

## ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОБКАТЫВАНИИ ДЕТАЛЕЙ РОЛИКАМИ ПРОИЗВОЛЬНОГО ТИПА

Канд. техн. наук Я.Н. ОТЕНИЙ

*Приведены результаты разработки и анализа математической модели определения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей после поверхностного пластического деформирования (ППД) роликами, имеющими произвольные формы и размеры. Показано, что для расчета напряжений в поверхностном слое необходимо их определять не от сосредоточенной силы, а как функцию от контактных напряжений. Применение предлагаемой методики для расчета остаточных напряжений позволяет объяснить особенности формирования остаточных напряжений при ППД. Расчетные данные, произведенные по предложенной методике, хорошо согласуются с экспериментальными.*

*Results of development and the analysis of mathematical model on definition of residual stresses in a surface layer of details after surface plastic deformation (SPD) by use of rolls with arbitrary sizes are given. It is shown, that for calculation of voltages in a surface layer it is necessary not to determine them from a concentrated force, but to define as a function from contact stresses. The application of the procedure for calculations of residual voltages explaining features of stresses formation at SPD. The design data affected on the offered procedure are well compounded with experimental.*

К преимуществам обработки деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД) (по сравнению с другими методами) относится возможность формирования в поверхностном слое требуемых остаточных напряжений достаточно большой интенсивности, что способствует повышению эксплуатационных характеристик деталей. Многочисленными экспериментальными исследованиями установлен характер распределения напряжений по глубине поверхностного слоя. Чаще всего при обкатке роликами в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения, причем особенность их распределения по глубине поверхности имеет явно выраженный максимум или на поверхности, или на некотором расстоянии от нее (рис. 1). Так как количественный анализ протекания физико-механических явлений в очаге деформации отсутствует, то ряд авторов, объясняя тот факт, что максимум напряжений располагается на некотором расстоянии от поверхности упрочняемого тела, выдвигает разные гипотезы.

Причиной спада напряжений в направлении к поверхности детали, по мнению П.А. Чепа [1], является неравномерность пластического течения металла в первичной и вторичной зонах очага деформации, т. е. на фронтальной поверхности и поверхности сбег деформирующего элемента. В. М. Браславский и О.О. Куликов относят этот факт на счет возникновения при обработке температуры, причем с увеличением нагрузки температурные напряжения суммируются с механическими напряжениями [2]. Л.М. Школьник и В.И. Шахов объясняют смещение максимума остаточных напряжений в тело детали перенаклепом материала вблизи поверхности [3]. Единого мнения на этот счет не существует.

Еще один невыясненный факт — превышение радиальных остаточных напряжений (направленных перпендикулярно деформируемой поверхности) по сравне-

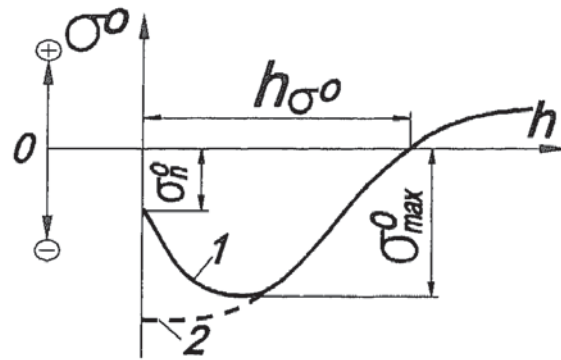


Рис.1. Пример эпюр остаточных напряжений, возникающих при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием

нию с тангенциальными (направленными параллельно поверхности детали) в 1,3...2 раза [4].

Раскрыть особенности формирования напряженного состояния в поверхностном слое после обработки можно, разработав математическую модель влияния контактных напряжений, возникающих при обработке между деформирующим роликом и обрабатываемой поверхностью, на напряжения в теле детали.

В теории упругости [4] приводятся следующие зависимости для определения радиальных  $\sigma_y$  и касательных  $\sigma_z$  напряжений (рис. 2), действующих в произвольно выбранной точке в теле детали в зависимости от сосредоточенной нагрузки  $P$ , приложенной к ее поверхности:

$$\sigma_z = \frac{P}{2\pi} \left\{ (1-2\mu) \left[ \frac{1}{z^2} - \frac{h}{z^2} (z^2 + h^2)^{-1/2} \right] - 3z^2 h (z^2 + h^2)^{-5/2} \right\}, \quad (1)$$

$$\sigma_y = -\frac{3P}{2\pi} h^3 (z^2 + h^2)^{-5/2}, \quad (2)$$

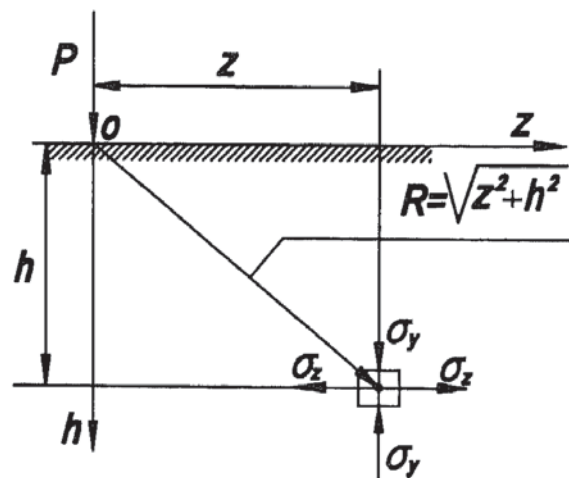


Рис.2. Схема образования напряжений в поверхностном слое на глубине  $h$  от сосредоточенной силы  $P$ , приложенной к границе полубесконечного тела

где  $z$  и  $h$  — координаты точки в поверхностном слое, в которой рассматриваются напряжения от силы  $P$ , приложенной в начале системы координат  $zOh$ ;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

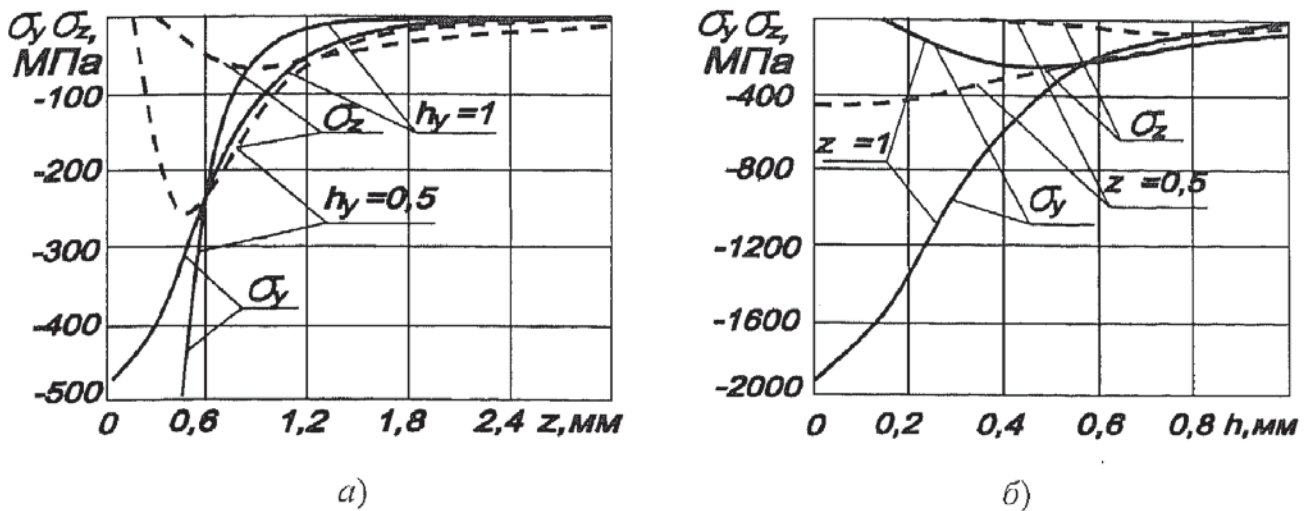


Рис. 3. Значения касательных  $\sigma_z$  и радиальных  $\sigma_y$  напряжений в поверхностном слое от расстояния до приложенной сосредоточенной силы на поверхности детали при постоянных глубинах  $h$  (а) и распределении напряжений по глубине поверхностного слоя при постоянных значениях расстояний  $z$  до приложенной силы (б)

Касательные  $\sigma_z$  и радиальные  $\sigma_y$  остаточные напряжения зависят от величины силы  $P$  и расстояния ее приложения до точки, в которой рассматриваются напряжения в детали. Эти особенности представлены графиками на рис.3, полученными на основе расчетов по (1) и (2). Касательные напряжения  $\sigma_z$  в поверхностном слое меньше осевых напряжений  $\sigma_y$ , при их изменении как по глубине  $h$  поверхностного слоя, так и от расстояния  $z$  до приложенной на поверхности силы деформирования, причем эти зависимости имеют резко убывающий характер.

Реальная схема деформирования при ППД отличается тем, что между роликом и деталью действует не сосредоточенная сила, а распределенные по площади контакта напряжения (контактные напряжения).

Используя (1) и (2), определим напряжения в теле детали от контактных напряжений, распределенных по площади произвольного по размерам контакта. Форма и размеры контакта зависят от формы и размеров деформирующего элемента, а также размеров детали. Будем предполагать эту взаимосвязь известной, кроме того, известен закон распределения напряжений по площади рассматриваемого контакта.

На рис. 4 показана контактная зона, возникающая при упруго-пластическом деформировании поверхности детали. Напряжения поверхности детали будем рассматривать в плоскости, в которой деформирующий ролик (на рис. 4 не показан) внедрен на максимальную глубину  $h_m$ . Выберем в площади контакта произвольную точку  $M$ , в которой действует напряжение  $\sigma_M$ . Тогда элементарная сила, действующая на поверхность в этой точке, будет равна  $dp = \sigma_M dz dl_k$ , где  $z$  и  $l_k$  — координаты произвольной точки  $M$  в пределах контакта.

С учетом этих обозначений на основе уравнений (1) и (2) и схемы, представленной на рис. 4, получены следующие интегральные уравнения для расчета радиальных и касательных остаточных напряжений от напряжений, распределенных по площади контакта,

$$\sigma_{\sigma_y} = \sigma_{\sigma_z} - \int_0^{L_k} \int_0^{z_k} 0,48 \frac{kh^3 \sigma_k}{(z^2 + (l_k - L_0)^2 + h^2)^{5/2}} dl_k dz, \tag{3}$$

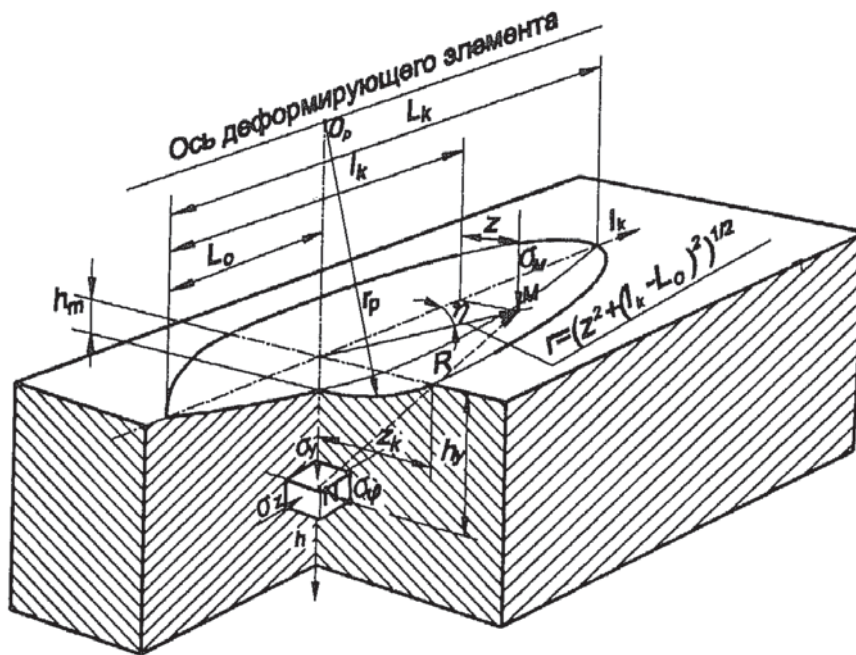


Рис.4. Расчетная схема для определения напряжений в теле детали от контактных напряжений, распределенных по площади контакта

$$\sigma_{oz} = \sigma_T - \int_0^{L_k} \int_0^{z_k} \frac{k\sigma_k}{2\pi} \left\{ (1-2\mu) \left[ \frac{1}{R_s^2} - \frac{h}{R_s^2 \sqrt{R}} \right] - \frac{3R_s^2 h}{R^{5/2}} \right\} dz dl_k = 0, \quad (4)$$

где  $R_s = \sqrt{z^2 + (l_k + L_0)^2}$ ;  $R = \sqrt{R_s^2 + h^2}$ ;  $L_k$  — длина контакта;  $z_k$  — уравнение контурной линии контакта;  $L_0$  — расстояние от левого конца контактной зоны до плоскости максимального внедрения деформирующего элемента в поверхность детали;  $\sigma_k$  — распределение контактных напряжений по площади контакта;  $l_k$  — текущая координата длины контакта;  $\sigma_T$  — предел текучести обрабатываемого материала;  $k$  — коэффициент, учитывающий уменьшение напряжений на поверхности сбег деформирующего элемента.

Результаты расчетов с применением ЭВМ по предложенным формулам показывают следующее. Распределение контактных напряжений по площади контакта при расчетах применялось в соответствии с методикой расчета, ранее полученной автором. Тангенциальные и радиальные напряжения в поверхностном слое, возникающие от распределенных напряжений по полуширине контакта в процессе обработки цилиндрическим роликом (контактная зона представляет прямоугольник) относятся друг к другу в определенной пропорции. Многочисленные экспериментальные исследования (рис. 4) показали, что тангенциальные напряжения в среднем меньше радиальных примерно в три раза.

Расчеты по предлагаемой формуле (3) сравнивались также с различными экспериментальными данными, приведенными в литературных источниках. В частности, на рис. 5 представлены графические зависимости, полученные на основе расчетов по формуле (3) при поверхностном пластическом деформировании шариком и экспериментальных данных из [2]. Как видно из рис. 5, оба варианта имеют достаточно хорошую сходимость.

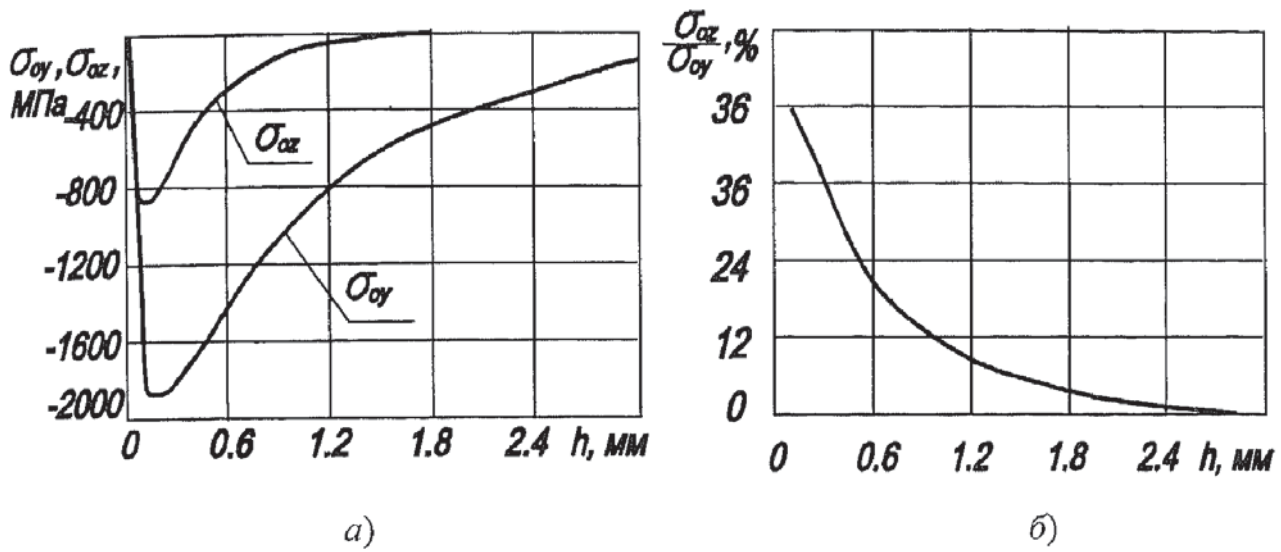


Рис. 5. Изменение напряжений по глубине поверхностного слоя от суммарного значения распределенных напряжений по ширине контакта при обработке цилиндрическим роликом (а) и их процентное отношение (б):  $P = 1$  кН; диаметр ролика  $r_p = 6$  мм; сила деформирования, приложенная к ролику,  $P_{oy} = 2,33$  кН,  $L_k = 1$  мм

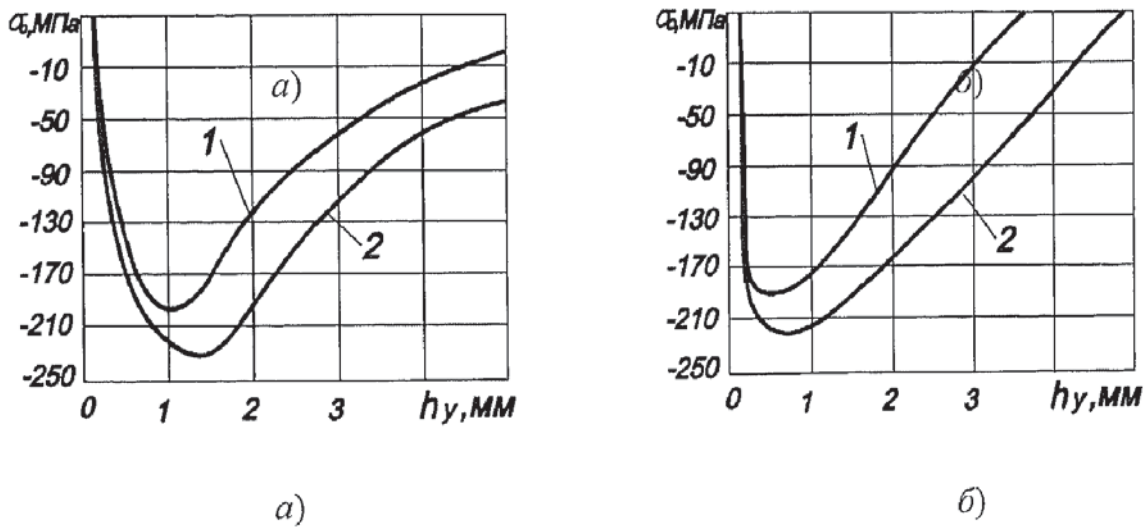


Рис. 6. Остаточные напряжения в поверхностном слое обкатанных валов: а) по экспериментальным зависимостям, взятым из [5]; б) по расчетной зависимости (3). Материал обработанного вала — сталь 50, предел текучести  $\sigma_T = 360$  МПа; предел временного сопротивления  $\sigma_B = 610$  МПа; диаметр вала  $D_B = 230$  мм; радиус шарика  $r_{ш} = 12$  мм; сила обкатывания 1 —  $P_{oy} = 15$  кН; 2 —  $P_{oy} = 34$  кН

Таким образом, зависимости (1) и (2) и полученные на их основе интегральные уравнения (3) и (4) позволяют рассчитать остаточные напряжения в поверхностном слое детали от распределенных напряжений, действующих по произвольной площади контакта, а также объяснить закономерности формирования остаточных напряжений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ч е п а П. А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным деформированием. — Минск: Наука и техника, 1981. — 128 с.
2. Б р а с л а в с к и й В. М. Технология обкатки крупных деталей роликами. — М.: Машиностроение, 1975. — 159 с.
3. Ш к о л ь н и к Л. М., Ш а х о в В. И. Технология и приспособления для упрочнения и отделки деталей накатыванием. — М.: Машиностроение, 1964. — 184 с.
4. Т и м о ш е н к о П. С., Д ж. Г у д ь е р. Теория упругости. — М.: Наука, 1975. — 578 с.
5. С м е л я н с к и й В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. — М.: Машиностроение, 2002. — 299 с.