

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ВЫСТУПА В ВИДЕ КОНУСА

Б. П. МИТРОФАНОВ, Г. А. РАХВАЛОВА, К. Н. ЦУКУБЛИНА

(Представлено научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

Вследствие волнистости и шероховатости поверхностей твердых тел их касание всегда дискретно.

Поэтому для аналитического определения деформации поверхностных слоев материала двух твердых контактирующих тел используют различные модели [1].

Модели поверхностных слоев материала обычно представляют осесимметричные выступы различной высоты, расположенные на жестком или деформирующемся основании.

Зная законы деформации единичного выступа, а также закон распределения выступов по высоте, возможно построение теории деформации шероховатой поверхности тела.

Рассмотрим некоторые экспериментальные и теоретические факты, полученные авторами при изучении пластической деформации отдельного выступа в виде конуса. Это позволит несколько уточнить закономерности деформации единичного выступа.

Известно, что конус является хорошим приближением к реальной форме выступов, существующих на поверхности [2, 3]. Нами испытывались конусы, изготовленные из сталей 3, 10, 20Х и имеющие, в основном, угол при основании 15° . Этот угол близок к углу наклона микрогеометрических элементов реального профиля с общим направлением поверхности [4].

При этом исследовались следующие вопросы.

Растекание материала и трение в плоскости контакта

При теоретическом исследовании осесимметричного напряженного состояния отдельного выступа поверхности, моделированного в виде усеченного конуса [3], растеканием материала и трением в плоскости контакта автор пренебрегает.

Для количественной оценки растекания материала в плоскости контакта нами были испытаны на сжатие конусы из ст. 3 с углом при основании от 75° до 15° .

Результаты опытов, представленные на рис. 1а, показывают, что растекание металла в плоскости контакта существует для данного конуса

только при определенных нагрузках. В пределах изменения сжимающей нагрузки большинство конусов показали, что диаметр контакта d_{ϕ} с ростом нагрузки сначала превосходит диаметр недеформированного конуса на той же высоте d_k , а затем становится меньше его. Последнее обстоятельство наиболее четко проявляется для конусов с углами при основании, меньшими 45° .

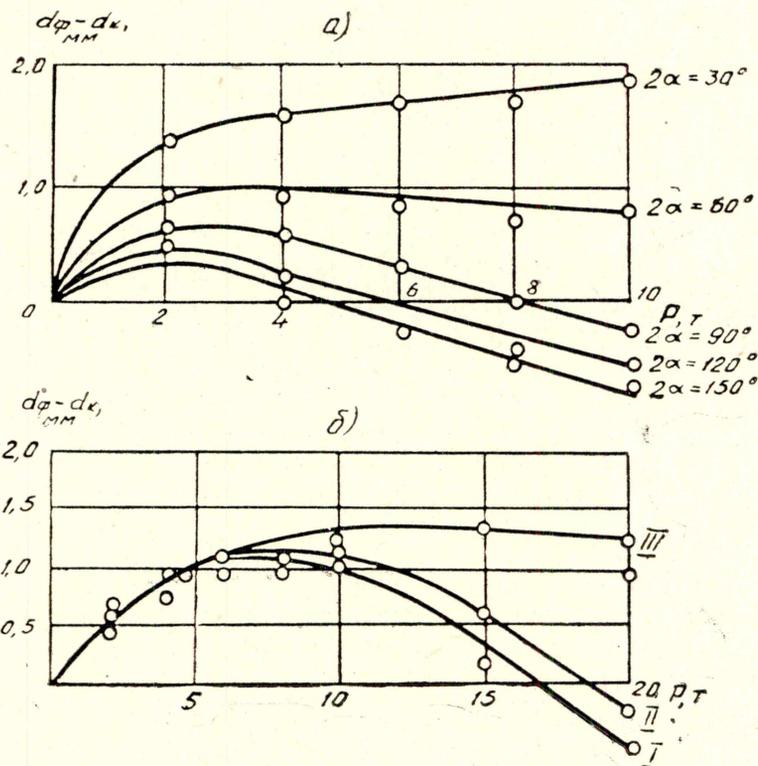


Рис. 1.

В некотором диапазоне нагрузок растекание металла увеличивает площадь фактического контакта по сравнению с геометрической на 40%.

Влияние трения на деформацию выступа исследовалось на конусах, выполненных из стали 20X, с углом при основании 30° .

В экспериментах трение уменьшалось при помощи свинцовых прокладок и смазки, состоящей из коллоидного графита и машинного масла.

Опыты показали, что в диапазоне нагрузок до 50 тонн трение для исследуемых конусов весьма незначительно изменяло диаметр контакта. Сжатие двух конусов, соединенных в вершине и составляющих одно целое, подтвердило этот результат (известно, что в данном случае контактное трение отсутствует).

Упрочнение материала конуса при сжатии

Основной особенностью пластической деформации металлов является ее неоднородность, сопровождаемая локализацией [5] в отдельных определенных местах очага трения. Геометрическая форма конуса увеличивает эффект локализации. Последняя неизбежно связана с локализацией упрочнения.

Для качественного определения характера проявления локализации упрочнения материала при пластической деформации конуса нами было проведено изучение изменения твердости по плоскостям, проходящим через диаметрально противоположные образующие. Конусы были сжаты различными усилиями, а затем разрезаны по указанным плоскостям. Плоскости тщательно полировались. Твердость замерялась на приборе

ТК-2 специально подобранным конусом из твердосплавного материала.

Типичное распределение твердости по плоскости разреза представлено на рис. 2. Следовательно, локальность пластической деформации конуса специфично выразилась в образовании зоны максимального упрочнения АВ.

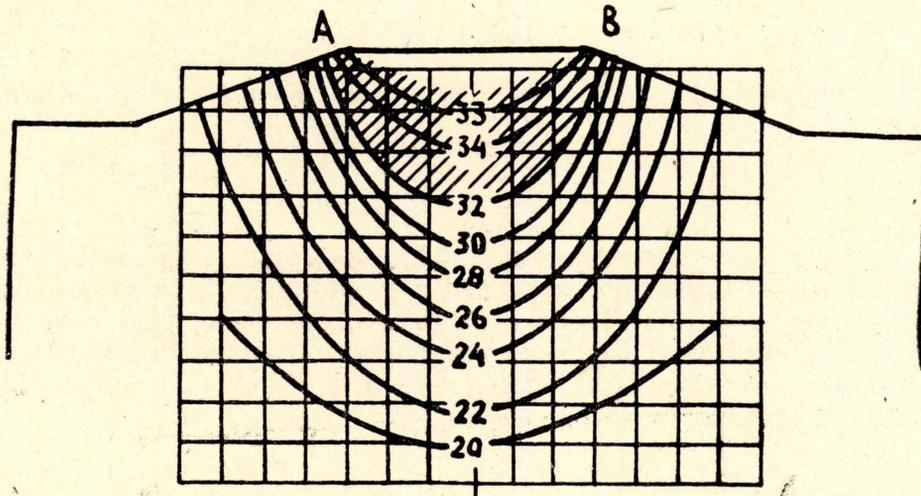


Рис. 2.

Аналогичное изменение упрочнения наблюдалось нами при замере микротвердости по разрезу продеформированного образца, моделировавшего тело с шероховатой поверхностью. Последняя получалась путем фрезерования стальной поверхности специальной фрезой. Множество пирамид, получаемых при этом, имитировали микронеровности поверхности.

Определим аналитически размеры зоны пластической деформации конуса. Охарактеризуем ее размером по оси конуса и назовем глубиной зоны пластической деформации.

Известно, что с возрастанием нагрузок в теле образуются области текучести, которые отграничиваются от упругой части тела поверхностями $\psi = \text{const} = \frac{1}{2G}$, где ψ — коэффициент пропорциональности

девиаторов напряжения и деформации. Используя непрерывность напряжений и деформаций на поверхности раздела упругой и пластической областей, найдем для конуса глубину зоны пластической деформации.

Для этого воспользуемся решением А. И. Лурье для упругой деформации конуса [6] и условием пластичности Мизеса.

Рассмотрим конус с углом раствора 2α , нагруженный силой P , приложенной к его вершине. Вершину конуса примем за начало сферической системы координат (z, ϑ, φ) . Для случая, когда сила действует вдоль оси конуса — вдоль оси z (при $P > 0$ конус сжат), имеем, согласно [6], следующие напряжения в точке с координатами $(z = R, \vartheta = 0, \varphi)$:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{Q(m-2)}{8\pi(m-1)R^2} \cdot \left(1 + \cos \alpha - \frac{4m-2}{m-2}\right); \\ \sigma_{\vartheta} &= \frac{Q(m-2)}{8\pi(m-1)R^2} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos \alpha}{2}\right); \\ \sigma_{\varphi} &= \frac{Q(m-2)}{8\pi(m-1)R^2} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos \alpha}{2}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$Q = \frac{4P(m-1)}{m(1-\cos^2\alpha) - (m-2)\cos\alpha(1-\cos\alpha)};$$

m — число Пуассона.

Условие пластичности Мизеса для той же точки запишется в виде

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \sigma_m. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) получаем для величины R следующее выражение:

$$R = \sqrt{\frac{1}{\sigma_m} \frac{Q(m-2)}{8n(m-1)} \left(\frac{1}{2} - \frac{4m-2}{m-2} + \frac{3}{2} \cos\alpha \right)}. \quad (3)$$

Сравнение глубин зон пластической деформации конусов ($2\alpha=140^\circ$), определенных по изучению твердости с теоретической глубиной, вычисленной по формуле (3), показано на рис. 3. Хорошее совпадение теоретических результатов с экспериментальными позволяет применять формулу (3) для аналитического определения глубины зоны пластической деформации конуса.

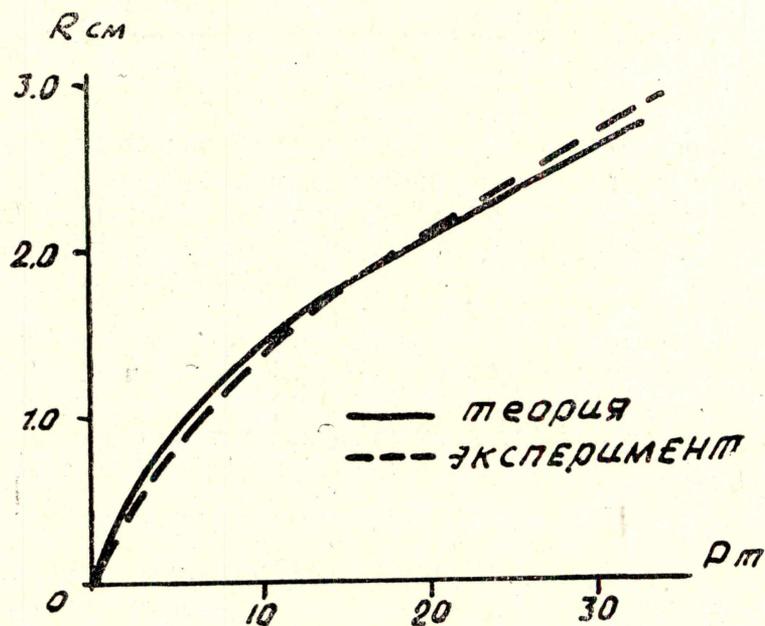


Рис. 3.

Анализ формулы (3) показывает, что глубина зоны пластической деформации с увеличением угла уменьшается.

Влияние основания конуса на его деформацию

Для определения влияния основания на деформацию выступа были испытаны конусы с различными по величине цилиндрическими основаниями. Графики зависимости между площадью контакта, укорочением конуса и осевой нагрузкой представлены на рис. 4.

Эти зависимости показывают, что влияние основания проявляется, начиная с некоторой нагрузки, и увеличивается затем с ростом последней.

Интересно заметить, что нагрузка, при которой начинает проявляться влияние основания, определяется моментом достижения верхнего уровня основания зоной пластической деформации. Следовательно, зная

высоту конуса, можно, используя уравнение (3), определить величину этой нагрузки, полагая при этом величину R равной высоте выступа. Отметим, что в опытах С. Б. Айнбиндера влияние основания на деформацию конуса не было обнаружено. Это можно объяснить тем, что в опытах С. Б. Айнбиндера [2] испытывались образцы с большой высотой конической части при сравнительно небольших усилиях.

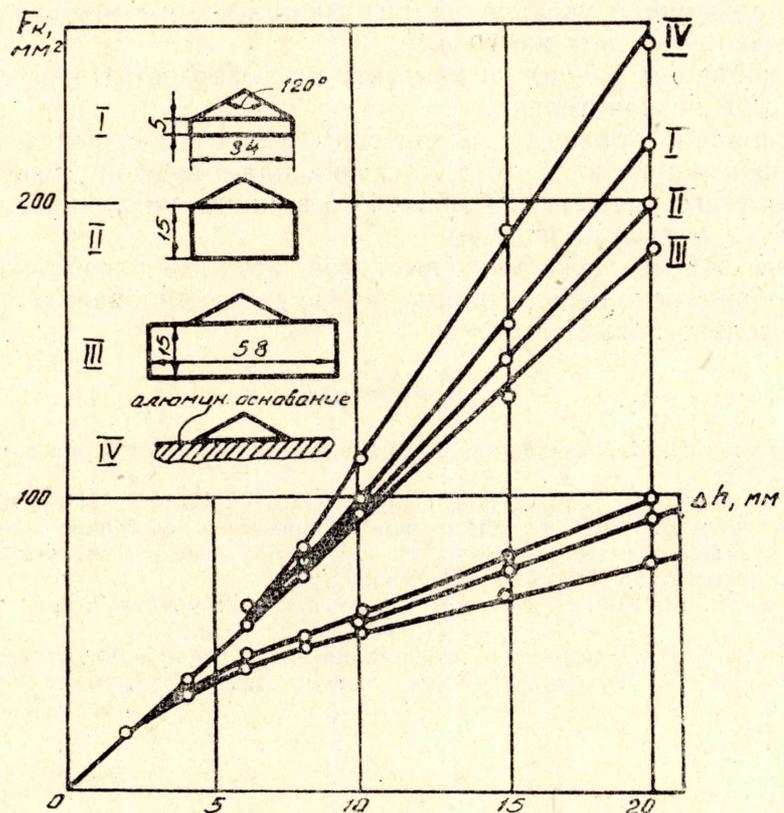


Рис. 4.

Характерным для конусов с массивными основаниями является факт постоянства среднего контактного напряжения, которое в наших опытах равнялось 3,3 предела текучести при растяжении.

Кроме того, влияние основания проявляется в увеличении диапазона нагрузки, при которой происходит растекание металла по контакту. Отметим, что в процессе деформирования растекание материала для образцов с массивными основаниями становится почти постоянным (рис. 1, б) после того, как зона пластической деформации достигнет верхнего уровня основания.

Проявлением влияния основания будет и значительное повышение сопротивления деформированию единичного выступа, которое наблюдается, если на общем основании одновременно сжимать несколько выступов.

Для количественной оценки этого явления были испытаны образцы, представляющие конусы на цилиндрических основаниях. Вокруг конуса вытачивался треугольный кольцевой выступ. Оказалось, что при равенстве сил, сжимающих конусы, наличие треугольного кольцевого выступа, деформируемого одновременно с конусом, уменьшало площадь контакта последнего на 50—70% по сравнению с площадью контакта одиночного конуса.

Дополнительно к этому осуществлялось вдавливание 3 закаленных шариков $d = 8$ мм в плоскую поверхность стального образца. Уменьше-

ние расстояния между шариками снижало величину их внедрения. В опытах с шариками, касающимися друг друга и расположенными на расстояниях $3d$, разница во внедрениях составила 30%.

Перечисленные экспериментальные факты позволяют сделать следующие выводы:

1. Растекание металла по контакту, сжимаемого по оси конуса, с увеличением нагрузки сначала растет, а затем уменьшается до нуля.

При дальнейшем увеличении нагрузки площадь контакта становится меньше сечения на том же уровне.

2. Влияние сил трения по контакту на деформацию конусов с углом раствора 120° незначительно.

3. Основание образца с коническим выступом существенно влияет на его деформацию после того, как зона пластической деформации достигнет верхнего уровня основания. Это влияние увеличивает сопротивление конуса деформированию.

4. При сжатии нескольких выступов, которые расположены рядом и имеют общее основание, сопротивление деформированию каждого из них значительно повышается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демкин Н. Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. Изд. АН СССР, 1962.
2. Айнбиндер С. Б. Холодная сварка металлов. Изд-во АН Латв. ССР, 1957.
3. Марочкин В. Н. Осесимметричное напряженное состояние зоны фактического контакта шероховатых поверхностей в условиях полной пластичности. Автореферат канд. диссертации, ИМ АШ АН СССР, 1958.
4. Левин Б. М. Контактный метод измерения микрогеометрии поверхности. Mashgiz, 1950.
5. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов. т. 1, Металлургиздат, 1961.
6. Лурье А. И. Пространственные задачи теории упругости. Гостехиздат, М., 1955.