

ИЗМЕНЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ НЕМОНОТОННОМ
НАГРУЖЕНИИ

Г. Д. ДЕЛЬ, В. А. ОГОРОДНИКОВ

(Представлена кафедрой сопротивления материалов)

При исследовании напряженно-деформированного состояния в пластической области методом измерения твердости [1, 2, 3] предполагается, что зависимость «интенсивность напряжений σ_i — твердость H — интенсивность пластической деформации e_i » является единой для различных напряженных состояний. Выражается это в распространении тарировочного графика « σ_i — H — e_i », построенного путем испытания ма-

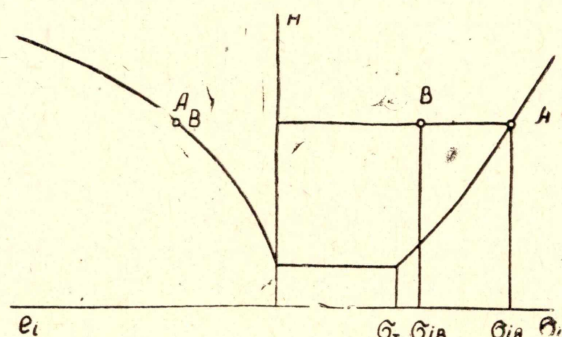


Рис. 1.

териалов на растяжение, сжатие или кручение и измерения твердости деформированных образцов, на различные процессы пластического деформирования. Уже из расхождения кривых течения σ_i — e_i при некоторых путях нагружения следует, что указанная зависимость не может быть универсальной.

Наибольшего расхождения с тарировочной кривой следует ожидать при немоно-

тонном нагружении с промежуточной разгрузкой. На рис. 1 приведен тарировочный график, характерный для пластических металлов. Твердость измеряется после разгрузки, поэтому упругое деформирование не ведет к ее изменению. Следствием последнего является горизонтальный участок на правой ветви графика, соответствующий изменению напряжений от нуля до предела текучести. В последующем пластическая деформация сопровождается монотонным возрастанием твердости.

Если же после растяжения до точки А разгрузить образец и сжать его в направлении предшествовавшего растяжения, то пластическое состояние наступит при напряжении σ_{iB} , меньшем σ_{iA} . Твердость же остается равной H_A , так как при переходе из точки А в точку В деформация оставалась упругой. Таким образом, точка В, относящаяся к пластическому состоянию, не лежит на кривой ОА, и график σ_i — H не оказывается единым для всей пластической области.

Цель настоящей работы — выяснение закономерности изменения твердости при дальнейшей пластической деформации во втором направлении и исследование возможности применения метода измерения твер-

дости при изучении технологических процессов, сопровождающихся не-монотонным нагружением металла.

В работах, посвященных изучению эффекта Баушингера [4], наибольшее уменьшение предела текучести наблюдалось при кручении закрученного образца в обратном направлении. При этом указывается, что отношение касательных напряжений при кручении в прямом и обратном направлении вначале уменьшается с возрастанием предварительной деформации и при достижении ею около 2% составляет примерно 2,5. При дальнейшем увеличении этой деформации указанное отношение остается примерно постоянным.

С учетом изложенного были проведены испытания тонкостенных трубчатых образцов на кручение. Трубки с внешним диаметром 30 мм и толщиной стенки 1 мм были изготовлены из стали 20. Одна из них была закручена до потери устойчивости, другая деформировалась до $e_i = 0,035$ и затем закручивалась в обратном направлении. Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ составил при этом 0,65 от напряжения, предшествовавшего разгрузке. Кручение производилось с рядом промежуточных разгрузок для измерения твердости. Твердость измерялась алмазной

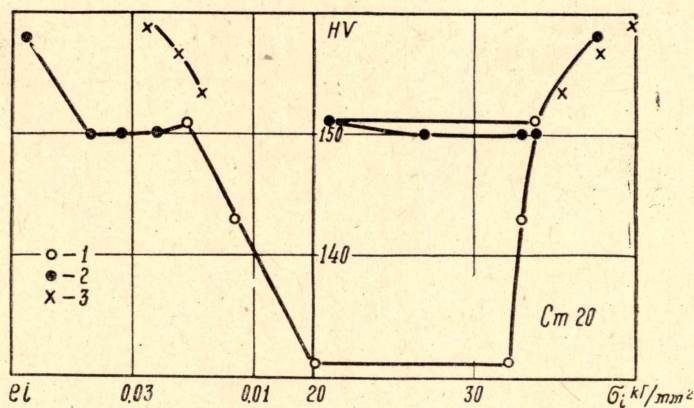


Рис. 2. Кручение трубки в прямом и обратном направлении. 1 — кручение в прямом направлении; 2 — кручение в обратном направлении; 3 — тарировочная кривая

пирамидой под нагрузкой 30 кг в десяти точках наружной поверхности. Среднее этих измерений сопоставлено на рис. 2 с интенсивностью напряжений и деформаций, определяемых по соотношениям:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3} M}{2\pi R_{cp}^2 t}, \quad e_i = \frac{\varphi R_{cp}}{l\sqrt{3}}, \quad (1)$$

где M — крутящий момент, R_{cp} и t — средний радиус и толщина трубки, φ — угол закручивания, измерявшийся зеркальным тензометром на базе $l = 100$ мм.

Полученные результаты показывают, что пластическое кручение в обратном направлении сопровождается ничтожно малым уменьшением твердости. После достижения напряжений, предшествовавших разгрузке, кривая $\sigma_i - H$ совпадает с кривой, полученной при простом нагружении. Кривая же $e_i - H$ несколько смещена относительно тарировочного графика.

Для проверки этих выводов при больших деформациях и других путях нагружения были проведены опыты по кручению растянутых образцов, сжатию после растяжения и сжатию образцов в направлении, перпендикулярном предварительному сжатию. Испытывались отоженные образцы из Ст. 3.

Испытания на кручение производились по методике, предложенной В. И. Максаком [5]. Согласно этой методике закручиваются два цилиндрических образца несколько отличающихся диаметров. Разность крутящих моментов при одном и том же угле закручивания относится за счет условной трубки, дополняющей меньший образец до образца большего диаметра. Интенсивность напряжений определяется по формуле:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}(M_1 - M_2)}{2\pi \left(\frac{R_1 + R_2}{2}\right)^2 (R_1 - R_2)}, \quad (2)$$

где M — крутящий момент, а R — радиус образца. Индекс 1 относится к образцу большего диаметра, а 2 — к меньшему образцу.

До закручивания образцы с диаметрами 17 и 20 мм растягивались до истинной деформации 0,02 (пара образцов № 4), 0,06 (№ 5), 0,1 (№ 6), 0,17 (№ 7). После разгрузки в трех точках цилиндрической поверхно-

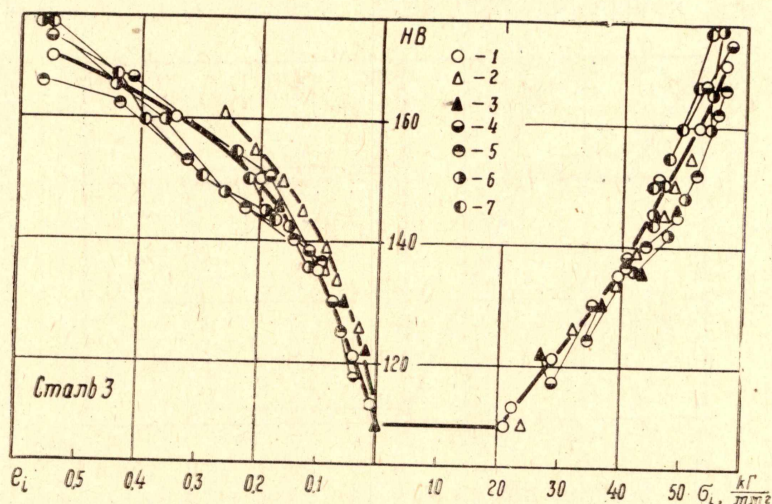


Рис. 3. Кручение растянутых образцов. 1, 2 — тарировочные кривые (1 — кручение, 2 — растяжение перед кручением, 4, 5, 6, 7 — кручение после растяжения)

сти измерялась твердость НВ шариком с диаметром 5 мм под нагрузкой 250 кг. Диаметры отпечатков измерялись на инструментальном микроскопке с точностью $\pm 0,01$ мм. Твердость определялась как среднее шести испытаний на каждой паре образцов.

Закручивание производилось ступенями. После каждой ступени деформации производились измерения твердости. Полученные результаты показаны на фиг. 5. Интенсивность деформации e_i определялась как сумма деформации при растяжении и всех предыдущих ступенях закручивания. На том же рисунке приведены и тарировочные кривые, построенные по результатам испытания на кручение (образцы № 1) и растяжение (№ 2).

Результаты этих опытов подтверждают сделанные ранее выводы: кривые $\sigma_i - N$ практически совпали, а кривые $e_i - N$ при сложном нагружении несколько сместились влево относительно тарировочных графиков.

Для испытания на сжатие после растяжения были изготовлены и растянуты 4 цилиндрических образца диаметром 20 мм. Их деформация составила 0,023 (образец № 2), 0,064 (№ 3), 0,12 (№ 4), 0,14 (№ 5). Из растянутых образцов было нарезано по 5—6 цилиндров

с высотой, равной диаметру. На их торцах измерялась твердость НВ, по которой с учетом напряжений и деформаций при растяжении был построен тарировочный график (рис. 4). Цилиндры, нарезанные из одного образца, осаживались со смазкой до различной деформации. После этого их разрезали вдоль меридионального сечения, и в 5—6 достаточно удаленных от торцов точках полученной поверхности измеряли

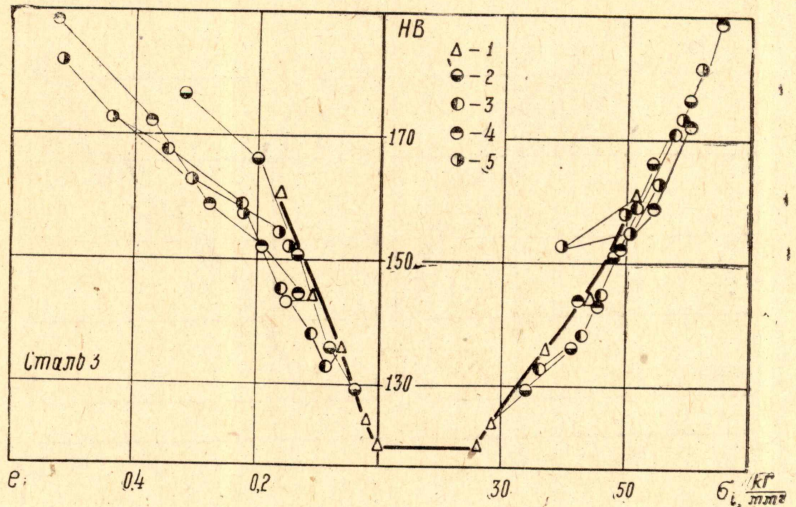


Рис. 4. Сжатие после растяжения. 1 — растяжение; 2, 3, 4, 5 — сжатие после растяжения

твердость. Соответствующую ей интенсивность напряжений и деформаций определяли по соотношениям:

$$\sigma_i = \frac{4P}{\pi D^2}, \quad e_i = e_{ip} + \ln \frac{h_0}{h}, \quad (3)$$

где P — сжимающее усилие, D — диаметр осаженого образца, e_{ip} — интенсивность деформации при растяжении, h_0 и h — высота образца до и после осадки. Результаты опытов приведены на рис. 4.

Для проведения опытов последней серии было изготовлено 20 образцов диаметром 24 и высотой 36 мм. Они были разбракованы по твердости и разбиты на 4 группы. Образцы, вошедшие в одну группу, сжимались со смазкой до одинаковой деформации. Последняя составила у разных групп 0,02 (группа № 2), 0,09 (№ 3), 0,17 (№ 4), 0,3 (№ 5). Затем в направлении, перпендикулярном оси, вытачивались цилиндры с высотой и диаметром, равным 10 мм. Образцы одной группы сжимались до различной деформации. После осадки в двух сечениях, параллельных и достаточно близких к меридиональному, измерялась твердость. Интенсивность деформации определялась как сумма абсолютных значений деформации при первой и второй осадке. Тарировочный график, приведенный на рис. 5, построен по результатам сжатия со смазкой 8 образцов высотой с диаметром 24 мм.

Результаты выполненного исследования указывают на возможность изучения напряженного состояния при немонотонном нагружении металла методом измерения твердости. Однако, если ранее предполагалось, что тарировочный график может быть распространен на всю пластическую область, то в рассматриваемом случае приходится ограничиться областью, в которой интенсивность деформации в последнюю ступень нагружения больше 0,02. Это не связано с усложнением эксперимента. Как и при исследовании мощотонных процессов, здесь необхо-

димо разграничить упругую и пластическую области. В качестве критерия для такого разграничения предлагалось условие возрастания твердости в процессе деформирования [2]. Как следует из полученных результатов, это же условие, отнесенное к последней ступени нагружения, позволяет исключить из рассмотрения область, в которой приращение e_i в последнюю ступень меньше 0,02.

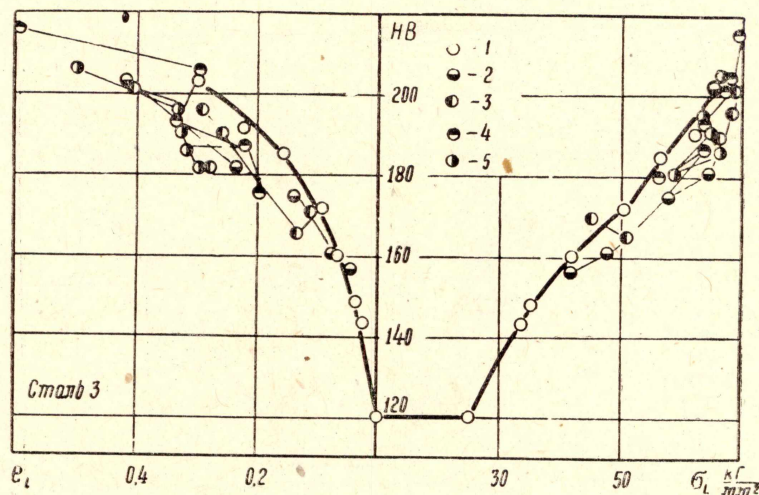


Рис. 5. Сжатие образцов, выточенных в поперечном направлении из осажённых цилиндров. 1 — тарировочная кривая; 2, 3, 4, 5 — сжатие в поперечном направлении

Ранее предполагалось [2], что измерением твердости можно исследовать пластическую деформацию только в тех случаях, когда разгрузка является упругой. Это существенно ограничивало область применения метода, так как даже при таком сравнительно простом процессе, как кручение сплошных образцов в области больших деформаций, разгрузка частично является пластической. Указанное предположение связано с тем, что твердость при разгрузке не должна изменяться — это дает возможность по твердости разгруженного тела судить о твердости, а следовательно, и напряжениях при пластическом деформировании. Полученные нами результаты показывают, что такое ограничение не является необходимым — деформация при разгрузке может быть пластической, однако она не должна превышать 0,02.

Что касается деформации, то по твердости может быть определена лишь «накопленная» интенсивность деформации. Причем, точность такого определения при немономном нагружении сравнительно невысока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Смирнов-Аляев. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Машгиз, 1961.
2. Г. Д. Дель. Исследование пластической деформации измерением твердости. Изв. ТПИ, т. 138, 1965.
3. N. N. Zogew, G. D. Del, G. L. Kufarew, M. G. Goldschmidt. Spannungszustand in Der Schnittzone, Cirp, Liege, Belgien, 1965.
4. Г. Б. Талыпов. Исследование эффекта Баушингера. Известия АН СССР, Механика и машиностроение, № 6, 1954.
5. В. И. Максак. Методика построения диаграммы сдвига при больших деформациях. Тезисы докладов научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. Секция механики, Новосибирск, 1966.
6. П. Бриджмен. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. ИИЛ, 1955.
7. Г. Д. Дель. Связь между твердостью и напряжениями в пластической области. Изв. вузов — Физика, вып. 3, 1966.