

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Ю. И. ЯГН и И. А. ЧАПЛИНСКИЙ

О СОПРОТИВЛЕНИИ МЕТАЛЛОВ
ПЛАСТИЧЕСКОМУ ДЕФОРМИРОВАНИЮ

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 20 IV 1953)

В данной работе сообщаются основные результаты испытаний металлов на сложное напряженное состояние при простом нагружении⁽¹⁾ и получившиеся на основе этих испытаний выводы о сопротивлении металлов при больших пластических деформациях.

Испытанию подвергались следующие материалы: технически чистое железо, сталь 25 (зерна феррита 75% и перлита 25%), сталь 30ХГСА (специальный сорбит отпуска) и алюминиевая бронза (подвергавшаяся термической обработке — закалке в воде). Каждый материал испытывался на линейное растяжение и сжатие, стесненное сжатие (сжатие с устранением поперечной деформации в одном направлении), двухосное равное сжатие и трехосное сжатие с двумя равными напряжениями и третьим напряжением в два раза меньшей величины.

Кривая линейного растяжения с начала образования шейки образца корректировалась по формуле Н. Н. Давиденкова и Н. И. Спиридоновой⁽²⁾.

При всех видах сжатия достигалось практически полное устранение сил трения по плоскостям, передающим сжимающие усилия, путем применения в процессе испытания многократной смазки образца говяжьим жиром.

На рис. 1А представлены кривые, построенные для стали 30ХГСА в координатах, отвечающих теории наибольших касательных напряжений: $\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3$, $\bar{e}_1 - \bar{e}_3$, где $\bar{\sigma}_1$ и $\bar{\sigma}_3$ — величины наибольшего и наименьшего главных истинных напряжений, а \bar{e}_1 и \bar{e}_3 — величины соответствующих главных истинных деформаций. На рис. 1Б для той же стали представлены кривые, связывающие интенсивность истинных напряжений $\bar{\sigma}_i$ и интенсивность главных истинных деформаций \bar{e}_i , которые вычислялись по известным формулам:

$$\bar{\sigma}_i = \sqrt{1/2 [(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2)^2 + (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_3)^2 + (\bar{\sigma}_3 - \bar{\sigma}_1)^2]};$$

$$\bar{e}_i = \sqrt{2/9 [(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2]}.$$

Истинные напряжения и деформации находились по соотношениям:

$$\bar{\sigma}_{1,2,3} = \sigma_{1,2,3} (1 + \epsilon_{1,2,3});$$

$$\bar{e}_{1,2,3} = \ln (1 + \epsilon_{1,2,3}),$$

где $\sigma_{1,2,3}$ — условные напряжения, $\epsilon_{1,2,3}$ — условные деформации.

Кривые на рис. 1 А и 1 Б не совпадают. Аналогичный результат получается и для других испытанных металлов. Однако в координатах $\bar{\sigma}_1 - \bar{e}_1$ расхождения между кривыми оказываются меньше, чем в координатах $\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3$ и $\bar{e}_1 - \bar{e}_3$, отвечающих теории максимальных касательных напряжений. При этом в координатах $\bar{\sigma}_1 - \bar{e}_1$ значительные расхождения между кривыми получаются только у стали 30ХГСА и алюминиевой бронзы, имеющих неравновесную структуру, а в координатах $\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3$ и $\bar{e}_1 - \bar{e}_3$ кривая 3, отвечающая стесненному сжатию,

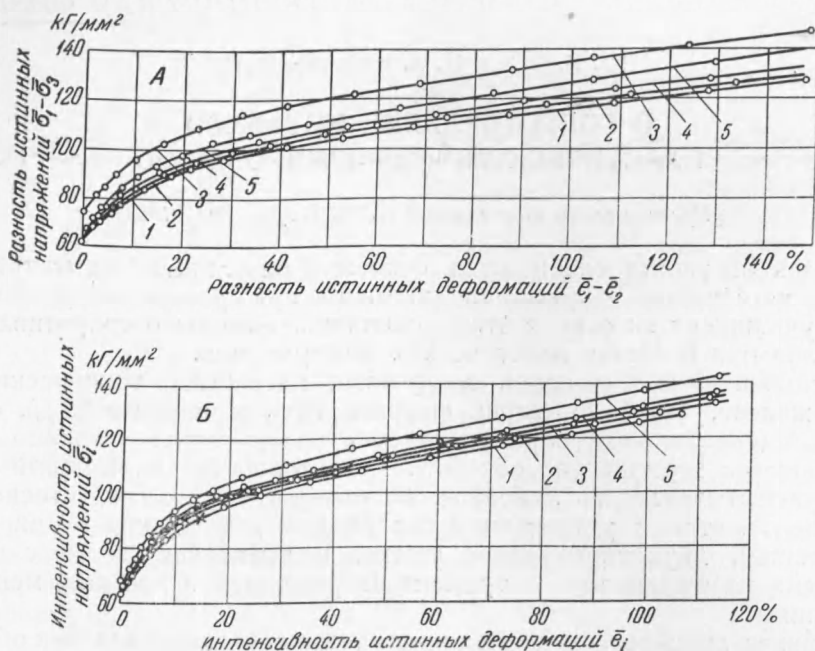


Рис. 1. Кривые пластического деформирования стали 30ХГСА (термическая обработка — закалка и средний отпуск). 1 — линейное растяжение ($\bar{\sigma}_1 > 0, \bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 = 0$); 2 — линейное сжатие ($\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_2 = 0, \bar{\sigma}_3 < 0$); 3 — стесненное сжатие ($\bar{\sigma}_1 = 0, \bar{\sigma}_2 = 0,5 \bar{\sigma}_3 < 0$); 4 — двухосное сжатие ($\bar{\sigma}_1 = 0, \bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 < 0$); 5 — трехосное сжатие ($\bar{\sigma}_1 = 0,5 \bar{\sigma}_2 = 0,5 \bar{\sigma}_3 < 0$)

при котором все главные напряжения различны по величине, значительно отклоняется от остальных кривых и для двух других металлов: технически чистого железа и стали 25, обладающих равновесной структурой. Здесь, несомненно, выступает недостаточность теории наибольших касательных напряжений, не учитывающей влияния промежуточного главного напряжения. Безуспешной оказалась также попытка привести кривые к совмещению при помощи координат, отвечающих теории Мора, которая также не учитывает промежуточного главного напряжения.

Ввиду изложенного для дальнейшей обработки использовались только кривые, построенные в координатах $\bar{\sigma}_1 - \bar{e}_1$. На рис. 2 изображены такие кривые для технически чистого железа. Для стали 25 характер расположения кривых и степень расхождения между ними получились приблизительно такими же. Кривые для алюминиевой бронзы прошли со значительно большими расхождениями между ними (несколько превосходящими расхождения между кривыми для стали 30ХГСА), причем расположились в обратном порядке.

Во всех случаях рассмотрение кривых убеждает в наличии влияния на сопротивление пластическому деформированию (на вели-

чину $\bar{\sigma}_i$) величины шаровой части тензора напряжений, представляющей среднее нормальное напряжение в материале. Вместе с тем не наблюдается сколько-нибудь заметного влияния на расположение кривых со стороны вида девиатора напряжений при получавшихся углах вида $\pm \frac{\pi}{6}$ и 0, отвечающих сохранению подобия девиаторов.



Рис. 2. Кривые пластического деформирования технического чистого железа (термическая обработка — отжиг). Обозначения кривых те же, что на рис. 1

Сопротивление деформированию во всех случаях, за исключением алюминиевой бронзы, возрастает с увеличением сжимающего среднего нормального напряжения. Сопротивление алюминиевой бронзы, наоборот, уменьшается при возрастании сжимающего среднего нормального напряжения. Исключительное поведение алюминиевой бронзы уже отмечалось в литературе (3).



Рис. 3. Кривые пластического деформирования стали 30ХГСА при линейном учете влияния величины шаровой части тензора. 1 — линейное сжатие; 2 — линейное растяжение и стесненное сжатие; 3 — двухосное сжатие и трехосное сжатие. $\bar{\sigma}_i \text{ прив} = \bar{\sigma}_i + A \bar{\sigma}_{ш}$, $A = +0,0377$

Обработка диаграмм показала, что влияние шаровой части $\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ тензора напряжений на сопротивление материала пластическому деформированию близко к линейному закону. Ввиду этого для исследованных случаев влияние шаровой части тензора напряжений можно учесть с достаточной для практики точностью путем добавления к интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ слагаемого $A\bar{\sigma}$ (с постоянной для данного материала величиной коэффициента A), т. е. записывая критерий пластичности в форме:

$$\bar{\sigma}_i \text{ прив} = \varphi(e_i),$$

где $\bar{\sigma}_i \text{ прив}$ — приведенная интенсивность напряжений, равная $\bar{\sigma}_i + A\bar{\sigma}$, а $\varphi(e_i)$ — функция интенсивности деформаций, остающаяся одинаковой при всех видах напряженного состояния в данном материале. Такой критерий отвечает теории прочности Ю. И. Ягна (4), если предель-

ная поверхность в пространстве напряжений является конусом, описанным вокруг пирамиды теории Мора.

Кривые, построенные в указанных координатах для стали 30ХГСА и для технически чистого железа, изображены на рис. 3 и 4. Расхождения между кривыми невелики. Приведение кривых к более точному совпадению может быть достигнуто с помощью применения полной квадратичной зависимости Ю. И. Ягна (4). Однако можно счи-



Рис. 4. Кривые пластического деформирования технически чистого железа при линейном учете влияния величины шарового тензора. 1 — все пять кривых (линейное растяжение, линейное сжатие, стесненное сжатие, двухосное сжатие, трехосное сжатие) совпали в одну; 2 — линейное растяжение и линейное сжатие; 3 — стесненное сжатие, двухосное сжатие и трехосное сжатие. $\bar{\sigma}_i \text{ прив} = \bar{\sigma}_i + A\bar{\sigma} = +0,0393$

тать, что практически вполне достаточной является линейная форма учета влияния $\bar{\sigma}^*$.

Предложенный критерий $\bar{\sigma}_i + A\bar{\sigma} = \varphi(\bar{\epsilon}_i)$ указывает наиболее простой путь для построения решений задач в области развития больших пластических деформаций тел при наличии влияния среднего нормального напряжения на сопротивление материала деформированию.

Поступило
7 III 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. А. Чаплинский, Автореферат диссертации, Исследование расхождений между кривыми пластического деформирования металлов, 1952. ² Н. Н. Давиденков, Н. И. Спиридонова, Зав. лаб., № 6, 583 (1945). ³ С. И. Ратнер, Автореферат диссертации, Прочность и пластичность металлов в связи со структурой, Л., 1951. ⁴ Ю. И. Ягн, Вестн. инж. и техн., № 6 (1931). ⁵ Н. Н. Давиденков, там же, № 4 (1947).

* На возможность линейного учета влияния среднего давления в материале, но при сопротивлении срезу, выражаемом максимальным касательным напряжением, указывал Н. Н. Давиденков (5).