

Обмен опытом

О МЕТОДИКЕ ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Статья поступила 17 апреля 2014 г.

Построение кривых деформационного упрочнения металлов стандартами не регламентировано. Поэтому их строят разными методами.

Например, в работе [1] методика построения кривых деформационного упрочнения не описана, приведены значения показателя деформационного упрочнения n исследованных сплавов и его графическое соотношение с истинным равномерным удлинением e_B (при $P_{\max}$), а также отмечено, что истинные напряжения и деформации «определяли в 10–30 точках вплоть до момента начала снижения нагрузки на диаграмме» растяжения.

В работе [2] при испытании на осадку образцов «диаграммы напряжение течения (S) – истинная степень деформации (e)» рассчитывали по стандартной методике [3] при допущении однородной деформации». Также кратко отмечено, что определение «прочностных свойств по диаграмме сжатия полностью аналогично методике для растяжения».

Для построения кривых деформационного упрочнения металлов в качестве основного можно принять метод определения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ по ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение». Особенность его состоит в том, что величина напряжения $\sigma_{0,2}$ находится по заданной остаточной относительной деформации $\delta = 0,2\%$.

Задавая по этому методу величину относительно-го удлинения δ_i , например, в последовательности 0,5, 1, 2, 5, ..., δ_B (%), по диаграмме растяжения (рис. 1, а) можно определить соответствующие напряжения течения.

Значение $\sigma_{0,2}$ находят следующим образом. Рассчитывают длину отрезка $\Delta L_{0,2}\%$ на диаграмме растяжения, соответствующего остаточному удлинению $\delta = 0,2\%$, например, из пропорции

$$\begin{cases} \delta_K (\%) \rightarrow \Delta L_K (\text{мм}), \\ 0,2 (\%) \rightarrow \Delta L_{0,2\%} (\text{мм}); \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta L_{0,2\%} = 0,2 \Delta L_K / \delta_K = 0,2 \Delta L_1\% (\text{мм}), \quad (2)$$

где $\delta_K = 100\% (l_K - l_0) / l_0 = 100\% \Delta L_K / l_0$ — общее относительное удлинение; l_0 и l_K — расчетная длина образца до и после испытания; ΔL_K (мм) — абсолютное общее удлинение образца по диаграмме растяжения; $\Delta L_1\%$ (мм/%) — масштаб деформации, показывающий величину отрезка на диаграмме растяжения, соответствующего одному проценту относительного удлинения образца δ :

$$\Delta L_1\% = \Delta L_K / \delta_K (\text{мм}/\%). \quad (3)$$

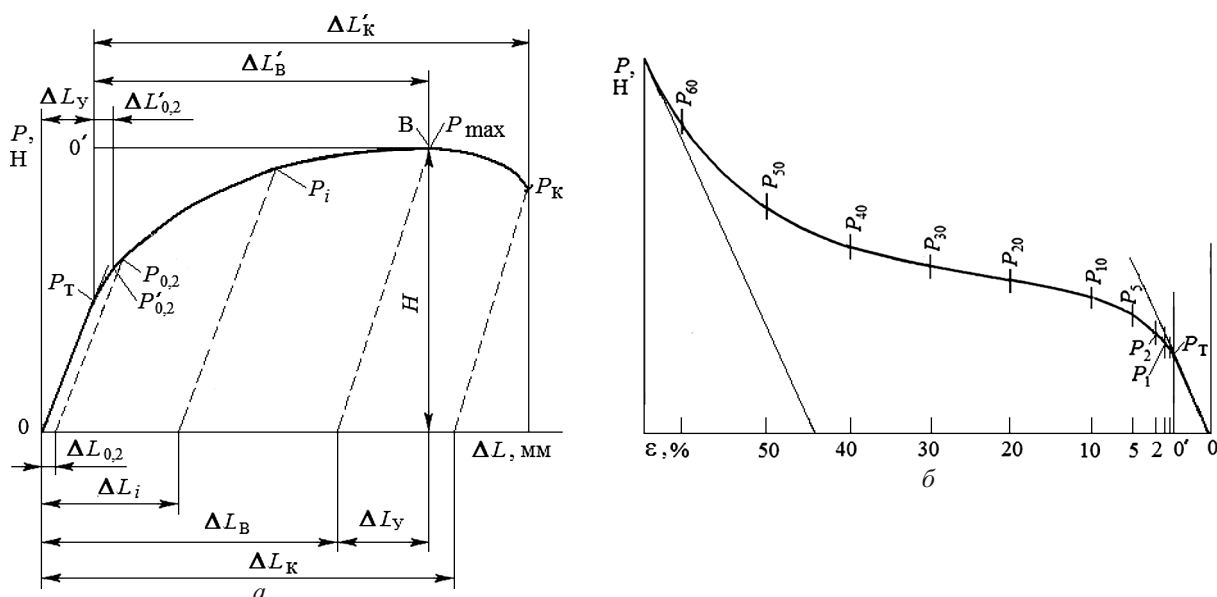


Рис. 1. Типичные диаграммы растяжения (а) и сжатия (б)

Откладывая отрезок $\Delta L_{0,2} \%$ от начала координат (точки 0 на рис. 1, а) и проводя из его конца косую секущую параллельно линии упругости до пересечения с диаграммой растяжения, получают точку усилия $P_{0,2} \%$ и в соответствии с ГОСТ 1497–84 определяют условный предел текучести $\sigma_{0,2} = P_{0,2} \% / F_0$.

На основании пропорции (1) можно рассчитать относительное равномерное удлинение:

$$\delta_B = \delta_K \Delta L_B / \Delta L_K = \Delta L_B / \Delta L_1 \%, \quad (4)$$

где ΔL_B (мм) — абсолютное равномерное удлинение по диаграмме растяжения (см. рис. 1).

По величинам текущего относительного удлинения δ_i находят истинную текущую деформацию e_i и истинное равномерное удлинения e_B [3]:

$$e_i = \ln(l_i/l_0) = \ln(1 + \delta_i), \quad (5)$$

$$e_B = \ln(1 + \delta_B). \quad (6)$$

Истинное напряжение течения S_i в области равномерного удлинения (до $P_{\max}$) на основании условия постоянства объема ($F_i l_i = F_0 l_0$) определяют по формуле [3]

$$S_i = P_i / F_i = (1 + \delta_i) P_i / F_0 = (1 + \delta_i) \delta_i, \quad (7)$$

где δ_i — относительное текущее удлинение;

$$\delta_i = P_i / F_0 \text{ —} \quad (8)$$

условное напряжение течения.

Построение кривой деформационного упрочнения начинают с определения на диаграмме растяжения точки усилия P_T и расчета физического предела текучести $\sigma_T = P_T / F_0$ (при $e_i = 0$). Затем по формуле (3) рассчитывают величину отрезка $\Delta L_1 \%$ и на его основе откладывают от начала диаграммы растяжения отрезки, пропорциональные заданным текущим относительным удлинениям δ_i . Из концов полученных отрезков проводят косые секущие, параллельные линии упругости, до линии деформации. Полученные точки пересечения соответствуют усилиям растяжения, например, $P_{0,5} \%$, $P_1 \%$, $P_2 \%$, $P_5 \%$, ..., $P_{\max}$. По формуле (8) определяют текущие условные напряжения течения δ_i :

$$\begin{aligned} \sigma_{0,5} \% &= P_{0,5} \% / F_0, \quad \sigma_1 \% = P_1 \% / F_0, \quad \dots, \\ \sigma_5 \% &= P_5 \% / F_0, \quad \dots, \quad \delta_B = P_{\max} / F_0, \end{aligned} \quad (9)$$

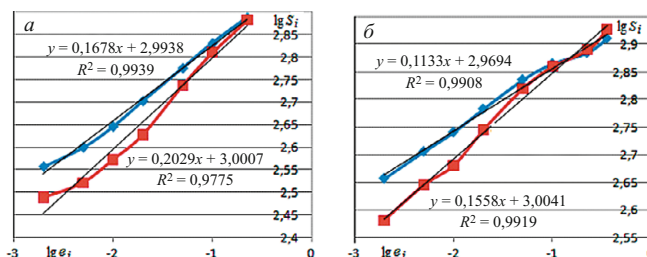


Рис. 2. Кривые деформационного упрочнения стали 40X при растяжении (а) и сжатия (б), построенные по косым (1) и вертикальным (2) секущим линиям

где δ_B — временное сопротивление. Далее по формуле (7) находят текущие истинные напряжения течения S_i :

$$\begin{aligned} S_{0,5} \% &= 1,005 \sigma_{0,5} \%, \quad S_1 \% = 1,01 \sigma_1 \%, \quad \dots, \\ S_5 \% &= 1,05 \sigma_5 \%, \quad \dots, \quad S_B = (1 + \delta_B) \sigma_B, \end{aligned} \quad (10)$$

где S_B — истинное напряжение течения в конце равномерной деформации.

С помощью компьютерной программы Microsoft Excel строят кривые деформационного упрочнения в простых ($S_i - e_i$), логарифмических ($\lg S_i - \lg e_i$), степенных ($S - \sqrt{e}$) или других координатах.

В отличие от рассмотренной методики в работе [4] предлагается текущее усилие P_i определять не по косым, а по вертикальным секущим, проведенным из концов отрезков $\Delta L'_i$ параллельно оси усилия, начиная от точки 0', лежащей на ординате, проходящей через точку начала пластической деформации (например, P_T) и смещенной от начала диаграммы растяжения (точки 0) на величину упругой деформации ΔL_y (см. рис. 1, а). В этом случае отрезки $\Delta L'$ включают пластическую и частично упругую деформации.

Методика вертикальных секущих целесообразна в случае построения кривой деформационного упрочнения по диаграмме сжатия, на форму которой большое влияние оказывают силы трения, особенно в области степеней деформации свыше 30 %, когда косая секущая, параллельная линии упругости, может совместиться с кривой течения и даже стать к ней касательной (см. рис. 1, б).

Следует отметить, что обработка диаграмм деформации по вертикальным секущим приводит к изменению механических характеристик: увеличению масштаба деформации $\Delta L_1 \%$, относительного равномерного удлинения δ_B и показателя деформационного упрочнения n , уменьшению предела текучести $\sigma_{0,2}$.

Механические свойства при растяжении и сжатии стали 40X

Секущие на диаграмме	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	ΔL_K , мм	ΔL_B , мм	$\Delta L_1 \%$, мм/%	n^*	δ_B , %	$\sigma_{0,2сж}$, Н/мм ²
Косые	361	470	355	17,5	0,17	20,2	454
Вертикальные	308	513	423	19,0	0,20	22,0	381
Относительное изменение, %	-14,7	9,1	19	8,6	18	8,9	-16

* При растяжении.

Это видно из рис. 2 и таблицы, из которых следует, что как при растяжении, так и при сжатии стали 40Х предел текучести $\sigma_{0,2}$, определенный по вертикальным секущим, меньше $\sigma_{0,2}$, рассчитанного по косым секущим, в среднем на 10 – 15 %.

Иногда построение кривой деформационного упрочнения выполняют в обратном порядке: сначала на диаграмме растяжения (сжатия) произвольно выбирают 6 – 15 точек [1], затем проводят из этих точек косые или вертикальные секущие, измеряют на диаграмме деформации соответствующие отрезки ΔL_i (ΔH_i) и из пропорции (1) определяют текущие относительные деформации δ_i (ϵ_i), что усложняет обработку диаграмм и использование результатов, особенно при испытании серии образцов.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. При испытании на растяжение кривую деформационного упрочнения предпочтительно строить для области равномерного деформирования (до $P_{\max}$) по изложенной методике, основанной на методе определения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ по ГОСТ 1497–84, применяя косые секущие, параллельные линии упругости.

2. При испытании на сжатие кривую деформационного упрочнения целесообразно строить, применяя вертикальные секущие, параллельные оси усилия. Использование же косых секущих можно рекомендовать для диаграмм деформации, полученных при испытании на более чувствительной (меньшей) шкале усилия при сжатии до степени деформации $\epsilon \leq 30$ %.

3. Различия в величинах условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, показателя деформационного упрочнения n

и других характеристик, определенных по диаграммам деформации с применением косых и вертикальных секущих, в среднем составляют 10 – 15 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никулин С. А., Добаткин С. В., Ханжин В. Г., Рогачев С. О., Чакушин С. А. Влияние субмикроструктурной структуры и включений на деформацию и разрушение алюминиевых сплавов и титана / Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. № 5. С. 8 – 18.
2. Бердин В. К., Караваева М. В., Ахунова А. Х., Нуриева С. К. Влияние напряженного состояния на структурные изменения в титановом сплаве VT9 при горячей деформации / Металловедение. 2008. № 2. С. 28 – 34.
3. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов: учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. — М.: МИСиС, 1998. — 400 с.
4. Глинер Р. Е. Аппроксимационный анализ диаграмм растяжения стали / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 4. С. 64 – 67.

REFERENCES

1. Nikulin S. A., Dobatkin S. V., Khanzhin V. G., Rogachev S. O., Chakushin S. A. Vliyanie submikrokristallicheskoj struktury i vkluchenii na deformatsiyu i razrushenie alyuminiyevykh splavov i titana / Metalloved. Term. Obrab. Metallov. 2009. N 5. P. 8 – 18 [in Russian].
2. Berdin V. K., Karavaeva M. V., Akhunova A. Kh., Nuriyeva S. K. Vliyanie napryazhennogo sostoyaniya na strukturnye izmeneniya v titanovom splave VT9 pri goryachei deformatsii / Materialovedenie. 2008. N 2. P. 28 – 34 [in Russian].
3. Zolotarevskii V. S. *Îăđăîè÷ăñîèâ ñâîîñđăâ îăđăîèîâ: ó÷ăîîîèë äëý âôçîâ*. 3rd Edition. — Moscow: Izd. MISiS, 1998. — 400 p. [in Russian].
4. Gliner R. E. Approksimatsionnyi analiz diagramm rastyazheniya stali / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2008. Vol. 74. N 4. P. 64 – 67.

© Ю. В. Бугров

Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород;
e-mail: mtpom@nntu.nnov.ru