

## Влияние податливости машины на механические характеристики материалов при испытаниях на статическое растяжение

**Е. В. Воробьев**

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Исследовано влияние податливости машины на стандартные механические характеристики металлических материалов. Показано, что с увеличением податливости относительное удлинение и относительное сужение после разрыва могут уменьшаться в несколько раз. При криогенных температурах в связи с проявлением эффекта скачкообразной деформации металлов предел прочности также может уменьшаться – вплоть до уровня предела текучести.*

**Ключевые слова:** податливость машины, диаграмма растяжения, спад нагрузки, механические характеристики, скачкообразная деформация.

О влиянии податливости, или ее обратной величины – жесткости нагружающего устройства на механическое поведение и характеристики материалов свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные, в том числе [1–5]. Этот фактор при заданном уровне нагрузки определяет запас упругой энергии  $W = \Pi P^2/2$ , где  $\Pi$  – податливость системы образец–машина;  $P$  – нагрузка. Потенциальная энергия переходит в активную форму (работу деформирования или разрушения) как только нагрузка начинает уменьшаться. При стандартных испытаниях металлов на растяжение [6] на восходящей ветви диаграммы нагрузка–удлинение определяют модуль упругости, пределы пропорциональности и текучести (физический и условный), а также предел прочности (соответствующая точка находится в пограничной области диаграммы). Остальные стандартные характеристики пластичных материалов (относительное удлинение после разрыва  $\delta$  и относительное сужение поперечного сечения после разрыва  $\psi$ ) определяют после прохождения стадии спада нагрузки на нисходящем участке диаграммы и полного разрушения образца, т.е. они подвержены влиянию фактора податливости. При этом величина податливости не регламентируется, и для различных разрывных машин она может различаться на порядок и больше, поскольку диапазон их предельных нагрузок очень широкий (0,5...1000 кН) [7]. Необходимо оценить степень влияния податливости на указанные механические характеристики.

Рассмотрим диаграмму статического растяжения с контролем по перемещению (жесткий режим) образца из пластичного материала, уравнение состояния которого описывается степенной функцией вида

$$\sigma = A\varepsilon^m, \quad (1)$$

где  $\sigma$  и  $\varepsilon$  – соответственно истинные напряжение и деформация;  $A$  и  $m$  – постоянные,  $0 \leq m \leq 1$ .

Полагаем, что образец из однородного анизотропного материала разрушается по достижении некоторого критического напряжения  $\sigma_c$  без образования шейки (ее вклад в полную величину удлинения мал). Из (1) получим зависимость для описания диаграммы нагрузка  $P$  – удлинение  $\Delta l$  при растяжении образца с начальной площадью поперечного сечения  $F_0$  и начальной расчетной длиной рабочей части  $l_0$  (база экстензометра):

$$P = AF_0[\ln(1 + \Delta l/l_0)]^m / (1 + \Delta l/l_0). \quad (2)$$

Для вывода этой формулы использовали соотношение  $\varepsilon = \ln(1 + \Delta l/l_0)$  и условие постоянства объема. График функции (2), т.е. модельная диаграмма растяжения образца для абсолютно жесткой системы ( $\Pi = 0$ ), представлен на рис. 1. Он имеет выраженный максимум в точке с координатами

$$\Delta l_m = l_0(e^m - 1); \tag{3}$$

$$P_m = AF_0(m/e)^m. \tag{4}$$

За этой точкой геометрическое разупрочнение образца уже не компенсируется деформационным упрочнением материала, величина которого  $d\sigma/d\varepsilon = \sigma m/\varepsilon$  резко убывает.

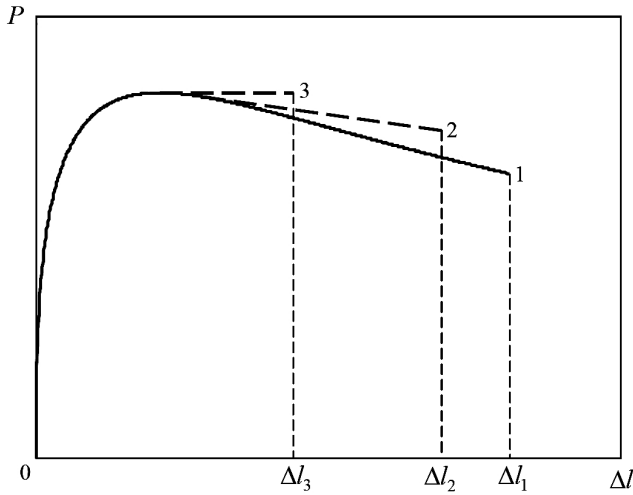


Рис. 1. График уравнения (2) как модельная диаграмма растяжения с точками, соответствующими разрушению образца при  $\Pi = 0$  (1), промежуточном значении податливости (2) и  $\Pi \rightarrow \infty$  (3).

Уравнение (2) с учетом податливости системы образец–машина принимает вид

$$P = AF_0 \left[ \ln \left( 1 + \frac{\Delta l_m - P\Pi}{l_0} \right) \right]^m / \left( 1 + \frac{\Delta l_m - P\Pi}{l_0} \right),$$

где  $\Delta l_m$  – суммарная деформация образца и силовой цепи машины.

Эксперименты показывают, что при увеличении податливости вид диаграммы растяжения изменяется – ее нисходящая ветвь приподнимается, а точки, соответствующие разрушению образца, перемещаются от точки 1 к точкам 2 и 3 (на рис. 1 показаны условно без учета упругого смещения). Если податливость очень велика, нагрузка не релаксирует, образуется горизонтальный участок, т.е. процесс деформирования теряет устойчивость. Такой режим может быть реализован путем нагружения образца подвешенным грузом, если  $\ddot{\varepsilon}l_0 \ll g$ , где  $g$  – ускорение свободного падения.

Из (2) и (4) при условии постоянства объема получим выражения для предельных значений относительного удлинения после разрыва в точках 1 и 3 (рис. 1):

$$\delta_1 = \exp(\sigma_c/A)^{1/m} - 1; \tag{5}$$

$$\delta_3 = \frac{\sigma_c}{A} (e/m)^m - 1 \quad (6)$$

Для определенности примем  $\sigma_c = A$ . Тогда из (5) и (6) при  $m \rightarrow 0$  имеем  $\delta_1 / \delta_3 \rightarrow \infty$ , при  $m = 1 - \delta_1 / \delta_3 = 1$ , для промежуточных величин, например,  $m = 1/3 - \delta_1 / \delta_3 = 1,7$ . Относительное сужение образца после разрыва  $\psi = (F_0 - F_k) / F_0$ , где  $F_k$  – площадь поперечного сечения образца после разрыва, представим в виде  $\psi = 1 - (1 + \Delta l / l_0)^{-1}$ . Для вышеуказанных значений  $m$  соответственно получим  $\psi_1 / \psi_3 \rightarrow \infty$ ,  $\psi_1 / \psi_3 = 1$  и  $\psi_1 / \psi_3 = 2,2$  (рис. 2). При  $m = 1$  получим закон Гука, и  $\delta = \psi = 0$ .

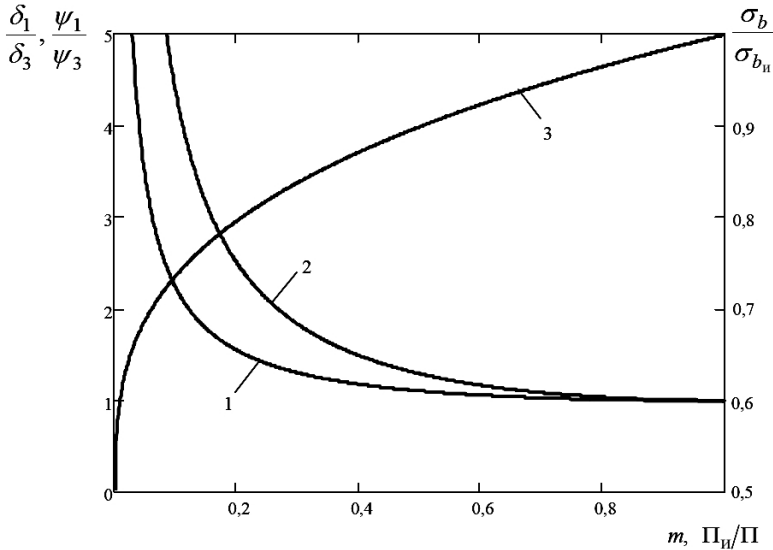


Рис. 2. Зависимость относительных удлинений (1) и относительных сужений (2) образца после разрыва при  $\sigma_c = A$  от показателя упрочнения  $m$  и снижения уровня прочности стали 03Х20Н16АГ6 с увеличением податливости при температуре 4 К (3).

Таким образом, в рамках принятой модели при увеличении податливости системы образец–машина характеристики пластичности материала могут значительно снижаться, что подтверждают и экспериментальные исследования. Обратное явление наблюдается лишь при повышенных и высоких температурах для некоторых сплавов, которые претерпевают при нагреве полиморфные превращения [3].

Предел прочности, соответствующий экстремальной точке на диаграмме растяжения (рис. 1), определяется с помощью (4) следующим образом:

$$\sigma_B = A(m/e)^m$$

и не зависит от податливости, поскольку до достижения соответствующей точки диаграммы растяжения нагрузка не снижалась.

Иначе дело обстоит при криогенных температурах ниже 30 К, когда процесс пластического деформирования образца теряет устойчивость в связи с проявлением эффекта низкотемпературной прерывистой текучести металлов [8]. Скачки деформации сопровождаются снижением нагрузки и следуют один за другим вследствие периодического накопления упругой энергии и ее разрядки. При этом диаграмма растяжения приобретает пилообразный вид, а спады нагрузки могут достигать не-

скольких десятков процентов исходного уровня. Ранее [5] было показано, что даже сравнительно небольшое увеличение податливости путем включения в силовую цепь упругих элементов приводит не только к значительному снижению характеристик пластичности аустенитных сталей и титановых сплавов, но и их пределов прочности. Это обусловлено тем, что при очередном скачке деформации происходит более раннее разрушение образца – диаграмма растяжения укорачивается, и точка максимума нагрузки не достигается (рис. 3). При снижении податливости диаграмма удлиняется, и на ней появляется ниспадающая ветвь.

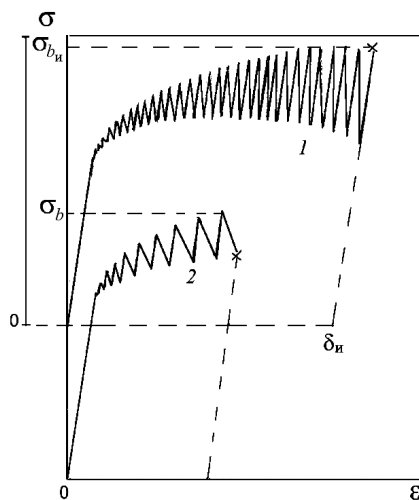


Рис. 3. Вид диаграмм деформирования образцов стали 03X20N16AG6 при температуре 4 К и  $\Pi = 0,83 \cdot 10^{-4}$  (1), и  $1,75 \cdot 10^{-4}$  мм/Н (2).

Экспериментальные зависимости относительного удлинения металлов, полученные в [5], позволяют достаточно точно аппроксимировать их функцией вида

$$\delta/\delta_{и} = (\Pi_{и}/\Pi)^p, \quad (7)$$

где  $0 < p < 1$ ; индексом “и” обозначены исходные значения, причем  $\Pi_{и}$  – величина податливости системы образец–машина, при которой достигается максимальная нагрузка, а ниспадающая ветвь диаграммы растяжения не реализуется (рис. 3), соответственно  $\Pi \geq \Pi_{и}$ . Для образцов из стали 03X20N16AG6 имеем  $p = 0,5$ .

Чтобы получить в аналитическом виде зависимость предела прочности от податливости, дополним пилообразную диаграмму деформирования верхней огибающей кривой. Для ее описания применительно ко многим высокопрочным холодопластичным сплавам может быть использован закон упрочнения

$$\sigma = \sigma_{т} + B\varepsilon^n,$$

где  $\sigma_{т}$  – предел текучести.

Координаты верхней точки огибающей кривой обозначим  $\varepsilon_b$  и  $\sigma_b$  – это истинные деформация и напряжение, соответствующие пределу прочности. По аналогии с (7) примем

$$\varepsilon_b/\varepsilon_{bи} = (\Pi_{и}/\Pi)^p, \quad (8)$$

откуда следует

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_{b_n}} = 1 - \left( 1 - \frac{\sigma_T}{\sigma_{b_n}} \right) \left[ 1 - \left( \frac{\Pi_{и}}{\Pi} \right)^{np} \right]. \quad (9)$$

В эксперименте [5] для образцов из стали 03Х20Н16АГ6 при температуре 4 К  $\Pi_{и} = 0,83 \cdot 10^{-4}$  мм/Н, а величины  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_{вн}$ ,  $\sigma_{b_n}$ ,  $B$  и  $n$  соответственно составляют 1190, 1640, 2214, 2240 МПа и 0,65 [9].

Для  $\Pi = 1,75 \cdot 10^{-4}$  мм/Н расчет по формулам (7), (9) дает  $\delta/\delta_{и} = 0,69$  и  $\sigma_b/\sigma_{b_n} = 0,9$ . Эти результаты практически совпадают с полученными экспериментально –  $\delta/\delta_{и} = 0,7$  и  $\sigma_b/\sigma_{b_n} = 0,89$  (последний соответствует значению  $\sigma_{в}/\sigma_{в_{и}} = 0,96$ ) [5]. С увеличением податливости интенсивность снижения предела прочности возрастает (рис. 2). И при очень большой податливости он может уменьшаться до предела текучести – в случае если скачок деформации следует непосредственно после начального упругого участка диаграммы. Тогда согласно (9) для стали 03Х20Н16АГ6 имеем  $\sigma_b/\sigma_{b_n} = 0,46$ . На практике разрушение образца на первом же скачке деформации действительно происходит при очень большой податливости – в случае нагружения подвешенным грузом [10].

Следует отметить, что податливость стандартного цилиндрического образца  $\Pi_{обр}$  обратно пропорциональна его диаметру, который может изменяться от 3 до 25 мм [6], однако податливость системы как сумма  $\Pi = \Pi_{обр} + \Pi_{м}$  обычно в большей степени зависит от податливости машины  $\Pi_{м}$ . Поэтому она может существенно влиять на получаемые механические характеристики материалов, что свидетельствует о необходимости учета данного фактора. Очевидно, что механическая характеристика материала должна адекватно отражать то или иное его свойство (прочность, пластичность). Это обеспечивается надлежащей стандартной процедурой. Однако в настоящее время единственным государственным стандартом, который регламентирует податливость машины при испытаниях металлов на растяжение, является стандарт Украины [11].

## Резюме

Досліджено вплив піддатливості машини на стандартні механічні характеристики металевих матеріалів. Показано, що зі збільшенням піддатливості відносно видовження і відносно звуження після розриву можуть зменшуватись у декілька разів. За криогенних температур через прояв ефекту стрибкоподібної деформації металів границя міцності також може зменшуватись – аж до рівня границі плинності.

1. Ullner C., Reimann E., Kohlhoff H., and Subaric-Leitis A. Effect and measurement of the machine compliance in the macro range of instrumented indentation test // Measurement. – 2010. – 43, No. 2. – P. 216–222.
2. Пашков П. О., Кириенко А. М. Особенности деформации и разрушения стали в конструкциях различной жесткости // Пробл. прочности. – 1980. – № 1. – С. 52–55.
3. Пресняков А. А., Мофа Н. Н., Аубакирова Р. К. и др. О влиянии жесткости испытательной машины на механические свойства материалов // Там же. – 1984. – № 2. – С. 109–112.
4. Попов Н. Н. Влияние жесткости нагружения на историю деформирования при квазистатических испытаниях металлов // Там же. – 1990. – № 7. – С. 70–75.

5. Воробьев Е. В. О влиянии жесткости системы нагружения на сопротивление деформированию и разрушение образцов сплавов при глубоком охлаждении // Там же. – 2001. – № 1. – С. 98–104.
6. ГОСТ 1497-84. Металлы. Метод испытаний на растяжение. – Введ. 01.01.1986.
7. ГОСТ 28840-90. Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования. – Введ. 01.01.1993.
8. Vorob'ev E. V., Strizhalo V. A., and Anpilogova T. V. Metals in Liquid Helium: Discontinuous Yielding, Stress Drops, and Strength / Helium: Occurrence, Applications and Biological Effects. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2013. – P. 1–38.
9. Vorob'ev E. V. and Anpilogova T. V. Numerical analysis of the deformation instability of metals in liquid helium // Comput. Mater. Sci. – 2013. – 68. – P. 66–72.
10. Иванченко Л. Г., Солдатов В. П. Влияние вида деформирования на характер неустойчивого течения монокристаллов алюминия при низких температурах // Физика металлов и металловедение. – 1981. – 52, № 1. – С. 183–188.
11. ДСТУ 7305:2013. Металлы. Метод испытаний на растяжение металлов и сплавов при низких и криогенных температурах. – Введ. 01.01.2014.

Поступила 27. 10. 2014