного луча, так как ширина зоны пластического деформирования ультразвуковым инструментом должна совпадать с шириной зоны термоупрочнения, а центр силового контакта ультразвукового инструмента должен находиться в температурной зоне 400...600 °С за пятном лазерного луча. При таком воздействии ультразвукового инструмента обеспечивается получение микрорельефа поверхности, представленного на рис. 5.

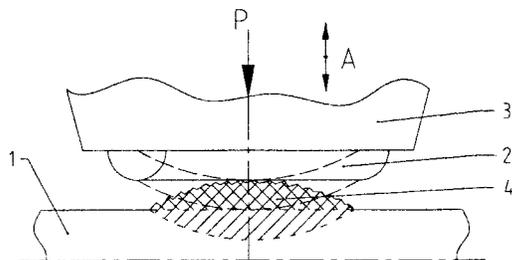


Рис. 4. Схема ультразвукового поверхностно-пластического деформирования следа лазерной обработки цилиндрическим индентором:

1 - деталь; 2 - индентор; 3 - концентратор; 4 - зона лазерного упрочнения, подвергаемая ультразвуковому ППД

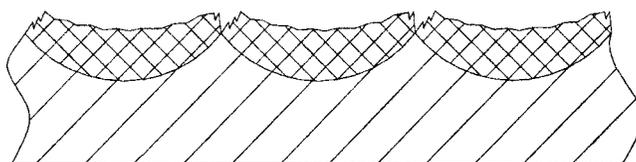


Рис. 5. Профиль упрочненной поверхности, получаемый лазерно-ультразвуковой обработкой цилиндрическим ультразвуковым инструментом

В движущейся системе координат математическая формулировка задачи нагрева полуограниченного тела поверхностным нормально распределенным тепловым источником, движущимся в положительном направлении оси X с постоянной скоростью V , имеет вид [6]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{v}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_0 \exp[-k(x^2 + y^2)] \quad (1)$$

$$T(\infty, y, z, t) = T(x, \infty, z, t) = T(x, y, \infty, t) = T(x, y, z, 0) = T_0$$

$$-\infty < x < +\infty, -\infty < y < +\infty, 0 \leq z < \infty, t \geq 0,$$

где T – температура, К; x, y, z – пространственные координаты, мм; t – время, с; q_0 – плотность потока энергии, поглощенной телом; r, λ, α – соответственно коэффициенты сосредоточенности, теплопроводности, температуропроводности; T_0 – начальная температура.

Фазовые переходы и потери тепла с поверхности не рассматриваются. Решение задачи (1) имеет вид [7]:

$$T(x, y, z, t) = \frac{P \times \eta}{r \cdot \lambda \cdot \pi^{3/2}} \cdot \int_0^t \frac{\exp \left[\frac{y^2 + (x+vt)^2 - z^2}{4 \left(at + \frac{r^2}{4} \right)} \right]}{\left(at + \frac{r^2}{4} \right) \sqrt{t}} \cdot dt, \tag{2}$$

где T – температура, град; x, y, z – пространственные координаты процесса, мм; t – время взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемой поверхностью, с; P – мощность лазерного излучения, Вт; r – радиус пятна лазерного луча, мм; v – скорость движения пятна лазерного луча по обрабатываемой поверхности, мм/с; η – коэффициент поглощения лазерного излучения; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/мм·град; a – коэффициент температуропроводности, мм²/с.

Данное уравнение интегрируется отдельно по координатам x, y, z с помощью встроенных в MathCAD 2000 функций интегрирования для текущего значения t . Зависимости для расчета распределения температуры по ширине и вдоль следа лазерной обработки представлены соответственно выражениями (3) и (4):

$$T(y) = \frac{P\eta \int_0^t \frac{\exp \left[\frac{-y^2 - v^2 t^2}{4 \left(at + \frac{r^2}{4} \right)} \right]}{\left(at + \frac{r^2}{4} \right)} dt}{r\lambda\pi^{\frac{3}{2}}}; \tag{3}$$

$$T(x) = \frac{P\eta \int_0^t \frac{\exp \left[\frac{-(x+vt)^2}{4 \left(at + \frac{r^2}{4} \right)} \right]}{\left(at + \frac{r^2}{4} \right) \sqrt{t}} dt}{r\lambda\pi^{\frac{3}{2}}}. \tag{4}$$

Графическое построение зависимостей по выражениям (3) и (4) также выполняется с помощью MathCAD 2000 посредством формирования векторов соответствующих данных (рис. 6, а, б).

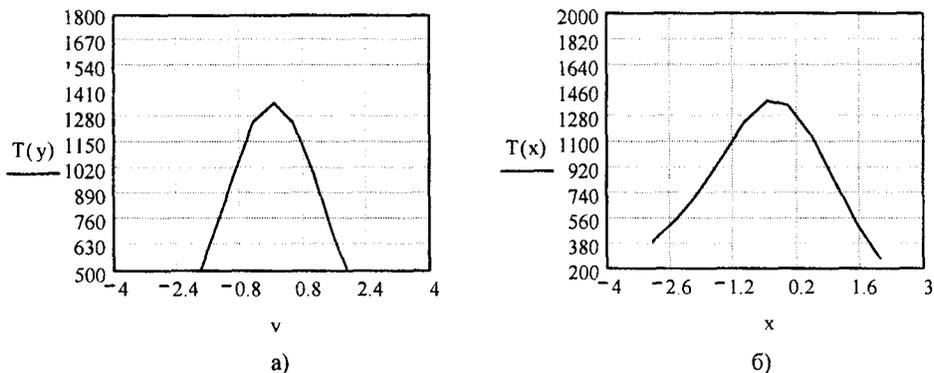


Рис. 1. Распределение температуры по ширине (а) и вдоль (б) следа лазерной обработки для следующих параметров лазерной обработки:

материал – сталь 45; $r = 1,5$ мм; $a = 13$ мм²/с; $v = 16$ мм/с; $\lambda = 0,05$ Вт/мм·град; $P = 1000$ Вт; $\eta = 0,75$; $t = 2 \cdot r/v$

Для указанных на рис. 6 режимов лазерной обработки ширина следа пластической деформации ультразвуковым инструментом должна составлять 1,6...1,8 мм (для стали 45 $T_{зак} = 1000$ °С), а центр силового воздействия ультразвукового инструмента должен отстоять от центра пятна лазерного луча на расстоянии примерно 2,6 мм. Изменяя параметры лазерной обработки (мощность лазерного излучения,

радиус пятна лазерного луча, скорость движения пятна лазерного луча по обрабатываемой поверхности), можно получить такое распределение температуры по ширине и вдоль следа лазерной обработки, что оно совпадет с требуемым результатом ультразвуковой обработки, который регулируется такими параметрами, как профильный радиус контактной поверхности ультразвукового инструмента, усилие статического прижима и амплитуда ультразвуковых колебаний рабочей поверхности инструмента.

На практике процесс выбора оптимального режима лазерно-ультразвуковой обработки состоит в следующем. Вначале оптимизируются параметры ультразвуковой обработки посредством получения требуемой ширины следа от поверхностно-пластического деформирования ультразвуковым инструментом при твердости, шероховатости поверхности как после лазерного термоупрочнения и на скорости процесса лазерной обработки. Далее, изменяя мощность лазерного излучения P и радиус пятна лазерного луча r , добиваются такого распределения температуры по ширине следа лазерной обработки, чтобы ширина зоны термоупрочнения соответствовала ширине следа поверхностно-пластического деформирования ультразвуковым инструментом. После чего при этих же режимах лазерной обработки рассчитывают распределение температуры вдоль следа лазерной обработки, чтобы определить на каком расстоянии от центра пятна лазерного луча производить ввод ультразвукового инструмента для высокоскоростного деформирования следа лазерной обработки.

Таким образом, формирование требуемого микрорельефа поверхности при лазерно-ультразвуковой обработке достигается предварительной оптимизацией параметров процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1989. - 118 с.
2. Кукин С.Ф. Технология лазерного термоупрочнения поверхностей цилиндрических деталей: Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Мн.: БПИ, 1988.
3. Муханов И.И., Синдеев В.И. Упрочняюще-чистовая обработка стальных деталей лучом лазера и ультразвуковым инструментом // Новые методы упрочнения и обработки материалов. - Новосибирск: НЭТИ, 1979.
4. Kukin S.F. Influence of combined laser-ultrasonic treatment on tribotechnical characteristics of hardened surfaces // Laser technologies in welding and material processing: Proceedings of international conference / E.O. Paton electric welding institute, NASU. - Kiev, 2003.
5. Кукин С.Ф. Технологические особенности лазерно-ультразвукового воздействия в процессах поверхностного упрочнения наружных цилиндрических поверхностей деталей // Лазерные технологии и средства их реализации: Материалы IV междунар. науч.-техн. конф. - СПб.: СПбГПУ, 2004.
6. Углов А.А., Смурув И.Ю., Андрианов С.С. К расчету температурных полей от движущихся концентрированных источников энергии // Физика и химия обработки материалов. - 1983. - № 1. - С. 35 - 43.
7. Кукин С.Ф. Особенности расчета тепловых полей при лазерно-ультразвуковом упрочнении металлических поверхностей // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Материалы 2-й междунар. науч.-техн. конф., Кацивели (Украина), 11-19 сентября 2004 г. - Кацивели, 2004.