

УДК 620.17

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБИНЫ УПРОЧНЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

¹Отений Я.Н., ¹Привалов Н.И., ³Щеголев Н.Г., ²Муравьев О.П., ²Ткачева Ю.О.

¹ФГБОУ ВО Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет, Камышин, e-mail: kti@kti.ru

²Карагандинский государственный технический университет, Караганда,

³ООО «Крановый завод»

Статья посвящена выявлению особенностей формирования напряжений распределенных по глубине поверхностного слоя при деформировании полубесконечного тела ППД роликами. Приведена математическая модель взаимосвязи контактных напряжений распределенных по площади круга, расположенного на поверхности полубесконечного тела с напряжениями в теле детали. Поскольку при обработке ППД ролики контактируют с обрабатываемой деталью по определенной площади, то необходимо искать решение от распределения напряжений по поверхности контакта. Изменение напряжений по глубине поверхностного слоя от распределенных напряжений в круговом контакте подтверждают многочисленные экспериментальные данные. Напряжения в поверхностном слое сначала растут от нуля до некоторого максимального значения, а затем уменьшаются. В связи с этим актуальным является определение математических моделей расчета глубины упрочненного слоя и закона распределения остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя. Одной из первых зависимостей для расчета глубины упрочнения является формула, полученная Хейфецом С. Г. на основе контактной задачи с допущением, что сила деформирования приложена в точке, однако при этом не учитываются особенности распределения контактных напряжений по площади контакта между деформирующим роликом и обрабатываемой поверхностью. Для валов большего диаметра при обкатывании с большими силами результаты получаются завышенными на 30%...50%. Чтобы устранить расхождения между теоретическими и экспериментальными данными И.В. Кудрявцевым и Г.Е. Петушковым была предложена модификация формулы Хейфеца С. Г.

Ключевые слова: глубина слоя, упрочнение, деформированный слой, поверхностное пластическое деформирование

FEATURES OF THE FORMATION OF THE DEPTH OF HARDENING DURING THE MACHINING OF PARTS BY SURFACE PLASTIC DEFORMATION

¹Oteny Y.N., ¹Privalov N.I., ³Schcegolev N. G., ²Muravev O. P., ²Tkacheva J. O.

¹Kamyshin Institute of Technology (branch) of state educational institution of higher Education Volgograd State Technical University, Kamyshin, Kamyshin, e-mail: kti@kti.ru

²Karaganda state technical University, Karaganda,

³LLC "plant Kranovy"

Article is devoted to detection of features of formation of tension of PPD distributed on blanket depth at deformation of a semi-infinite body by rollers. The mathematical model of interrelation of the contact tension distributed on the area of the circle located on a surface of a semi-infinite body with tension in a detail body is given. As when processing PPD rollers contact to the processed detail on a certain area, it is necessary to look for the decision from distribution of tension on a contact surface. Change of tension on blanket depth from the distributed tension in circular contact is confirmed by numerous experimental data. Tension at first grows in a blanket from zero to some maximum value, and then decreases. In this regard definition of mathematical models of calculation of depth of the strengthened layer and the law of distribution of residual tension on depth of the strengthened layer is actual. One of the first dependences for calculation of depth of hardening is the formula received by Heyfets C. On the basis of a contact task with an assumption that force of deformation is applied in a point, however at the same time features of distribution of contact tension on the area of contact between the deforming roller and the processed surface aren't considered. For shaft of bigger diameter when rolling with big forces results turn out overestimated on 30%...50%. To eliminate divergences between theoretical and experimental data I.V. Kudryavtsev and G.E. Petushkov modification of a formula of Heifetz of C has been offered.

Keywords: depth of the layer, hardening, deformed layer, surface plastic deformation

При обработке деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД) в поверхностном слое детали происходят необратимые пластические деформации, результатом которых является упрочнение поверхностного слоя, а также формирование остаточных напряжений. Эти показатели качества поверхностного слоя преимущественно определяются на основе проведе-

ния экспериментальных исследований. В связи с этим актуальным является определение математических моделей расчета глубины упрочненного слоя и закона распределения остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя.

Одной из первых зависимостей для расчета глубины упрочнения является формула, полученная Хейфецом С.Г. [1] на основе

контактной задачи с допущением, что сила деформирования приложена в точке при этом не учитываются особенности распределения контактных напряжений по площади контакта между деформирующим роликом и обрабатываемой поверхностью. Эта формула имеет вид

$$h_y = \sqrt{\frac{P_y}{2 \cdot \sigma_T}} \quad (1)$$

где P_y - сосредоточенная сила деформирования, приложенная в центре площади контакта; σ_T - предел текучести обрабатываемого материала.

В результате последующей экспериментальной проверки было обнаружено, что приведенная зависимость с достаточной степенью точности подтверждается при обработке деталей с относительно малыми радиусами (5...15 мм) и при значительных силах, действующих на ролик. Для валов большего диаметра при обкатывании с большими силами результаты получаются завышенными на 30%...50%.

Чтобы устранить расхождения между теоретическими и экспериментальными данными И.В. Кудрявцевым и Г.Е. Петушковым [1] была предложена модификация формулы (1) принимающая вид

$$h_y = \frac{1}{1 + 0.07 \cdot R_{np}} \cdot \sqrt{\frac{P}{2 \cdot \sigma_T}} \quad (2)$$

где приведенный радиус определяется по формуле

$$R_{np} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{r_{np}} + \frac{1}{r_p}} \quad (3)$$

где R – радиус детали; r_{np} – профильный радиус тороидального ролика; r_p – радиус ролика.

Эта формула применяется, когда в качестве деформирующих роликов используются шарiki и профильные (тороидальные)

ролики. Для других типов роликов, например, конических, наиболее часто применяемых в производственной практике эта задача не решена.

Поскольку при обработке ППД ролики контактируют с обрабатываемой деталью по определенной площади, то необходимо искать решение от распределения напряжений по поверхности контакта.

Для определения распределения напряжений в теле детали от сосредоточенной силы, приложенной к поверхности полубесконечного тела, в теории упругости приводится следующая система уравнений [3] (см. рис. 1):

Систему уравнений (4)...(7) примем в качестве основы для дальнейшего анализа и получения расчетных формул определения напряжений в теле детали в зависимости от контактных напряжений.

Рассмотрим уравнение (4). Предположим, что на некоторой глубине h_y напряжение σ_y достигает предела текучести σ_T , а рассматриваемая точка в теле детали расположена на линии действия сосредоточенной силы P . Это соответствует условию $r=0$. Выполнив необходимые преобразования, получим

$$h_y = \sqrt{\frac{3P}{2\pi \cdot \sigma_T}} = \sqrt{\frac{0,477P}{\sigma_T}} \approx \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}} \quad (8)$$

Это фактически соответствует формуле (1).

Полученный результат указывает на источники расхождения расчетных значений, выполненных по формуле (1) с экспериментальными данными.

Из системы уравнений (3)...(7), видно, что действие силы P_y на напряжение в детали убывает от точки ее приложения обратно-пропорционально третьей степени расстояния между ними. Следовательно, чем больше площадь контакта при одной и той же силе деформирования, тем больше будут расхождения с экспериментальными данными, полученными по формуле (1).

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{P}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \cdot \left[\frac{1}{r^2} - \frac{h_y}{r^2} \cdot (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] - 3r^2 h_y \cdot (r^2 + z^2)^{-5/2} \right\} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_y &= -\frac{3P}{2\pi} \cdot h_y^3 \cdot (r^2 + h_y^2)^{-5/2} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{P}{2\pi} (1-2\nu) \cdot \left\{ -\frac{1}{r^2} + \frac{h_y}{r^2} \cdot (r^2 + h_y^2)^{-1/2} + h_y \cdot (r^2 + h_y^2)^{-3/2} \right\} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tau_{ry} &= -\frac{3P}{2\pi} \cdot r h_y^2 \cdot (r^2 + h_y^2)^{-5/2} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где r и h_y - координаты точки в теле детали, в которой рассматривается напряженное состояние от сосредоточенной силы P ; ν – коэффициент Пуассона (рис.1).

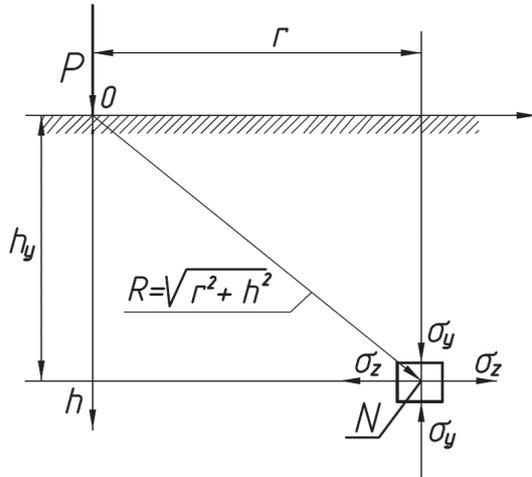


Рис.1. Схема образования напряжений в поверхностном слое на глубине h_y и расстоянии r от сосредоточенной силы P , приложенной в точке к границе полубесконечного тела

Для оценки влияния распределенных контактных напряжений по площади контакта на глубину упрочнения, и возможности сравнения этих результатов с методиками других авторов определения напряжений в поверхностном слое, будем пользоваться только уравнением (5), так как остальные составляющие, как показали предварительные расчеты, влияют значительно слабее на напряжения в детали, поэтому ими в первом приближении можно пренебречь.

Для выяснения основных закономерностей влияния контактных напряжений на напряжения в поверхностном слое смоделируем площадь контакта в виде круга и изменяющимся в пределах этого круга распределением напряжений по разным законам.

Введем в рассмотренные полярные координаты ρ , θ с началом системы координат в центре круга. Выделим в круге сектор с углом раствора $d\theta$. Элементарная площадка контакта расположенная в этом секторе на расстоянии s от начала координат равна $sd\theta ds$, а элементарная сила, приложенная к этой площадке можно вычислить по зависимости $p_{s\theta} = \sigma_{s\theta} sd\theta ds$. Будем предполагать, что напряжение $\sigma_{s\theta}$ в пределах контакта зависит только от расстояния между началом координат и рассматриваемой точкой и не зависит от угла θ .

Применяя решение (5), найдем суммарное действие от напряжений, распределенных в круге, расположенного к полубесконечному телу на напряжения в точке этого тела, расположенной на оси координат y , приложенной к центру круга перпендикулярно поверхности

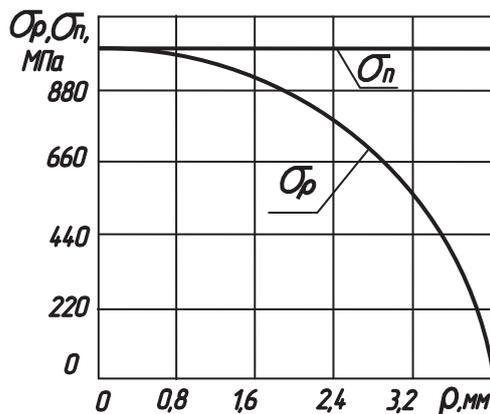
$$\sigma_y(\rho) = 2\pi \cdot \int_0^{\rho} \frac{0,477 \cdot p_{s\theta} \cdot h_y^3}{(s^2 + h_y^2)^{5/2}} ds \quad (10)$$

где ρ – переменный радиус круга.

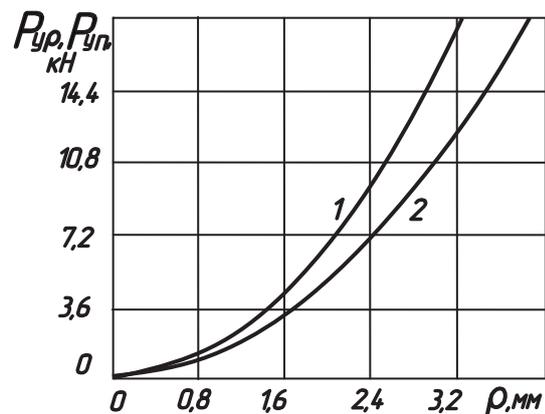
Рассмотрим два различных закона распределения напряжений в круговом контакте: 1) напряжения, изменяющиеся по закону Герца [2] и 2) постоянном напряжении по всей площади контакта в круге (рис.2,а), значение которого равно максимальному напряжению в первом случае.

При обработке ППД шариками плоской поверхности размеры контактной зоны не превышают шести миллиметров.

Как видно из графика (рис.2,б) разница в усилиях деформирования начинает существенно сказываться при диаметрах кругового контакта больше двух миллиметров. Исходя из этого, можно предположить, что



а)



б)

Рис.2. Зависимости изменения напряжений по ширине контакта при разных законах распределения напряжений: -по убывающему закону от центра площадки σ_p и при постоянном напряжении σ_n на всей площади контакта равном максимальному значению в предыдущем случае (а); изменение усилия деформирования от диаметра кругового контакта (б). 1 – для постоянного напряжения, 2- для напряжения, изменяющегося по закону Гука

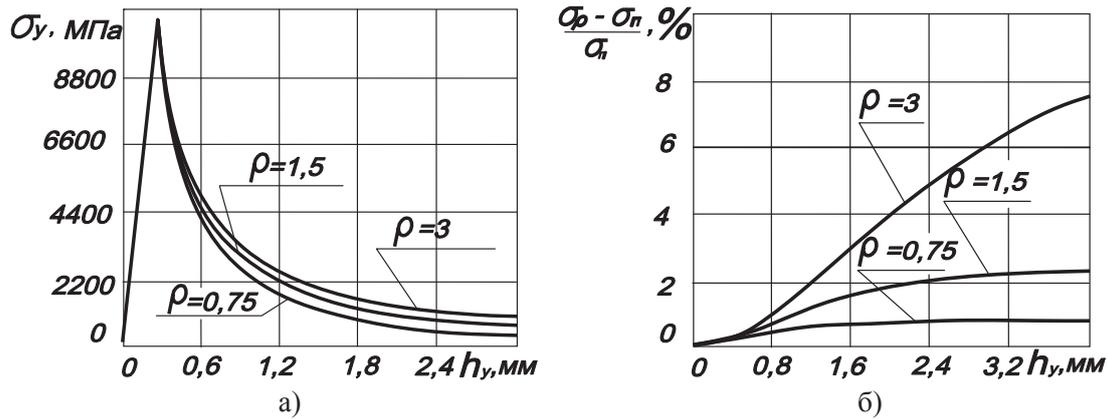


Рис.3. Изменение напряжений по глубине поверхностного слоя при разных значениях радиуса кругового контакта (а); б)- процентное отношение изменения напряжений по глубине поверхностного слоя при постоянном и изменяющемся по закону Герца напряжениях в круговой контактной зоне

существенное влияние на напряженное состояние в теле детали при одной и той же площади контакта будет оказывать максимальные напряжения в центре контакта, а не закон распределения напряжений.

Изменение напряжений по глубине поверхностного слоя от распределенных напряжений в круговом контакте, представленные на рис.3, подтверждают многочисленные экспериментальные данные. Напряжения в поверхностном слое сначала растут от нуля до некоторого максимального значения, а затем уменьшаются.

Проведем горизонтальную прямую на расстоянии от начала координат, которая соответствует пределу текучести σ_T . Точки ее пересечения с кривой распределения напряжений в теле детали определяют координаты перехода напряжений из упругой области в область пластически деформированного металла. Точка пресечения, которая расположена на убывающей ветви кривой напряжений, определяет координату глубины упрочненного слоя. Как следует из графика рис.3в большему значению радиуса контакта, соответствует большая глубина упрочнения, так как при этом увеличивается и усилие деформирования. Различие между глубиной упрочнения при распределении напряжений по убывающему закону и при постоянной силе деформирования не превышает 10% (рис.3.б), причем это различие увеличивается пропорционально площади контакта, как установлено многочисленными экспериментальными данными..

На рис.4 показаны графики изменения глубины упрочнения, рассчитанные по формуле (1) и формуле (10). Как видно из этих графиков, чем больше размеры контактной зоны, тем больше расхождение между глубинами упрочнения, как и проявляется в эксперименте.

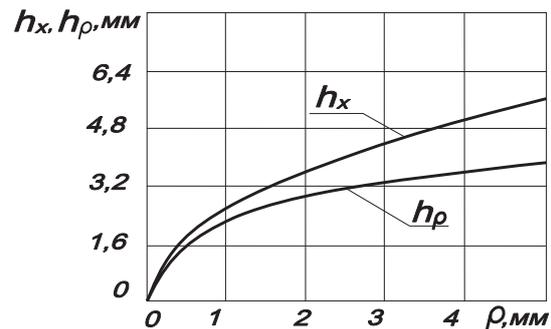


Рис. 4. Сравнительные графики глубины упрочнения по формуле Хейфеца (h_x) и формуле (10) (h_ρ)

Список литературы

1. Хейфец С. Г. Аналитическое определение глубины напряженного слоя при обработке роликами стальных деталей. Труды ЦНИИТМАШ, кн. 49. – М.: Машгиз, 1952. – С. 7–17.
2. Кудрявцев И. В., Петушков Г. Е. Влияние кривизны поверхностей на глубину пластической деформации при упрочнении деталей поверхностным наклепом // Вестник машиностроения, 1966. № 7. С. – 41–43.
3. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости.: Пер. с англ. Главная редакция физ.-матем. лит-ры, изд-во «Наука». 1975. – 576 с.