

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ОСАДКЕ ПРИЗМ ИЗМЕРЕНИЕМ ТВЕРДОСТИ

Э. С. ВАКСМАН, Г. Д. ДЕЛЬ, Л. М. СЕДОКОВ

(Представлена к печати научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

Осадка призм между параллельными плитами является распространенной операцией в обработке металлов давлением. В результате действия сил трения на контактных поверхностях в процессе осадки создается неоднородное поле напряжений и деформаций. Знание характера распределения и величины напряжений представляет большой интерес, так как позволяет изучить целый ряд вопросов, связанных с указанной технологической операцией (выяснение и устранение причин трещинообразования в заготовках, оценка остаточных напряжений, расчет инструмента на прочность и т. д.).

Л. Прандтлем [1], методами теории идеально-пластичных тел получено аналитическое решение рассматриваемой задачи, развитое в дальнейшем В. В. Соколовским [2], Л. Д. Томленовым и др. В результате этих исследований получены формулы для расчета усилий при осадке, построены эпюры контактных напряжений. Е. П. Унксовым [3] экспериментально определено нормальное контактное напряжение, а также поляризационно-оптическим методом установлено распределение напряжений по поперечному сечению полосы. В последнем случае предполагалось, что качественно картина распределения напряжений при упругой и пластической осадке одинакова.

В настоящей работе приводятся результаты исследования напряженного состояния при осадке призмы из упрочняющегося материала, выполненного измерением твердости [5]. При этом было определено напряженно-деформированное состояние по поперечному сечению призмы, построены эпюры контактных напряжений и исследовано влияние упрочняемости материала на напряженное состояние. Известно, что при больших отношениях длины призмы к ширине в средней ее части при осадке деформация является плоской. Для уточнения области плоской деформации испытывались четыре образца с размерами поперечного сечения  $15 \times 15$  мм и длинам 15, 30, 75 и 150 мм.

С этой целью на контактной поверхности призм вдоль оси симметрии были накернены точки через 4 мм, после чего образцы осаживались на 10%. Измерение расстояния накерненными точками после осадки дало возможность определить осевую деформацию  $e_z$ . Было установлено, что на расстоянии, равном одной высоте от торцев, осевая деформация практически отсутствует.

С учетом этого для основной серии были приняты призмы квадратного сечения со стороной 24 мм и длиной 77 мм, изготовленные из

нержавеющей стали X18H9T ( $\sigma_T = 26 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\sigma_{пч} = 62 \text{ кг/мм}^2$ ). Выбор материала объясняется высокой упрочняемостью этой стали. Исследовались два образца, подвергнутые осадке на 10% и 30%. Осаженные образцы разрезались в среднем по длине сечения. В полученном сечении после полировки измерялась твердость алмазной пирамидой под нагрузкой 20 кг.

Твердость измерялась в 80—100 точках. Результаты измерения твердости были усреднены и проведены изоскляры, показанные на правой половине рис. 1. Вследствие симметрии призмы расчет выполнялся для одной четверти сечения.

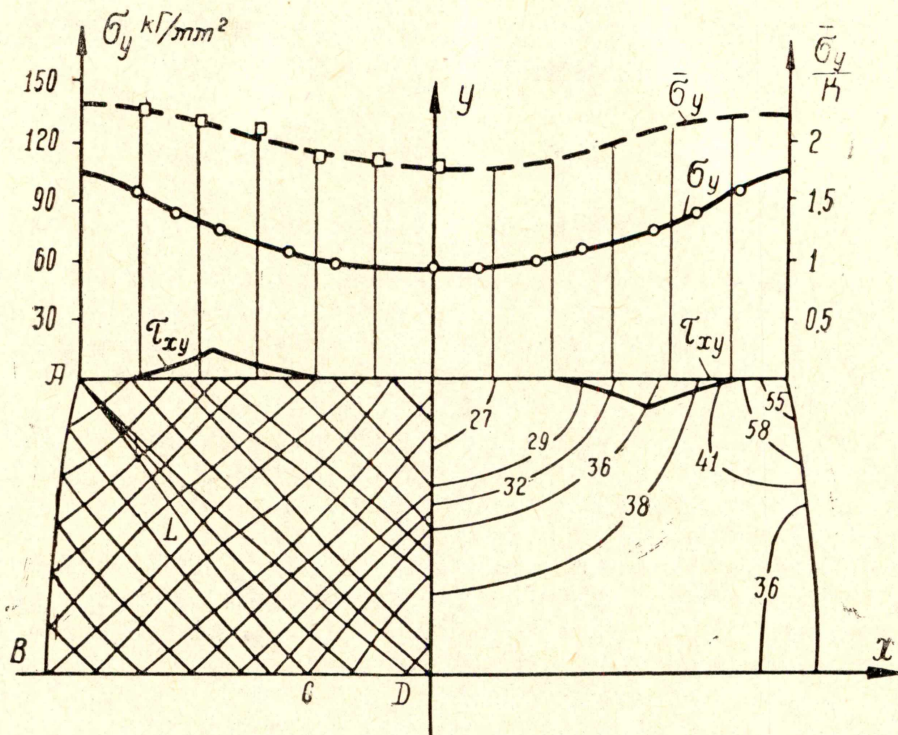


Рис. 1. Эпюры контактных напряжений, сетка линий скольжения и изоскляры при осадке 10%:  $\circ$  — для стали X189T,  $\square$  — для идеально-пластического материала.

Предварительно был получен тарировочный график, связывающий твердость с интенсивностями касательных напряжений и деформаций. Он был построен по результатам испытания исследуемой стали на осевое сжатие. С этой целью девять цилиндрических образцов с отношением высоты к диаметру, равным 1,5, были осажены в условиях тщательной смазки до деформаций различной степени. Твердость измерялась в меридиальном сечении, после полировки.

С помощью тарировочного графика по распределению твердости в осаженных призмах была определена функция  $\kappa(xy)$  для каждого из образцов.

Результаты измерения твердости расшифрованы методом, описанным в работе [5]. При расшифровке в области  $ABL$  (рис. 1) решалась задача Коши, в области  $ACD$  решалась начальная характеристическая задача, в остальных областях решались смешанные задачи. Граничные условия при расшифровке были приняты следующие: боковая поверхность свободна от нагрузки, вдоль осей симметрии угол наклона линий скольжения равен  $45^\circ$ , трением в точке  $A$  (рис. 1) на контактной поверх-

ности пренебрегалось. В результате решения получены сетка линий скольжений, показанная на левой половине рис. 1, эпюры напряжений. Для большей осадки эпюры напряжений для вертикальной оси симметрии построить не удалось ввиду недостаточности граничных условий. По этой же причине напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  для горизонтальной оси симметрии не были определены в области, близкой к центру сечения.

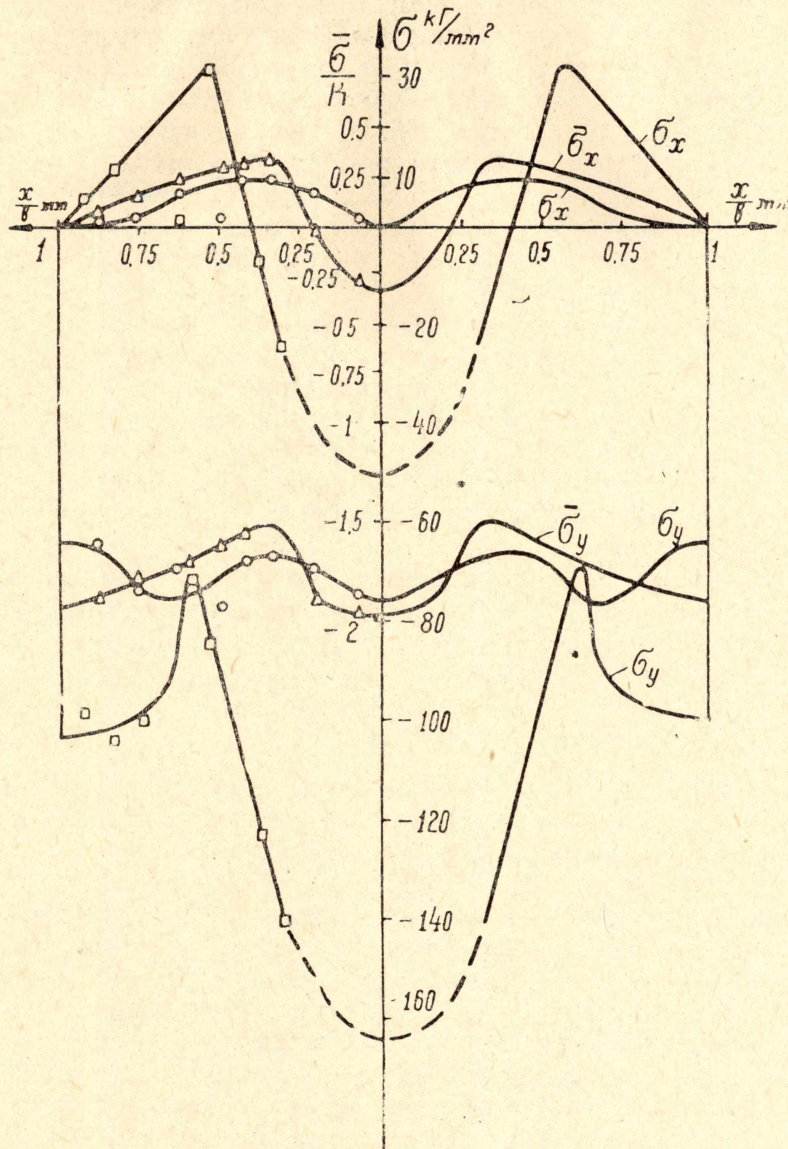


Рис. 2. Эпюры главных напряжений вдоль горизонтальной оси симметрии:  $\circ$  — осадка 10%,  $\square$  — осадка 30%,  $\triangle$  — для идеально-пластического материала.

Эта часть эпюры была достроена по аналогии с меньшей осадкой и показана на графике пунктиром.

Эпюры  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  вдоль горизонтальной оси симметрии показаны на рис. 2. Они не являются монотонными и имеют по два местных экстремума. При меньшей осадке максимумы не ярко выражены, в особенности у эпюры  $\sigma_y$ , но с увеличением степени осадки выражаются очень резко. При этом также происходит смещение экстремумов вдоль горизонтальной оси. При меньшей осадке они располагаются

на расстоянии  $\frac{1}{3} b$  от края сечения (где  $b$  — ширина призмы), а при большей осадке — на расстоянии  $\frac{1}{4} b$ . При осадке 10% напряжение  $\sigma_x$  во всех точках растягивающее. С увеличением степени осадки оно меняет знак в центре образца, и там создается напряженное состояние трехосного сжатия. Эпюры  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  отличаются от эпюр, полученных при исследовании напряженного состояния поляризационно-оптическим методом [3]. Различие состоит в наличии резко выраженного максимума при большой степени осадки и местных экстремумов.

Эпюры  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  вдоль вертикальной оси симметрии при меньшей осадке показаны на рис. 3. Эпюры напряжений не монотонны, напряжение  $\sigma_x$  дважды меняет знак. Оно положительно на контактной поверхности и в центре сечения. По характеру эпюры не совпадают с эпюрами, полученными Е. П. Унковым [3]. В исследовании поляризационно-оптическим методом напряжение  $\sigma_x$  монотонно уменьшается к центру, оставаясь отрицательным вдоль всей оси, а  $\sigma_y$  незначительно увеличивается к центру. Вдоль вертикальной оси напряженное состояние везде однородное.

При расшифровке результатов измерения твердости  $u$  образца, осаженного на 10%, удалось получить эпюры контактных напряжений, представленные на рис. 1. Кривая нормальных напряжений  $\sigma_y$  имеет вогнутый характер с минимумом на оси симметрии, в то же время согласно исследованию [3] оно в этой точке имеет максимальное значение. Однако анализ результатов исследования [3] показывает, что с уменьшением отношения ширины образца к его высоте эпюра  $\sigma_y$  все более выравнивается.

Было предложено, что полученный вогнутый характер эпюры  $\sigma_y$  определяется упрочняемостью материала. Для проверки этого предположения был осуществлен расчет для идеально-пластического материала при той же форме границ. Распределение  $\sigma_y$  для этого случая показано пунктиром на рис. 1 в масштабе  $\frac{\sigma_y}{k}$ , где  $k$  — интенсивность

касательных напряжений — одинаковая в каждой точке. Оказалось, что эпюра  $\sigma_y$  значительно выпрямляется. Некоторая вогнутость, очевидно, объясняется криволинейностью бокового контура.

Ранее А. Д. Томленовым [4] методом линий скольжения была построена эпюра нормального контактного напряжения для образцов с небольшим отношением ширины к высоте. Эпюра, полученная нами для идеально-пластичного материала, очень хорошо совпадает с последней.

Контактное касательное напряжение  $\tau_{xy}$  увеличивается с 0 на некотором расстоянии от края сечения до максимума, затем падает до 0 на расстоянии  $\frac{1}{6} b$  от центра. Эпюра  $\tau_{xy}$  совпадает с эпюрой, полученной Е. П. Унковым [3] при плоской осадке свинцового образца.

Расчет деформирующего усилия, выполненный по эпюрам  $\sigma_y$  на горизонтальной оси симметрии для обоих осадок и по эпюре  $\sigma_y$  на контактной поверхности для осадки 10%, показал, что расчетное деформирующее усилие во всех случаях завышено по сравнению с фактическим соответственно на 7%, 5% и 10%.

Такая сравнительно небольшая погрешность указывает на достаточно высокую точность выполненного расчета.

В случае плоской деформации по твердости можно определить деформированное состояние вдоль осей симметрии [6]. На рис. 3 представлены эпюры деформаций  $e_x = -e_y$ . Деформации монотонно возрастают к центру образца. Для проверки производилось сравнение средней деформации для вертикальной и горизонтальной осей симметрии при обеих степенях осадки с деформацией, найденной по изменению

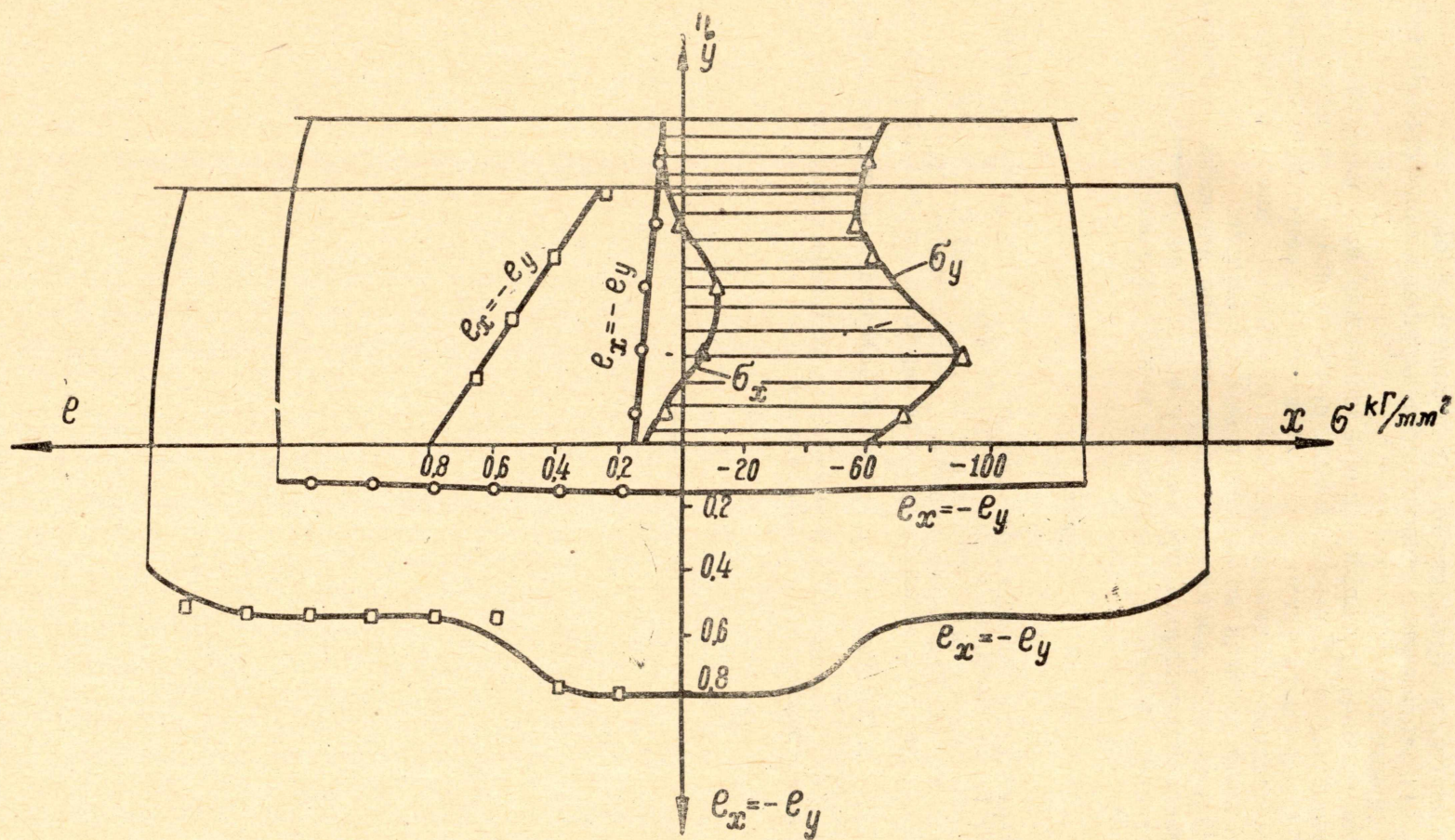


Рис. 3. Эпюры главных напряжений вдоль вертикальной оси симметрии при осадке 10% и эпюры главных деформаций по осям симметрии при осадке 10 и 30%:  $\circ$  — осадка 10%,  $\square$  — осадка 30% (для эпюр деформаций),  $\triangle$  — для эпюр напряжений.

размеров поперечного сечения. Для меньшей осадки средняя деформация оказалась завышенной на 30%, в то время как для большей осадки она совпадает с действительной. Это можно объяснить тем, что точность метода исследования деформированного состояния по распределению твердости в области средних осадок (20%—30%) большая и сравнительно мала в области малых деформаций [6].

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Напряженно-деформированное состояние при плоской осадке призм неоднородно. При небольших степенях осадки в центральной части образца имеет место разноименное напряженное состояние. С ростом степени осадки напряжение  $\sigma_x$  меняет знак в центре на отрицательный и здесь возникает трехосное сжатие.

2. Напряженное состояние зависит от упрочняемости материала. Одноименное напряженное состояние у более упрочняемого материала наступает при меньшей осадке, чем у менее упрочняемого.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Прандтль. Примеры применения теоремы Генки к равновесию пластических тел. Сб. Теория пластичности. Изд. АН СССР, 1946.
  2. В. В. Соколовский. Теория пластичности. Изд. АН СССР, 1946.
  3. Е. П. Унксов. Инженерная теория пластичности. Машгиз, 1951.
  4. А. Д. Томленов. Механика процессов обработки металлов давлением. Машгиз, 1963.
  5. Г. Д. Дель. Исследование пластической деформации измерением твердости, Изв. ТПИ, т. 138, 1965.
  6. Г. Д. Дель. Определение деформированного состояния в пластической области по распределению твердости, (настоящий сборник).
-