



Сивак Р. И.

Музычук В. И.

*Винницький  
національний  
аграрний  
університет*

УДК 621.73.011

## УЛУЧШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВОЛОКИ ПУТЕМ ВИБРООБРАБОТКИ

*Предложена методика оценки использованного ресурса пластичности поверхностного слоя проволоки при немонокотонной поверхностной пластической деформации.*

*The technique of an estimation of the used resource of plasticity of a superficial layer of a wire is offered at not monotonous superficial plastic deformation.*

Технологические возможности вибрационной обработки зависят от геометрических и механических характеристик элементов рабочей среды и определяются особенностями взаимодействия рабочей среды с поверхностью обрабатываемой детали. Нами исследован процесс улучшения механических характеристик проволоки путем поверхностной пластической деформации, которая обусловлена множеством ударов стальных закаленных шариков. Удары вызваны совместным действием вибраций, сообщаемых рабочей камере и ее перемещений на рабочую среду и обрабатываемые детали.

Поверхностная пластическая деформация позволяет получить поверхностный слой с необходимыми физико-механическими характеристиками и оптимальным рельефом. Однако, степень пластической деформации поверхностного слоя ограничена. Это обусловлено тем, что при пластической деформации наряду с упрочнением поверхностного слоя идут процессы накопления повреждений. С увеличением степени пластической деформации интенсивность упрочнения уменьшается, а интенсивность накопления повреждений возрастает и наступает момент, когда последняя начинает существенно превышать интенсивность упрочнения. Степень деформации при которой начинается интенсивное пластическое разрыхление существенно зависит от механических характеристик материала обрабатываемой детали и от истории нагружения, которая определяется параметрами процесса. Для количественной оценки величины предельного значения степени деформации в последнее время широко применяются методы теории деформируемости [1,2,3]. В работе [4] показано, что необратимые, термодинамически

устойчивые дефекты в пластически деформируемом металле возникают при значениях использованного ресурса пластичности, превышающих 0,3...0,4.

Выполненные нами исследования показали, что для обеспечения необходимого качества поверхностного слоя, в зависимости от служебного назначения детали, можно допустить пластическую деформацию, при которой использованный ресурс пластичности поверхностного слоя составит  $\psi=0,5...0,6$ . В последнее время установлено, что зародыши макротрещин появляются при  $\psi=0,85...0,95$ .

В данной работе предложена методика оценки допустимого значения степени деформации поверхностного слоя, основанная на методах теории деформируемости. История деформирования задается траекториями в пространстве степени деформации  $e_u$ , показателя жесткости напряженного состояния  $\eta$  и параметра Надаи-Лоде  $\mu_\sigma$  [5]

$$e_u = \int_0^t \dot{\epsilon}_u dt \quad (1)$$

$$\eta = 3\sigma / \sigma_u \quad (2)$$

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (3)$$

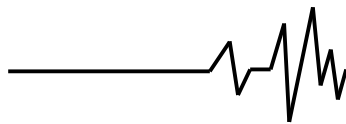
Где  $\dot{\epsilon}_u$  – интенсивность скоростей деформаций;

$t$  – время деформирования;

$\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$  – среднее напряжение;

$\sigma_u$  – интенсивность напряжений;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения.



Так как в рассматриваемом случае пластическая деформация реализуется с многократными разгрузками, то оценку величины использованного ресурса пластичности выполняли по критерию [6], который описывает процесс накопления повреждений при немонотонной пластической деформации

$$\Psi_k = \Psi_{(k-1)}^2 \exp\left(c \int_{e_u^{(k-1)}}^{e_u^{(k)}} \frac{\eta de_u}{|\eta| e_p(\eta, \mu_\sigma)}\right) +$$

$$+ \sqrt{\Psi_{ij}^{(k)} \Psi_{ij}^{(k)}}$$

где  $k$  – номер этапа деформирования;  $\Psi_{(k-1)}$  – использованный ресурс пластичности на предыдущем этапе пластической деформации;  $e_u^{(k-1)}$  – степень деформации на предыдущем этапе;  $e_u^{(k)}$  – степень деформации на данном этапе;

$$\Psi_{ij}^{(k)} = \int_{e_u^{(k-1)}}^{e_u^{(k)}} \left(1 - a + 2a \frac{e_u(\eta, \mu_\sigma)}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}\right) \beta_{ij}^{(k)} \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}$$

– компоненты тензора повреждений на  $k$ -ом этапе.

Нами выполнены исследования для стали 10, поверхность предельных деформаций для которой получена в работе [6] и описывается зависимостью

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = \frac{0,68e^{-0,91\eta}}{1 - 0,278\mu_\sigma - 0,072\mu_\sigma^2} \quad (5)$$

Для определения траекторий нагружения  $e_u(\eta, \mu_\sigma)$  на каждом этапе, напряженно-деформированное состояние в зоне контакта определяли по методике Г.А. Смирнова-Аляева [7]. В этой работе получено приближенное решение краевой задачи теории пластичности при внедрении сферического тела в тело с бесконечными размерами. При этом сделаны допущения, что компоненты тензора напряжений зависят только от координат  $\rho$  и  $\varphi$  (рис. 1) и выполняется равенство  $\sigma_\varphi = \sigma_\theta$ .

Тогда уравнения равновесия в сферической системе координат имеют вид

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial \varphi} + \frac{2}{\rho} (\sigma_\rho - \sigma_\varphi) + \frac{1}{\rho} \tau \operatorname{ctg} \varphi = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{3}{\rho} \tau = 0. \quad (7)$$

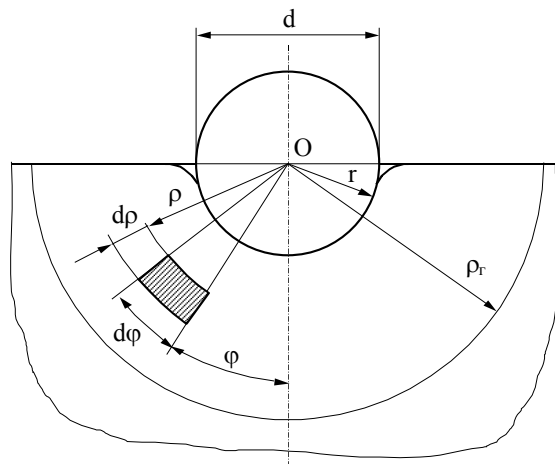


Рис. 1. Расчетная схема

Условие пластичности при принятых допущениях принимает вид

$$\sigma_\rho - \sigma_\varphi = \sigma_u \sqrt{1 - 3 \left(\frac{\tau}{\sigma_u}\right)^2} \quad (8)$$

В системе уравнений (6), (7), (8) число искомых величин равно числу уравнений, однако, решить эти уравнения без дополнительных условий невозможно. Поэтому принято еще одно допущение, что интенсивность напряжений  $\sigma_u$  и степень деформации  $e_u$  зависят только от координаты  $\rho$ . При принятых допущениях решение системы (6), (7), (8) имеет вид

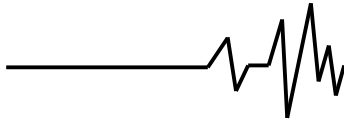
$$\tau = 1,57 \sigma_u \varphi \exp(-\varphi) \left( \frac{a}{\frac{\rho}{r} - b} + c \right),$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  постоянные, которые определяются из граничных условий и приняты равными  $a = -2,5$ ;  $b = 0$ ;  $c = 1,5$ .

$$\sigma_\varphi = \frac{2}{3} \sigma_\tau + (\varphi \exp(-\varphi) +$$

$$+ \exp(-\varphi) - 1) \cdot \left\{ 4,71 \left( \mu - u \frac{\rho}{r} \right) \left( \frac{a}{\frac{\rho}{r} - b} + c \right) + \right.$$

$$\left. + 1,57 \frac{\rho}{r} \left[ \frac{a(ub - \mu)}{\left(\frac{\rho}{r} - b\right)^2} - uc \right] \right\} +$$



$$\begin{aligned}
 &+3,14(I_{11} - I_1) + 2\mu \ln \frac{\rho_2}{\rho} - 2u \left( \frac{\rho_2}{r} - \frac{\rho}{r} \right) - \\
 &\left( \mu - u \frac{\rho}{r} \right) \\
 \sigma_p = &\frac{2}{3} \sigma_T + (\varphi \exp(-\varphi) + \\
 &\exp(-\varphi) - 1) \cdot \left\{ 4,71 \left( \mu - u \frac{\rho}{r} \right) \left( \frac{a}{r} + c \right) + \right. \\
 &\left. + 1,57 \frac{\rho}{r} \left[ \frac{a(ub - \mu)}{\left( \frac{\rho}{r} - b \right)^2} - uc \right] \right\} + \\
 &+3,14(I_{11} - I_1) + 2\mu \ln \frac{\rho_2}{\rho} - 2u \left( \frac{\rho}{r} - \frac{\rho}{r} \right) - \\
 &\left( \mu - u \frac{\rho}{r} \right) + \left( \eta - u \frac{\rho}{r} \right) [1 - \\
 &- 7,39 \varphi^2 \exp(-2\varphi) \left( \frac{a}{r} + c \right)^2]
 \end{aligned}$$

где

$$I_{11} - I_1 = a\mu \frac{\frac{\rho_2}{r} - \frac{\rho}{r}}{\frac{\rho_2}{r} \frac{\rho}{r}} + (c\mu - au) \ln \frac{\rho_2}{\rho} -$$

$$-cu \left( \frac{\rho_2}{r} - \frac{\rho}{r} \right)$$

$\sigma_u = \sigma_{u0} - C \exp(-e_u)$  – аппроксимация кривой течения,

$$\mu = \sigma_{u0} - \frac{C \left( \frac{\rho_2}{\rho} - \exp(e'_u) \right)}{\exp(e'_u) \left( \frac{\rho}{r} - 1 \right)},$$

$$u = C \frac{\exp(e'_u) - 1}{\exp(e'_u) \left( \frac{\rho}{r} - 1 \right)}, \quad (e'_u) \text{ – среднее}$$

значение  $e_u$  на внутренней поверхности зоны пластической деформации ( $\rho=r$ ).

Так как глубина внедрения шарика при ударе небольшая, а вероятность того, что шарик будет постоянно попадать в одну и ту же лунку – мала, то пренебрегали изменением рельефа поверхности, обусловленного ударами шариков. Для учета упрочнения, обусловленного многократными ударами шариков, использовали кривую течения стали 10.

Расчет использованного ресурса пластичности по критерию (4) показал, что наибольшая степень деформации  $e_u$ , а значит и оптимальное значение упрочнения можно достичь при условии, когда остаточная глубина лунки при ударе составляет порядка 0,06d, а число ударов не превышает 15-20. Однако этот результат не точен, так как решение краевой задачи получено для плоского полупространства и при решении принят ряд упрощающих допущений, а ошибка, обусловленная этими допущениями, не оценивалась. Не смотря на это, данный подход можно считать перспективным для оптимизации процессов ППД.

#### Литература

1. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.
2. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – Киев: Высшая школа, 1983. – 175 с.
3. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1970. – 229 с.
4. Богатов А. А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – М. : Металлургия, 1984. – 144 с.
5. Сивак И. О. Поверхность предельной пластичности / И. О. Сивак // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії. – Краматорськ: Донбаська державна машинобудівна академія. – 1999. – С. 9–15.
6. Сивак И. О. Деформируемость заготовок при радиальном выдавливании с контурной осадкой / И. О. Сивак, Р. И. Сивак, И. С. Алиев // Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. – Тула: Тульский государственный университет. – 2000. – С. 278–284.
7. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г. А. Смирнов-Аляев. – Ленинград : Машиностроение, 1978. – 368 с.