

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Я. Б. ФРИДМАН и Т. А. ВОЛОДИНА

**О ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ**

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 20 XI 1944)

1. Значение закаленной (и отпущенной) стали в современной технике огромно. До последнего времени основными характеристиками закаленных сталей служили: предел прочности (временное сопротивление разрыву)  $\sigma_B$  и связанная с ним твердость по Бринелю  $H_B$  как характеристики прочности, относительное удлинение  $\delta_{10}$  или  $\delta_5$  и сужение шейки  $\psi$  как характеристики пластичности и ударная вязкость при изгибе  $a_k$  как характеристика вязкости. Между тем, почти не применяемый в настоящее время метод кручения позволяет обнаружить ряд новых свойств сталей, не обнаруживаемых или не поддающихся количественному измерению при испытаниях на растяжение.

Во многих случаях, в особенности у закаленных и неотпущенных (а также у низкоотпущенных) сталей, указанные характеристики пластичности и вязкости имеют столь низкие значения (близкие к нулю), что такие материалы обычно квалифицируются как совершенно хрупкие. Между тем, современная теория деформации показывает, что такое заключение односторонне, ибо хрупкость таких сталей присуща им только при определенных напряженных состояниях (растяжение, изгиб), при которых доля растягивающих напряжений достаточно велика<sup>(1)</sup>.

Уже сама возможность измерения твердости по Бринелю (т. е. пластического изменения формы в виде отпечатка на поверхности) показывает, что, в отличие от еще более хрупких материалов (например многих стекол и силикатов), при определенных напряженных состояниях закаленные стали способны к довольно значительной пластической деформации (см. также<sup>(2)</sup>). Представляется весьма существенным точное количественное изучение пластичности высокопрочных сталей.

Как впервые указал Н. Н. Давиденков<sup>(3)</sup> при обсуждении результатов известных опытов Люерсена и Грина<sup>(4)</sup>, для такого изучения наиболее пригоден метод кручения цилиндрического стержня, уже применявшийся Эммонсом при изучении инструментальных сталей<sup>(5)</sup>. При кручении отношение максимальных растягивающих напряжений к максимальным касательным вдвое менее, чем при растяжении, и, действительно, многие стали, почти совершенно хрупкие при растяжении, при кручении обнаружили значительную пластическую деформацию. На рис. 1 приведены в качестве примера кривые деформации\* стали хромансиль (0,38% С, 1,06% Cr, 0,89% Mn, 1,06% Si), закаленной с 880° в масле без отпуска. В то время как

\* Во всех опытах на одну точку испытывалось 4—5 образцов.

при растяжении (кривая *P*) сталь совершенно хрупка (удлинение практически равно нулю), при кручении (кривая *K* рис. 1) та же сталь обнаруживает значительную пластичность (пластический сдвиг 30%, что в пересчете на пластическое удлинение даст  $e = 20\%$ ).

Подсчет напряжений и деформаций при кручении производился по формулам Людвика и Надаи (6).

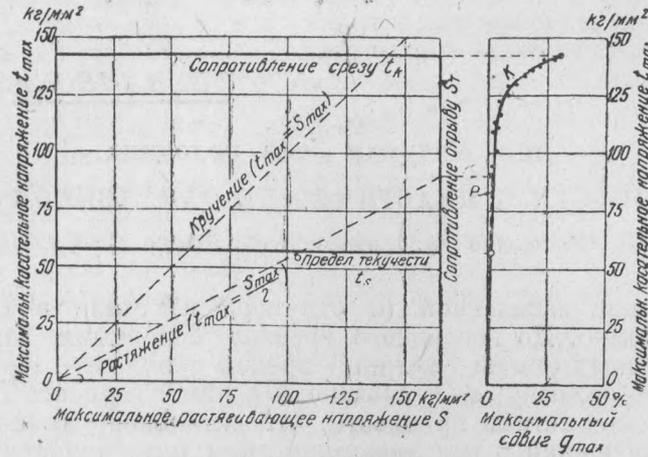


Рис. 1. Диаграмма механического состояния закаленной стали хромансиль

Таким образом, пластичность твердых закаленных сталей, совершенно хрупких при растяжении, может быть легко и достаточно надежно оцениваема по опытам при кручении, что дает возможность введения количественной характеристики пластичности при испытаниях инструментальных, шарикоподшипниковых и т. п. сталей\*.

2. Не менее существенные преимущества представляет метод кручения при изучении сталей, пластичных также и при растяжении (например, после закалки и высокого отпуска), на что указывалось еще Совером (7) и Бейном (8). Принципиальная непригодность удлинения как показателя пластичности известна (9). Однако и сужение шейки, измеряя среднюю, а не максимальную пластичность в заведомо неоднородном напряженном и деформированном состоянии, дает сильно искаженные результаты.

На рис. 2 приведены различные механические свойства стали вышеуказанного состава в зависимости от температуры отпуска. Различие между ходом кривой пластичности при растяжении  $\psi$  и максимального сдвига при кручении  $g_k$  (рис. 2) получается весьма значительным, причем как для упомянутой, так и для ряда других сталей  $g_p \gg g_k$ , в то время как благодаря неравномерности деформированного состояния в шейке растягиваемого образца естественно было ожидать обратного соотношения. Объяснения этому явлению пока не найдено. Возможно, что здесь оказывает влияние различный поворот кристаллографических плоскостей при растяжении и кручении.

\* При испытании весьма хрупких сталей и при кручении может наблюдаться отрыв (разрушение по винтовой линии). Для этих материалов необходим переход к еще более «мягким» способам нагружения, например, к сжатию.

Для возможности сопоставления сужение  $\psi$  может быть пересчитано в истинный пластический сдвиг  $g_p$  по формуле

$$g_p = 1,5 \ln \frac{1}{1 - \psi}.$$

3. На рис. 2 видно далее, что оценка прочности\* (сопротивления деформации) в зависимости от величины деформации («допуска», при котором определяется прочность) может приводить к прямо противоположным результатам. Так, например, на рис. 3 сопоставлены кривые деформации стали хромансиль после отпуска 200 и 500°, причем при очень малых деформациях ( $\sigma_{0,01}$ ) большую прочность дает отпуск 500°, в то время как при больших деформациях ( $\sigma_{0,2}$ ) более прочной оказывается сталь, отпущенная при 200°.

Сказанное ясно видно и на рис. 2. В то время как кривые  $\sigma_B$  и  $H_B$ , которые характеризуют сопротивление пластической деформации при значительной величине деформации, постепенно понижаются с повышением температуры отпуска (сталь тем менее «прочна», чем выше температура отпуска), кривые  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_{0,01}$  дают максимум при температурах отпуска порядка 300—400°, а более низкие температуры отпуска дают меньшую «прочность», оцениваемую по  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_{0,01}$ . Поэтому, говоря о прочности материала (в данном случае закаленных сталей), необходимо во избежание противоречий оговаривать величину деформации, при которой сопоставляется эта «прочность».

Результаты, приведенные на рис. 2 и 3, подтверждают взгляды С. Т. Кишкина (10) о малой твердости мартенсита при измерении этой твердости при значительно меньших деформациях, чем это делается при обычных испытаниях по Бригнелю.

4. Не только сужение шейки  $\psi$  (абсцисса конечной точки диаграммы деформации при растяжении), но и «истинное сопротивление разрыву»  $S_k$  (ордината конечной точки) той же диаграммы, т. е. истинное растягивающее напряжение в момент разрыва, не отражает максимального сопротивления, оказываемого металлом разрушению.

Известно, что большинство пластичных материалов разрушается при растяжении от касательных напряжений (1). Если бы шейка при растяжении отсутствовала, то из соотношения нормальных и касательных напряжений при растяжении следовало бы ожидать соотношения  $S_k = 2t_k$ , где  $t_k$  — сопротивление срезу. Такое соотношение и наблюдается, например у прессованного магния, не образующего при растяжении шейки (6).

Между тем, из рис. 2 видно, что  $S_k > 2t_k$ , что может быть объяснено только влиянием объемного напряженного состояния, созда-

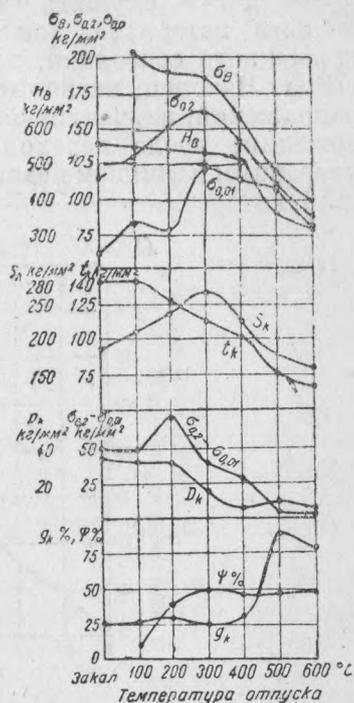


Рис. 2. Механические свойства стали хромансиль при различных температурах отпуска.  $\sigma_B$  — временное сопротивление разрыву (предел прочности) в кг/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_{0,2}$  — условный предел текучести в кг/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_{0,01}$  — условный предел упругости в кг/мм<sup>2</sup>;  $H_B$  — твердость по Бригнелю в кг/мм<sup>2</sup>;  $S_k$  — истинное напряжение при разрыве в кг/мм<sup>2</sup>;  $t_k$  — сопротивление срезу (касательному разрушению) в кг/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_{0,2} - \sigma_{0,01}$  — разность, приблизительно характеризующая упрочнение в начальной стадии деформации;  $D_k$  — коэффициент упрочнения (модуль пластичности) при больших степенях деформации в кг/мм<sup>2</sup> на 1% деформации;  $\psi$  — сужение шейки в %;  $g_k$  — максимальный пластический сдвиг при кручении в %

\* Под прочностью в широком смысле слова мы подразумеваем сопротивление деформации как пластической, так и при разрушении.

ваемого шейкой во внутренних зонах образца (1). Из сказанного следует, что у пластичных металлов, образующих при растяжении шейку, ни сужение шейки  $\psi$ , ни истинное сопротивление разрыву  $S_R$  не могут служить точными характеристиками механических свойств материала, так как они зависят от весьма сложного напряженного состояния, возникающего в шейке растягиваемого образца. Наконец, истинные диаграммы деформаций (кривые истинных напряжений, изучавшиеся до сих пор почти исключительно при растяжении) после перехода за предел прочности являются по вышеуказанным причинам искаженными (11) и потому представляют небольшой интерес.

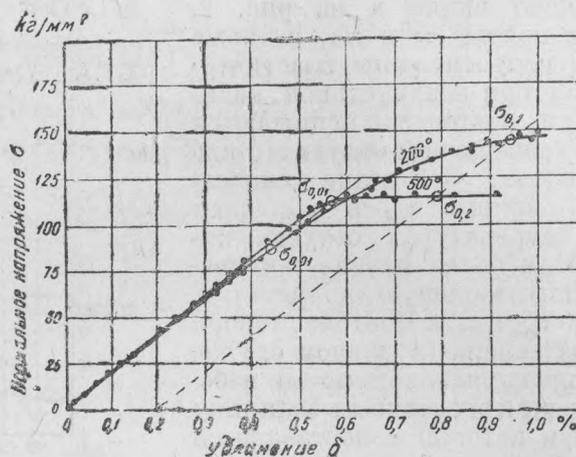


Рис. 3. Кривые деформации закаленной стали хромансиль после отпуска 200 и 500°. При весьма малых деформациях (0,01%) отпуск 200° дает меньшую прочность, чем 500°; при больших деформациях (0,2%) соотношение меняется на противоположное

В качестве основного метода получения характеристик максимальной пластичности и сопротивления вязкому разрушению (срез), а также истинных кривых деформаций пластичных металлов наибольший интерес, по нашему мнению, представляет кручение, а не растяжение. Что же касается оценки сопротивления отрыву, которое часто не выявляется при кручении и в то же время может заметно влиять на свойства при растяжении, то это свойство должно быть оцениваемо особо (1, 6).

Во многих случаях (у малопластичных материалов) сопротивление отрыву наиболее просто может быть измерено при изгибе.

Всесоюзный научно-исследовательский  
институт авиационных материалов

Поступило  
20 XI 1944

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Я. Б. Фридман, Единая теория прочности материалов, М., 1943. <sup>2</sup> Л. В. Альтшуллер, Н. А. Решеткина, А. Г. Спектор и Б. А. Цукерман, ЖТФ, XIII, № 6 (1943). <sup>3</sup> N. N. Davidenkow, Metal Progress, 30, 55 (1936). <sup>4</sup> G. V. Luerksen and O. V. Greene, Am. Soc. Testing Metals Adv. Paper, 33, II, 315 (1935); Am. Soc. Metals Transact., 23, 861 (1935). <sup>5</sup> W. H. Emmons, Amer. Soc. Test Metals, 31, II, 47 (1931). <sup>6</sup> Я. Б. Фридман, Техника воздушного флота, № 1 (1944). <sup>7</sup> A. Sauvieur, Amer. Soc. Test Metals, 39 (1939). <sup>8</sup> E. Vain, Functions of Alloying Elements in Steel, 1939, p. 98. <sup>9</sup> Я. Б. Фридман, Зав. лаб., № 7 (1940). <sup>10</sup> С. Т. Кишкин, Техн. возд. флота, № 11 (1943). <sup>11</sup> Г. А. Смирнов-Аляев, Упругость и пластичность, сб. работ Ленингр. ун-та, в II, 1935, стр. 298.