

Деревенько И. А.

*Винницкий  
национальный  
аграрный  
университет*

Derevenko I. A.

*Vinnitsia National  
Agrarian University*

УДК 539.374: 621.73

## СХЕМА НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОМ СЛОЕ

**Аннотация.** Пластическая деформация поверхностного слоя проволоки при вибрационной обработке стальными закалёнными шариками, кроме упрочнения этого слоя, позволяет получить благоприятную схему напряжённого состояния, обусловленную сжимающими остаточными напряжениями, а также минимальное использование запаса пластичности. Получены закономерности распределения показателей напряжённого состояния по глубине пластически деформированного поверхностного слоя проволоки при вибрационной обработке этого слоя стальными закалёнными шариками. Установлено, что в поверхностном слое имеет место схема всестороннего неравномерного сжатия.

**Ключевые слова:** напряжённое состояние, пластическая деформация, вибрационная обработка, поверхностный слой.

**Введение.** Повышение долговечности изделий, их эффективности и конкурентоспособности на мировом рынке представляет одну из важнейших задач современного машиностроения. Состояние поверхностного слоя – это один из важнейших показателей качества изделий [1].

Одним из методов повышения долговечности изделий из проволоки является метод поверхностного пластического деформирования. Поверхностная пластическая деформация позволяет получать поверхностный слой с необходимыми физико-механическими характеристиками, при условии, что степень пластической деформации в поверхностном слое не превышает определённого значения, которое зависит от величины использованного ресурса пластичности [2]. Кроме того, на долговечность изделий из проволоки, которые работают в условиях знакопеременных нагрузок, большое влияние оказывает схема напряжённого состояния, которая определяется уровнем и законом распределения остаточных напряжений в поверхностном, пластически деформированном слое.

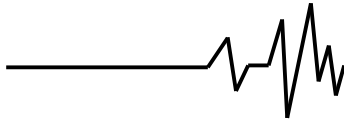
Для определения схемы напряжённого состояния в пластически деформированном

слое, который получается в результате поверхностной пластической деформации, обусловленной множеством ударов стальных закалённых шариков при вибрационной обработке [2], в данной работе использован экспериментально-расчётный метод определения остаточных напряжений в этом слое [3].

**Целью исследований является** получение закономерности распределения показателей напряжённого состояния по глубине пластически деформированного поверхностного слоя проволоки при вибрационной обработке этого слоя стальными закалёнными шариками.

Предполагается, что остаточные касательные напряжения очень малы, а закон распределения нормальных напряжений  $\sigma_{\varphi}$  в поверхностном слое определён экспериментально [4]. Задача определения остаточных напряжений  $\sigma_r^0(r)$  и  $\sigma_z^0(r)$ , а также остаточных пластических деформаций при условии, что закон изменения  $\sigma_{\varphi}(r)$  известен из эксперимента, решается следующим путём [3].

Дифференциальное уравнение равновесия при отсутствии касательных напряжений имеет вид



$$\frac{\partial \sigma_r^0}{\partial r} + \frac{\sigma_r^0 - \sigma_\phi^0}{r} = 0. \quad (1)$$

Из условия, что эпюра напряжений  $\sigma_\phi^0(r)$  должна быть самоуравновешенной следует

$$\int_0^a \sigma_\phi^0(r) dr = \int_0^a \frac{d}{dr} (r\sigma_r^0(r)) = 0, \quad (2)$$

где  $a$  – радиус проволоки.

Из (1) и (2) находим

$$\sigma_r^0(r) = \frac{1}{r} \int_0^r \sigma_\phi^0(x) dx. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет определить  $\sigma_r^0(r)$  по экспериментально полученным зависимостям  $\sigma_\phi^0(r)$ .

Значения  $\sigma_z^0(r)$  могут быть вычислены через остаточные пластические деформации [3], приобретённые в результате поверхностного упрочнения. Представим компоненты тензора полной деформации в виде суммы

$$\varepsilon_i^0 = e_i^0 + q_i, \quad (i = \overline{r, \phi, z}), \quad (4)$$

где  $e_i^0$  – компоненты тензора упругих деформаций,

$q_i$  – компоненты тензора пластических деформаций.

Если упрочнение поверхностного слоя проволоки получено путём многочисленных ударов стальных закалённых шариков (радиус шарика значительно меньше радиуса проволоки), то пластические деформации будут такими же, как и в полупространстве [2], т.е. выполняется равенство

$$q_\phi = q_z. \quad (5)$$

Учитывая условие несжимаемости, находим

$$q_\phi = q_z = -\frac{q_r}{2}. \quad (6)$$

Подставляя в уравнение совместности деформаций

$$r \frac{d\varepsilon_\phi^0}{dr} + \varepsilon_\phi^0 = \varepsilon_r^0 \quad (7)$$

соотношения (4) и учитывая (6) получим

$$r \frac{dq_\phi^0}{dr} + 3q_\phi^0 = e_r^0 - r \frac{de_\phi^0}{dr} - e_\phi^0. \quad (8)$$

Для упругих деформаций и остаточных напряжений можно записать закон Гука

$$e_r^0 = \frac{1}{E} (\sigma_r^0 - \nu (\sigma_\phi^0 + \sigma_z^0)), \quad (9)$$

$$e_\phi^0 = \frac{1}{E} (\sigma_\phi^0 - \nu (\sigma_r^0 + \sigma_z^0))$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $E$  – модуль Юнга.

Для проволоки можно считать справедливой гипотезу плоских сечений, поэтому

$$e_z^0(r) + q_z(r) = \varepsilon_z^0, \quad (\varepsilon_z^0 = const, r \in [0; a]), \quad (10)$$

Условие (10) может нарушаться лишь вблизи свободных концов проволоки.

Выражая  $e_z^0$  через напряжения по закону Гука и учитывая (10) получим

$$\sigma_z^0(r) = E (\varepsilon_z^0 - q_z(r)) + \nu (\sigma_r^0(r) + \sigma_\phi^0(r)). \quad (11)$$

С помощью (11) из соотношений (9) можно исключить  $\sigma_z^0$ , тогда с учётом (6) уравнение (8) можно записать в виде

$$r \frac{dq_\phi}{dr} + \frac{3}{1+\nu} q_\phi = f(r), \quad (12)$$

где

$$f(r) = \frac{\sigma_r^0(r) - \sigma_\phi^0(r)}{E} - \frac{r}{E} \left[ (1-\nu) \frac{d\sigma_\phi^0(r)}{dr} - \nu \frac{d\sigma_r^0(r)}{dr} \right]. \quad (13)$$

Общее решение уравнения (12) при условии, что  $\lim_{r \rightarrow 0} q_\phi(r) = 0$  имеет вид [2]

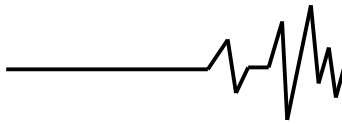
$$q_\phi(r) = \frac{1-2\nu}{E(1+\nu)r^{\frac{3}{1+\nu}}} \int_0^r x^{\frac{2-\nu}{1+\nu}} [\sigma_r^0(x) + 2\sigma_\phi^0(x)] dx - \frac{1}{E} [(1-\nu)\sigma_\phi^0(r) - \nu\sigma_r^0(r) - (1-2\nu)\sigma_\phi^0(r)]. \quad (14)$$

Из условия равенства нулю суммарного осевого усилия

$$\int_0^a r\sigma_z^0(r) dr = 0$$

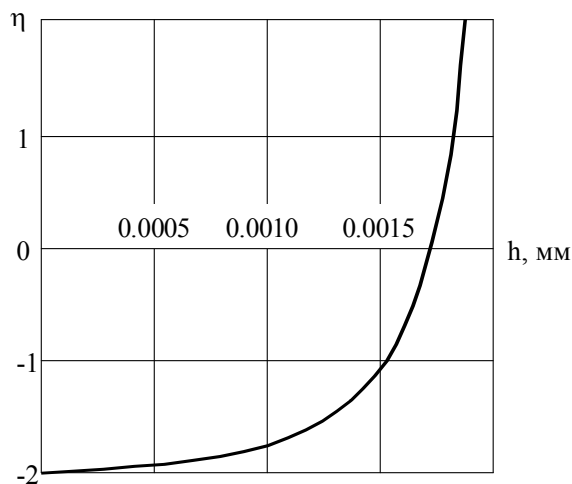
можно найти  $\varepsilon_z^0$

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{a^2} \int_0^a r \left( q_z(r) - \frac{\nu}{E} [\sigma_r^0(r) + \sigma_\phi^0(r)] \right) dr. \quad (15)$$

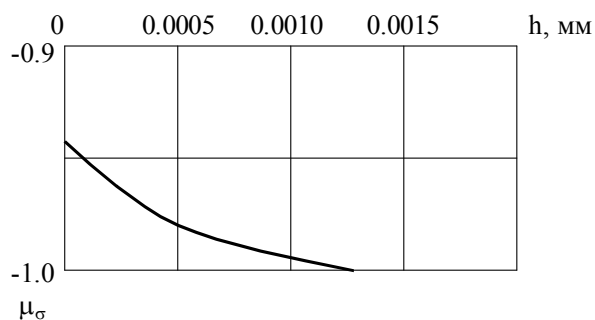


После определения  $\varepsilon_z^0$  по (15) находим  $\sigma_z^0(r)$  по (11).

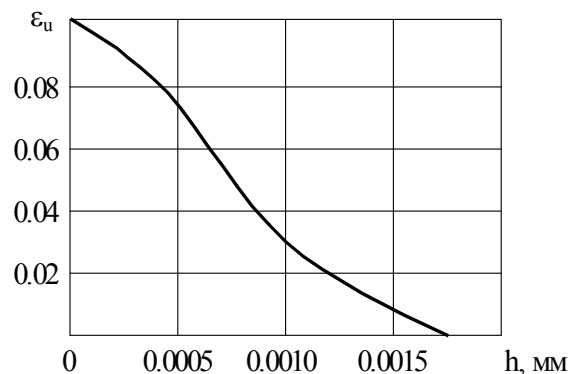
Полученные зависимости  $\eta(h)$ ,  $\mu_\sigma(h)$ , а также распределение интенсивности пластических деформаций  $\varepsilon_u$  по глубине поверхностного слоя приведены на рис.1, 2, 3. Из анализа этих зависимостей следует, что на поверхности проволоки имеет место всестороннее неравномерное сжатие ( $\eta = -2$ ;  $\mu_\sigma = -0.94$ ), которое с увеличением глубины слоя  $h$  переходит в напряжённое состояние неравномерного растяжения ( $\eta = 2,1$ ;  $\mu_\sigma = -1$ ). Однако такая схема напряжённого состояния при толщинах слоя  $h > 0.002$  мм не должна ухудшать эксплуатационные характеристики проволоки, так как при  $h > 0.002$  мм интенсивность пластических деформаций и, соответственно, вызванные этой деформацией повреждения, равны нулю.



**Рис. 1. Показатель напряжённого состояния в поверхностно-упрочнённом слое**



**Рис. 2. Параметр Надау-Лоде в поверхностно-упрочнённом слое**



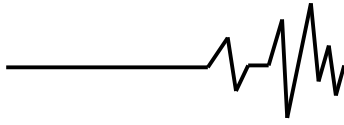
**Рис.3. Интенсивность деформаций в поверхностно-упрочнённом слое**

Для оценки использованного ресурса пластичности  $\psi$  в поверхностном слое использованы результаты расчёта  $\psi$ , полученные в работе [2]. Учитывая, что в данном случае пластическая деформация реализуется с многократными разгрузками, принимая, что при единичном ударе шарика диаметром  $d$  глубина лунки не превышает  $0,06d$ , при интенсивности деформаций  $\varepsilon_u = 0,1$  для использованного ресурса пластичности получено значение  $\psi = 0,165$ . Так как полученное значение  $\psi$  не превышает  $0,3$ , то это значит, что при такой степени пластической деформации поверхностного слоя термодинамически устойчивые дефекты в нём отсутствуют [6]. Поэтому качество слоя можно считать высоким.

### Выводы

Пластическая деформация поверхностного слоя проволоки при вибрационной обработке стальными закалёнными шариками, кроме упрочнения этого слоя, позволяет получить благоприятную схему напряжённого состояния, обусловленную сжимающими остаточными напряжениями, а также минимальное использование запаса пластичности. Схема напряжённого состояния в пластически деформированном слое практически не зависит от материала проволоки [5], однако следует отметить, что приведённые результаты получены для случая, когда радиусы шариков много меньше радиуса проволоки.

Для количественной оценки комплексного влияния напряжённого состояния остаточных напряжений и напряжённого состояния обусловленного внешними нагрузками, действующими на деталь из проволоки при её эксплуатации, на схему напряжённого



состояния в поверхностном слое нагруженной детали, в дальнейших исследованиях необходимо рассмотреть вопросы релаксации остаточных напряжений в этом слое.

#### Список использованных источников

1. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А. Г. Сулова. М.: Машиностроение. 2008. – 320 с.: ил. ISBN 978-5-217-03427-7.

2. Берник П. С., Сивак Р. И. Улучшение механических характеристик проволоки путём виброобработки // Вопросы вибрационной технологии: Межвуз. сб. науч. статей. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. – С.81-84.

3. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Расчёт релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочнённом слое цилиндрического изделия в условиях ползучести // Вест. СамГТУ. Серия: Физико-математические науки. – 2001. – №13. – С. 61-74.

4. Гриневич Е. В., Колотнткова О. В. Исследование полей остаточных напряжений при поверхностном упрочнении цилиндрических изделий // Прочность и долговечность элементов конструкций. Сб. трудов. Куйбышев: КПТИ. – 1983. – С. 88-97.

5. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – К.: Выща школа, 1983. – 175 с.

6. Богатов А. А., Мижирицкий О. И., Смирнов С. В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Metallurgia, 1984. – 144 с.

#### Список источников в транслитерации

1. Inzheneriya poverhnosti detalej / Koll. avt.; pod red. A. G. Suslova. M.: Mashinostroenie. 2008. – 320 s.: il. ISBN 978-5-217-03427-7.

2. Bernik P. S., Sivak R. I. Uluchshenie mehanicheskikh harakteristik provoloki putjom vibroobrabotki // Voprosy vibracionnoj tehnologii: Mezhvuz. sb. nauch. statej. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DGTU, 2003. – S.81-84.

3. Radchenko V. P., Saushkin M. N. Raschjot relaksacii ostatocnyh naprjazhenij v poverhnostno-uprochnjonnom sloe cilindricheskogo izdelija v uslovijah polzuchesti // Vest. SamGTU. Serija: Fiziko-matematicheskie nauki. – 2001. – №13. – S.61-74.

4. Grinevich E. V., Kolotntkova O. V. Issledovanie polej ostatochnyh naprjazhenij pri poverhnostnom uprochnenii cilindricheskikh izdelij // Prochnost' i dolgovechnost' jelementov konstrukcij. Sb. trudov. Kujbyshev: KPTI. – 1983. – S. 88-97.

5. Ogorodnikov V. A. Ocenka deformiruемости metallov pri obrabotke davleniem. – K.: Vyshha shkola, 1983. – 175 s.

6. Bogatov A. A., Mizhirickij O. I., Smirnov S. V. Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem. – M.: Metallurgija, 1984. – 144 s.

#### СХЕМА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ В ПОВЕРХНЕВОМУ ПЛАСТИЧНО ДЕФОРМОВАНОМУ ШАРІ

**Анотація.** Пластична деформація поверхневого шару дроту при вібраційній обробці загартованими сталевими кульками, крім зміцнення цього шару, дозволяє отримати сприятливу схему напруженого стану, обумовлену стискаючими залишковими напруженнями, а також мінімальне використання запасу пластичності. Отримані закономірності розподілу показників напруженого стану по глибині пластично деформованого поверхневого шару дроту при вібраційній обробці цього шару загартованими сталевими кульками. Встановлено, що в поверхневому шарі має місце схема всебічного нерівномірного стиснення.

**Ключові слова:** напружений стан, пластична деформація, вібраційна обробка, поверхневий шар.

#### THE SCHEME OF THE STRESS IN THE SURFACE PLASTICALLY DEFORMED LAYER

**Annotation.** Plasticheskaya deformation of the surface layer wire vibrating processing of hardened steel balls, besides the hardening of this layer, allows to obtain favorable scheme of stress state, due to the compressive residual stresses, and minimal use of stock of plasticity. The obtained regularities of the distribution of indicators of stress state in the depth of plastically deformed surface layer wire vibrating processing this layer hardened steel balls. It is established that in the surface layer is a comprehensive scheme uneven compression.

**Key words:** stress state, plastic deformation, vibrating processing, surface layer.