

## Напряженно-деформированное состояние толстостенной заготовки при деформирующем протягивании

Ю. А. Цеханов<sup>а</sup>, Е. А. Балаганская<sup>б</sup>, С. Е. Шейкин<sup>в</sup>

<sup>а</sup> Воронежская государственная технологическая академия, Воронеж, Россия

<sup>б</sup> Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

<sup>в</sup> Институт сверхтвердых материалов НАН Украины, Киев, Украина

*Изложены результаты исследований особенностей упрочнения обрабатываемой детали при деформирующем протягивании. Полученные результаты позволяют прогнозировать качество обрабатываемой поверхности при проектировании технологических процессов, содержащих операции холодного осесимметричного пластического деформирования.*

Деформирующее протягивание толстостенных труб является многоступенчатым и осуществляется с малыми натягами [1]. Инструмент, применяемый для выполнения данной операции, работает в чрезвычайно жестких условиях (высокое контактное давление). При использовании деформирующего инструмента с износостойким покрытием его стойкость определяется не только радиальной силой, но и характером распределения контактных давлений [2]. Вследствие того что толстостенные детали обрабатываются, как правило, с малыми натягами, исследовать экспериментально характер распределения контактных давлений не представляется возможным. Поэтому разработка теоретических методов исследования напряжений в контактной зоне является чрезвычайно актуальной.

Кроме того, для оценки и прогнозирования долговечности деталей, работающих при переменных нагрузках [3], важно знать такой параметр качества поверхностного слоя, как ресурс использованной пластичности.

Деформированное состояние в контактной зоне можно считать плоским [4]. К такой же схеме сводятся и многие другие виды пластического протягивающего деформирования (ППД): редуцирование, обкатка, выглаживание и др.

Если в пластической области деформируемой заготовки известно распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$  по глубине, то задача становится статически определимой [5]. Методом измерения твердости [4] исследовалось упрочнение поверхностного слоя. Для этого процесс деформирования прекращался в установившейся стадии, образец разрезался по меридиональной плоскости и под нагрузкой 200 Г в узлах сетки с шагом 0,5 мм измерялась микротвердость. По тарировочному графику микротвердость – интенсивность напряжений определялось  $\sigma_i$ . Установлено, что уже после третьего цикла деформирующего протягивания параметры упрочнения заготовки практически изменяются лишь по глубине поверхностного слоя, не изменяясь вдоль оси заготовки (рис. 1).

Рассмотрим решение задачи о расчете напряжений в контактной зоне, когда  $\sigma_i$  изменяется по глубине в соответствии с некоторым законом  $\sigma_i = \sigma_i(y)$ . Анализ экспериментально полученных закономерностей упроч-

нения [1, 4] показал, что точнее всего они аппроксимируются степенным полиномом

$$k = a(-y)^3 + b(-y)^2 + c(-y) + d, \quad (1)$$

где  $a, b, c, d$  – коэффициенты аппроксимации;  $k = \sigma_i / \sqrt{3}$  – постоянная пластичности.

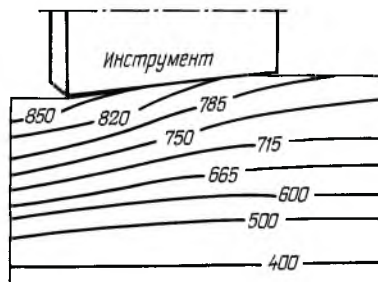


Рис. 1. Изолинии интенсивности напряжений упрочненного поверхностного слоя заготовки из стали 45 твердостью НВ 190 при многоцикловом деформирующем протягивании.

В соответствии с экспериментальными данными [1, 4] примем следующую расчетную схему. Из-за малости применяемых на практике углов конусности деформирующего элемента ( $\gamma_n = 4...10$  град) и использования высокоэффективных технологических смазок, значительно уменьшающих трение, можно рассмотреть давление инструмента на полуплоскость (без трения, рис. 2,а) с известным распределением интенсивности по глубине:

$$\sigma_i = \sigma_i(y); \quad \frac{\partial \sigma_i}{\partial x} = 0.$$

Соотношения для гидростатического давления  $\sigma$  на линиях скольжения  $\alpha$  и  $\beta$  имеют вид [5]

$$d\sigma - 2kd\Theta = -\frac{\partial k}{\partial y} dx, \quad d\sigma + 2kd\Theta = \frac{\partial k}{\partial y} dx, \quad (2)$$

где  $\Theta$  – угол наклона линии скольжения  $\alpha$  к оси  $x$ ;  $\text{tg } \Theta = \frac{dy}{dx}$ .

Пластическая область делится на три зоны: зона I – OBA; зона II – OBC; зона III – OCD.

Для определения гидростатического давления в любой  $i$ -й точке необходимо интегрировать выражение (2) вдоль положительного направления оси  $\alpha$ :

$$\sigma_i = \sigma_1 - 2 \int_i^1 kd\Theta + \int_i^1 \frac{\partial k}{\partial y} dx. \quad (3)$$

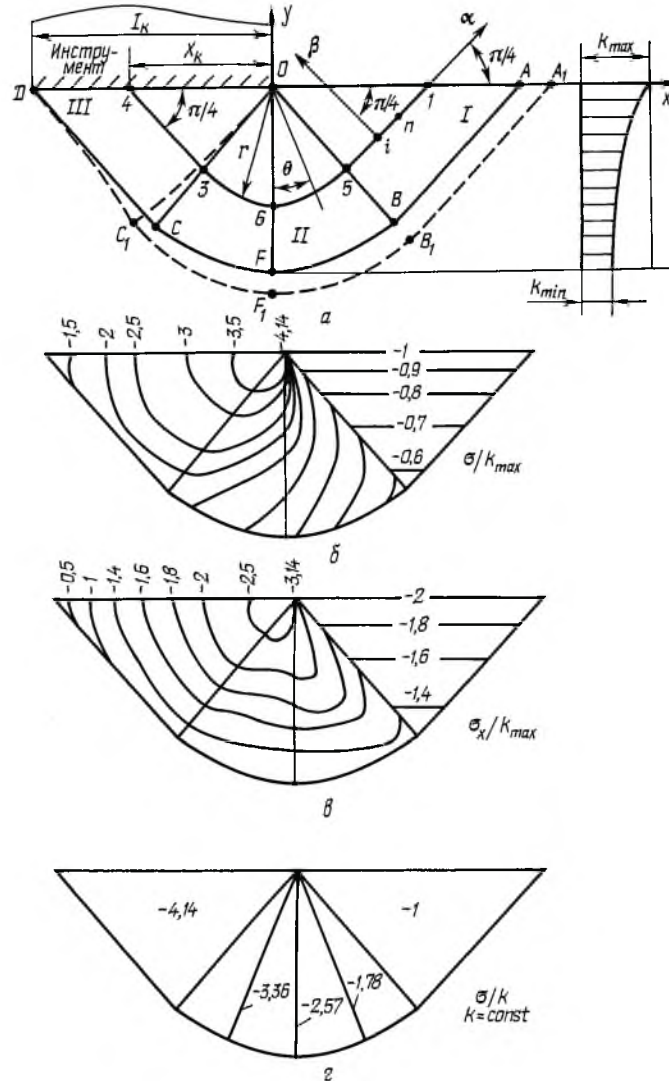


Рис. 2. Расчетная схема (а); распределение  $\sigma$  (б) и  $\sigma_x$  (в) при неравномерном упрочнении;  $\sigma$  (г) для идеально пластического тела.

Как показано в [6, 7], точное решение задачи отличается от приближенного [5], основанного на использовании сетки линий скольжения  $ABCD$  (рис. 2,а), полученной при давлении штампа на пластически однородное полупространство. Как и в работе [5], используем именно такой инженерный подход. В [6] отмечена его достаточная точность. Отметим также, что в соответствии с теоретическим анализом данной задачи [6, 7] и экспериментальными результатами [4] пластическая область при деформирующем протягивании не симметрична, а отвечает случаю “бокового выдавливания” материала заготовки (перед инструментом).

Интегрированием выражения (3) с учетом аппроксимации (1) для каждой зоны пластической области (рис. 2,а) получены соотношения для гидростатического давления. Вывод этих соотношений для краткости опускается.

Для всех точек одной  $\alpha$ -линии гидростатическое давление удобно выразить через параметр  $x_k$  (рис. 2,а), соответствующий расстоянию от начала контакта до точки пересечения этой линии с поверхностью контакта.

Зона I.

$$\sigma = \sigma_1 - a(x_k - x)^3 - b(x_k - x)^2 - c(x_k - x). \quad (4)$$

Зона II.

$$\sigma = \sigma_5 - 1,76ax_k^3C - 2bx_k^2B - 2,12cx_kA - 2Dk_{\max}, \quad (5)$$

где

$$\begin{cases} A = 0,71 - \sin \Theta; \\ B = 0,64 - 0,5\Theta - 0,25\sin \Theta; \\ C = 0,47 - \sin \Theta + 0,33\sin \Theta^3; \\ D = 0,78 - \Theta. \end{cases} \quad (6)$$

Зона III.

$$\sigma = \sigma_3 - k_3 + k_n,$$

где  $\sigma_3$  – гидростатическое давление на границе зон II и III;  $k_3$  – постоянная пластичности на границе зон II и III;  $k_n$  – постоянная пластичности в рассматриваемой точке, определяется из соотношения (1).

Приведем соотношения для вычисления  $\sigma$  на границах пластических зон:

$$\sigma_1 = k_{\max}; \quad (7)$$

$$\sigma_5 = \sigma_1 - 0,12ax_k^3 - 0,25bx_k^2 - 0,5cx_k; \quad (8)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 - 3,14k_{\max} - 2,21ax_k^3 - 2,82bx_k^2 - 3,5cx_k. \quad (9)$$

Гидростатическое давление на поверхности имеет вид

$$\sigma_4 = \sigma_1 - 3,14k_{\max} - 2,33ax_k^3 - 3,07bx_k^2 - 4cx_k. \quad (10)$$

Компоненты тензора напряжений вычисляются по известным формулам:

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma - k \sin 2\Theta; \\ \sigma_y = \sigma + k \sin 2\Theta; \\ \tau_{xy} = k \cos 2\Theta. \end{cases} \quad (11)$$

В качестве примера приведены изолинии относительного гидростатического давления  $\sigma / k_{\max}$  (рис. 2,б) и осевого напряжения  $\sigma_x / k_{\max}$  (рис. 2,в), рассчитанные по предложенному решению для случая  $k_{\max} / k_{\min} = 2$  со следующими коэффициентами аппроксимации:  $a = -0,04167$ ,  $b = 0,23472$ ,  $c = -0,69305$ ,  $d = 1$ , что примерно соответствует пятому циклу деформирования (последовательному прохождению пятого деформирующего элемента). На рис. 2,г для сравнения показано распределение гидростатического давления для случая  $k = k_{\max} = \text{const}$  (т.е. для идеально пластичного материала заготовки). Как видно, характер изменения  $k$  вносит значительные изменения в характер напряженного состояния поверхностного слоя заготовки.

Из выражений (10) и (11) видно, что контактное  $\sigma_n = \sigma_y$  и осевое  $\sigma_x$  напряжения на поверхности инструмента составляют:

$$\sigma_n = -5,14k_{\max} - 2,33ax_k^3 - 3,07bx_k^2 - 4cx_k; \quad (12)$$

$$\sigma_x = -3,14k_{\max} - 2,33ax_k^3 - 3,07bx_k^2 - 4cx_k. \quad (13)$$

Эпюры напряжений, рассчитанных по этим формулам, показаны на рис. 3 сплошными линиями. Штриховой линией показано  $\sigma_n$  (рис. 3,б), рассчитанное по точному решению [6]. Как видно, различие не превышает 6%. Точная сетка линий скольжения согласно [6] для рассмотренного случая упрочнения изображена штриховой линией  $A_1B_1C_1D_1$  на рис. 2,а. Следовательно, полученное инженерное решение вполне приемлемо.

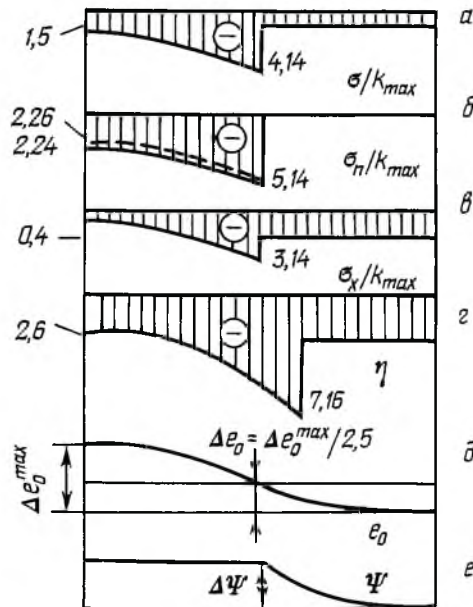


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние заготовки на контактной поверхности. Эпюры:  $\sigma$  (а),  $\sigma_n$  (б),  $\sigma_x$  (в),  $\eta$  (г),  $\Delta\epsilon_0$  (д),  $\Psi$  (е).

Из полученного решения видим, что переменное по глубине упрочнение поверхностного слоя приводит к тому, что максимум контактных давлений на инструмент находится в начальной точке контакта, а затем по ширине контакта уменьшается. Следует подчеркнуть, что данная закономерность проявляется лишь при обработке с малыми натягами заготовок с бесконечной толщиной стенки, когда деформацию в приконтактной области можно считать плоской. Такие же закономерности изменения нормальных контактных давлений отмечены в работах [6, 7]. Для более тонкостенных заготовок, наоборот, нормальные контактные давления увеличиваются от начала к концу зоны контакта [8].

Деформированное состояние в контактной зоне исследовали экспериментально методом делительных сеток [4]. Установлено, что деформированное состояние в контактной зоне не зависит от обрабатываемого материала и числа циклов деформирования, а также от величины натяга и определяется лишь геометрией рабочей части деформирующего инструмента. Наиболее интенсивно накопление интенсивности деформаций  $e_0$  происходит в самом начале контакта (рис. 3,д). Для угла конусности инструмента  $\gamma_{\text{и}} = 5$  град приращение  $e_0$  на обрабатываемой поверхности за один цикл деформирования равно  $\Delta e_0^{\text{max}} = 0,24$ , а для  $\gamma_{\text{и}} = 10$  град  $\Delta e_0^{\text{max}} = 0,39$ .

На участке перед инструментом накопленная за один цикл деформирования интенсивность деформаций  $e_0$  оказалась примерно равной  $\Delta e_0^{\text{max}} / 2,5$ .

Как видно из формулы (10), коэффициент жесткости напряженного состояния ( $\eta = 3\sigma / \sigma_0$ ) на контактной поверхности можно вычислить по формуле

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_i} = \frac{\sqrt{3}\sigma}{k} = \frac{\sqrt{3}}{k_{\text{max}}} (-4,14 k_{\text{max}} - 2,33 ax_k^3 - 3,07 bx_k^2 - 4cx_k). \quad (14)$$

Эпюра изменения значения  $\eta$  вдоль обрабатываемой поверхности показана на рис. 3,з. Перед инструментом оно составляет  $\eta = -1,73$ . Из рисунка видно, что под контактной поверхностью материал находится в условиях сильного объемного сжатия, что увеличивает пластичность деформируемого материала. Максимальное объемное сжатие наблюдается в самом начале контакта, где  $\eta = -7,16$ .

В качестве параметра пластичности был выбран известный критерий Колмогорова – ресурс использованной пластичности  $\Psi$ . Расчеты показали, что на втором участке под контактной поверхностью из-за высокой степени сжатия в начале контактной зоны и малой интенсивности деформаций в ее конце возрастания  $\Psi$  практически не происходит. Практически весь ресурс  $\Psi$  накоплен перед инструментом (рис. 3,е) при постоянном значении  $\eta = -1,73$ . Следовательно, для его расчета можно использовать простую зависимость, вытекающую из критерия пластичности Колмогорова:

$$\Psi = \frac{\Delta \bar{e}_0^{\max} N}{2,5 e_{\text{пр}}(-1,73)}, \quad (15)$$

где  $e_{\text{пр}}(-1,73)$  – пластичность материала при сжатии в условиях плоской деформации;  $N$  – число циклов деформирования.

Экспериментальное исследование поверхностного слоя при деформирующем протягивании [1] подтверждает, что разрушение начинается с образования поверхностных микротрещин с последующим разрушением поверхности – “шелушением”.

Предложенный метод применим лишь для случаев деформирующего протягивания существенно толстостенных заготовок. Он позволяет оценить пластичность слоев, которые лежат глубже первичного слоя текстуры, возникающей вследствие сжатия микронеровностей, и практически может представлять интерес при определении толщины слоя, удаляемого при черновых операциях и имеющего недопустимо малый ресурс остаточной пластичности. На основании выполненных исследований механики деформированного поверхностного слоя изучены основные законы его напряженного состояния и предложен способ оценки пластичности поверхности, обработанной многоцикловым деформирующим протягиванием.

При многоцикловом деформирующем протягивании толстостенных заготовок получена инженерная теоретическая модель напряженного состояния в зоне контакта инструмента с обрабатываемой деталью. Установлено, что неравномерное по глубине упрочнение поверхностного слоя приводит к неравномерному распределению контактных давлений, т.е. контактное давление уменьшается от начала к концу зоны контакта, а основной рост ресурса использованной пластичности происходит перед инструментом при постоянном коэффициенте жесткости  $\eta = -1,73$ . На основании анализа напряженного состояния в контактной зоне получена простая инженерная формула для определения одного из параметров качества – ресурса использованной пластичности  $\Psi$  по критерию Колмогорова.

## Резюме

Викладено результати досліджень особливостей зміцнення оброблюваної деталі при деформівному протягуванні. Отримані результати дозволяють прогнозувати якість оброблюваної поверхні при проектуванні технологічних процесів, які включають операції холодного вісесиметричного пластичного деформування.

1. Розенберг О. А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании. – Киев: Наук. думка, 1981. – 288 с.
2. Розенберг О. А., Цеханов Ю. А., Шейкин С. Е., Полотняк С. Б. Повышение работоспособности деформирующих протяжек с износостойкими покрытиями // Сверхтвердые материалы. – 1990. – Вып. 2. – С. 32 – 39.

3. *Соловьев О. В.* Предельные технологические параметры при деформирующем протягивании: Дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 1985. – 203 с.
4. *Ростоцкий Ю. С.* Работоспособность рабочих элементов протяжек, упрочненных электроискровым легированием: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1992. – 194 с.
5. *Кузнецов А. И.* Плоская деформация неоднородных пластических тел // Вестн. Ленинград. гос. ун-та. – 1958. – № 3. – С. 103 – 108.
6. *Друянов Б. А.* Вдавливание жесткого штампа в толстую неоднородную полосу // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – 1959. – № 3. – С. 161 – 166.
7. *Ольшак В., Рыхлевский Я., Урбановский В.* Теория пластичности неоднородных тел. – М.: Мир, 1964. – 82 с.
8. *Цеханов Ю. А.* Механика процесса деформирующего протягивания: Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 1974. – 164 с.

Поступила 22. 12. 98