

В. Б. Фурманов /д. т. н./, Ю. С. Пройдак /д. т. н./,  
Я. В. Фролов /д. т. н./  
Национальная металлургическая академия  
Украины

## О некоторых новых способах анализа физико-механических свойств металла при его растяжении до разрыва

*Рассмотрены новые способы анализа физико-механических свойств металла: трещиностойкости, удлинения в шейке, предельного состояния, коэффициента запаса на металл, критериев пластичности и хрупкости. Уточнены стандарты на растяжение металла до его разрыва. (Табл. 1. Библиогр.: 19 назв.)*

**Ключевые слова:** металл, удлинение, трещиностойкость, предельное состояние, коэффициенты запаса на металл, критерии пластичности и хрупкости металла, стандарты.

*New ways of the analysis of mechanical-and-physical properties of metal are considered: crack resistance, elongation in neck, a limit state, factor of safety for metal, criteria of plasticity and frangibility. Standards on metal stretching before its rupture are specified.*

**Key words:** metal, elongation, resistance to cracking, extreme limit state, factor of safety for metal, yield and frangibility criterion, standards

Известно, что наиболее распространенные испытания, проводимые в мире для оценки физико-механических свойств металла, – это испытания на растяжение его вплоть до разрыва. Этот факт обеспечивает огромную базу референсных значений, которая позволяет повысить точность прогнозирования момента разрушения. Поэтому в этой работе мы предлагаем по результатам испытаний на растяжение стандартных подобных образцов ознакомить читателя с некоторыми новыми способами анализа физико-механических свойств металла при его растяжении до разрыва, а также дать рекомендации по разработке и внедрению новых стандартов на испытание металла путем его растяжения до разрыва. В первую очередь это относится к анализу следующих свойств металла:

1. Трещиностойкость (ТС).
2. Средняя величина относительного удлинения в шейке при разрыве образца ( $\varepsilon_{ср.ш}$ ).
3. Предельное (опасное) состояние металла (ПСМ).
4. Коэффициент запаса на металл (КЗМ).
5. Критерии пластичности (П) и хрупкости (Х).

Рассмотрим последовательно каждое из указанных выше свойств, а также вопрос уточнения стандартов на растяжение металла до разрыва.

Известными учеными разных стран, например, в работах [1–5] было показано несоответствие существующих стандартов на испытание

металла путем его растяжения до разрыва физически правильному пониманию процесса.

Более подробный анализ этого вопроса рассмотрен, например, в работах [6–8]. Перейдем к анализу вышеуказанных свойств металла.

### 1. Трещиностойкость (ТС).

Известно, что вязкость – это свойство твердых тел необратимо поглощать энергию при пластической деформации, а вязкость разрушения (трещиностойкость) – это уровень работы, поглощаемой материалом до разрушения.

Учитывая вышесказанное, зоной разрушения можно считать участок образца, где появилась шейка. Представляется, что именно этот участок может в полной мере характеризовать трещиностойкость металла. Для решения задачи впервые применен следующий прием [9–12]. По мере растяжения образца упругая энергия деформации пружинения (разгрузки) увеличивается до максимального значения в точке, расположенной перед шейкой, где достигается величина временного сопротивления. Затем величина упругой энергии деформации пружинения (разгрузки) уменьшается к точке, где возникает разрыв (разрушение) образца. Отсюда следует, что относительная трещиностойкость металла может быть характеризована как относительный уровень уменьшения максимально накопленной упругой энергии пружинения (разгрузки) при растяжении образца до его разрыва (разрушения) и определяется по формуле:

$$TC = \frac{A_1 - A_2}{A_1} = 1 - \left( \frac{P_p}{P_{max}} \right)^2, \quad (1)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – соответственно, максимально накопленная упругая энергия пружинения (разгрузки) в точке, где достигается временное сопротивление, и энергия пружинения (разгрузки) в точке, примыкающей к месту разрыва (разрушения) образца;  $P_p$  и  $P_{max}$  – соответственно, усилие растяжения непосредственно перед разрывом образца и максимальное усилие растяжения до возникновения шейки.

Из уравнения (1) видно, что относительная трещиностойкость находится в пределах  $1 \geq TC \geq 0$ , и, чем больше  $TC$ , тем металл более устойчив к трещинообразованию при прочих равных условиях.

2. Средняя величина относительного удлинения ( $\epsilon_{ср.ш}$ ) в шейке при разрыве образца.

В какой-то степени по аналогии с выводом формулы (1), по нашему мнению, в первом приближении для определения средней величины относительного удлинения  $\epsilon_{ср.ш}$  в шейке в момент разрыва образца можно воспользоваться относительным уровнем уменьшения максимально накопленного упругого удлинения пружинения (разгрузки) при растяжении образца до разрыва на участке шейки [13].

С использованием диаграммы растяжения было получено:

$$\epsilon_{ср.ш} = \frac{\Delta l_{max}^n - \Delta l_p}{\Delta l_{max}^n} = 1 - \frac{P_p}{P_{max}}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_{ср.ш}$  – средняя величина относительного удлинения в шейке при разрыве образца;  $\Delta l_{max}^n$  – абсолютная величина уменьшения длины образца (пружинение) после снятия нагрузки перед шейкой;  $\Delta l_p$  – абсолютная величина уменьшения длины образца (пружинение) после снятия нагрузки непосредственно перед разрывом.

3. Предельное (опасное) состояние металла (ПСМ).

На основании работ [6–8; 13] предельное (опасное) состояние металла определяется как среднее геометрическое от трещиностойкости и средней величины относительного удлинения  $\epsilon_{ср.ш}$  в шейке при разрыве образца:

$$ПСМ = \sqrt{(TC) \cdot \epsilon_{ср.ш}} = \sqrt{1 - \frac{P_p}{P_{max}} - \left( \frac{P_p}{P_{max}} \right)^2 + \left( \frac{P_p}{P_{max}} \right)^3}. \quad (3)$$

4. Коэффициент запаса на металл (КЗМ).

Очевидно, что чем больше значение ПСМ, тем меньше для данного металла надо брать коэффициент запаса (КЗМ) на металл. При заме-

не одного металла на другой необходимо изменить и коэффициент запаса (КЗМ) [6].

В первом приближении можно рекомендовать сугубо для металла:

$$КЗМ = \frac{1}{ПСМ}. \quad (4)$$

При этом не следует путать коэффициент запаса на металл с коэффициентом запаса, определяемым другими факторами, например, уровнем ответственности объекта, условиями техники безопасности и т. д.

5. Критерии пластичности (П) и хрупкости (Х).

Диапазоны значений показателя относительного предельного состояния металла (ПСМ) позволяют ориентировочно расположить металлы и сплавы по условному уровню хрупкости и пластичности и коэффициенту запаса на металл (табл. 1) [6].

Таблица 1

Показатели хрупкости, пластичности и коэффициентов запаса на металл

№ П/П	ПСМ	КЗМ	Характеристика металла и его условное обозначение
1	0,10–0,20	10,00–5,00	Хрупкий (Х)
2	0,21–0,35	5,00–3,00	Хрупко-пластичный (ХП)
3	0,36–0,50	3,00–2,00	Малопластичный (МП)
4	0,51–0,80	2,00–1,25	Пластичный (П)
5	0,81–1,00	1,25–1,00	Сверхпластичный (СП)

6. Уточнение стандартов на растяжение металла до разрыва (УС).

Подробно об уточнении стандартов (УС) на растяжение металла до разрыва сказано в работе [14], в которой показаны недостатки замеров удлинений образцов по существующим стандартам и предложено перейти к анализу эквивалентного (расчетного) удлинения. Получена зависимость для расчета этого эквивалентного (расчетного) удлинения  $\Delta l_{эkv}$ :

$$\Delta l_{эkv} = \Delta l_{max} \left( 2 - \frac{P_p}{P_{max}} \right), \quad (5)$$

а также получена зависимость для расчета эквивалентного (расчетного) относительного удлинения  $\delta_3$ , (%) образца после его разрыва:

$$\delta_3 = \frac{\Delta l_{max}}{l_0} \left( 2 - \frac{P_p}{P_{max}} \right) \cdot 100\%, \quad (6)$$

где  $\Delta l_{max}$  – удлинение образца на участке до образования шейки;  $l_0$  – расчетная длина образца до его деформации;  $P_p$  – усилие разрыва образца;  $P_{max}$  – максимальное усилие растяжения образца перед образованием шейки.

В дальнейшем в стандарты целесообразно включить понятие коэффициента надежности металла  $(КНМ) = \sqrt{(ПСМ) \cdot \delta_3}$

**Выводы и рекомендации**

Рассмотрены новые способы анализа физико-механических свойств металла: трещиностойкости, средней величины относительного удлинения в шейке при разрыве образца, предельного (опасного) состояния металла, коэффициента запаса на металл, критериев пластичности и хрупкости. Кроме этого, уточнены стандарты на растяжение металла до разрыва и даны рекомендации о замене этих стандартов.

**Библиографический список**

1. Михайлов А. М. Сопротивление материалов / А. М. Михайлов. – М.: Стройиздат, 1989. – 352 с.
2. Феодосьев В. И. Десять лекций-бесед по сопротивлению материалов / В. И. Феодосьев. – М.: Наука, Физматгиз, 1969. – 176 с.
3. Гастев В. А. Краткий курс сопротивления материалов / В. А. Гастев. – М.: Наука, 1977. – 456 с.
4. Гудков А. А. Трещиностойкость стали / А. А. Гудков. – М.: Metallurgia, 1989. – 376 с.
5. Фридман А. Б. Механические свойства металлов: в 2 т. Т. 1. / А. Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974.
6. О повышении надежности металлоконструкций и труб / В. Б. Фурманов, Ю. С. Пройдак, А. Н. Головкин, Я. В. Фролов // Пластическая деформация металлов: монография / под ред. А. Н. Головкин. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – С. 213–217.
7. О некоторых новых критериях определения предельного состояния металла и труб из него /

И. А. Шапиро, В. Б. Фурманов, Ю. С. Пройдак [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – № 7. – С. 45–48.

8. К вопросу оценки надежности профильных труб / И. А. Шапиро, В. Б. Фурманов, В. В. Ларикив [и др.] // *Сталь*. – 2011. – № 7. – С. 73–76.

9. Фурманов В. Б. Новые критерии оценки трещиностойкости стальных труб / В. Б. Фурманов, В. В. Ларикив // *Теория и практика металлургии*. – 2008. – № 1. – С. 44–45.

10. Фурманов В. Б. О некоторых вопросах повышения надежности труб, используемых в металлоконструкциях / В. Б. Фурманов, В. В. Ларикив // *Теория и практика металлургии*. – 2009. – № 1–2. – С. 87–90.

11. Фурманов В. Б. Повышение надежности электросварных труб / В. Б. Фурманов, В. В. Ларикив // *Сталь*. – 2008. – № 8. – С. 86–87.

12. Фурманов В. Б. О необходимости внедрения новых стандартов на механические испытания труб / В. Б. Фурманов, В. В. Ларикив // *Сталь*. – 2009. – № 6. – С. 56–57.

13. Шапиро И. А. О некоторых новых критериях определения предельного состояния металла и труб из него / И. А. Шапиро, В. Б. Фурманов, В. В. Ларикив // *Теория и практика металлургии*. – 2010. – № 5–6. – С. 118–119.

19. О необходимости разработки и внедрения новых стандартов на испытание металла путем растяжения до разрыва / В. Б. Фурманов, Ю. С. Пройдак, А. Н. Головкин, Я. В. Фролов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – № 5. – С. 105–106.

**Поступила 10.02.2016**

---

**Metallurgical and Mining  
Industry**

[www.metaljournal.com.ua](http://www.metaljournal.com.ua)

---