

## Прочность тонколистовых металлов при ударном растяжении

Г. В. Степанов, В. И. Зубов, А. Н. Олисов, В. М. Токарев

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Описаны методики и результаты исследования прочности и пластичности тонколистовой мягкой стали толщиной 1,0 мм и высокопрочного алюминиевого сплава Д16Т толщиной 0,75 мм при ударном нагружении. Экспериментальные исследования включают испытания на растяжение образцов из листового металла с укороченной рабочей частью и образцов с острыми симметричными краевыми надрезами. Согласно результатам испытаний, переход от статического к ударному нагружению оказывает различное влияние на характеристики прочности и пластичности испытанных металлов в исследованном диапазоне скоростей растяжения. Поле продольных остаточных деформаций вблизи острого надреза (определяет область инициирования разрушения), сформированное в результате действия растягивающей нагрузки, характеризуется пониженной величиной максимальной деформации и малой протяженностью изолиний деформации. С удалением от границы исходного надреза область остаточных продольных деформаций расширяется.*

**Ключевые слова:** прочность, пластичность, ударное растяжение, остаточная деформация, разрушение, скорость деформации.

**Введение.** Для изготовления корпусных деталей автомобилей, самолетов, железнодорожных вагонов используются тонколистовые металлы. Чтобы оценить поведение конструкций в нештатных и аварийных ситуациях (резкая перегрузка, столкновение), обусловленных высокоскоростным деформированием и разрушением, необходимы уравнения состояния, которые позволяют учитывать основные особенности поведения листового металла в таких условиях нагружения. В литературных источниках достаточно широко представлены результаты испытаний образцов, изготовленных из толстолистового металла, при ударном растяжении и сжатии [1–3]. Деформирование и разрушение тонколистового металла имеет ряд особенностей, обусловленных плоским напряженным состоянием (трехосной деформацией) и технологией изготовления [4–6]. Прочность и разрушение указанного металла при повышенной и высокой скорости деформации исследованы недостаточно, и их дальнейшее развитие представляется актуальным для решения практических задач.

В данном сообщении приведены методики и результаты исследования прочности и пластичности, а также некоторые особенности деформирования и разрушения тонколистовой стали и высокопрочного алюминиевого сплава при статическом и ударном нагружении, приводящем к повышенной скорости деформации в областях пластического течения.

**Методики испытаний.** *Испытание образцов с укороченной рабочей частью.* Для определения прочности и пластичности тонколистового металла проводили испытания образцов с укороченной рабочей частью (на рис. 1 тип I) и динамометрической частью, длина которой (210 мм) достаточна для регистрации продольной нагрузки по упругой деформации в прямой продольной волне (до прихода волны, отраженной от закрепленного конца динамометра).

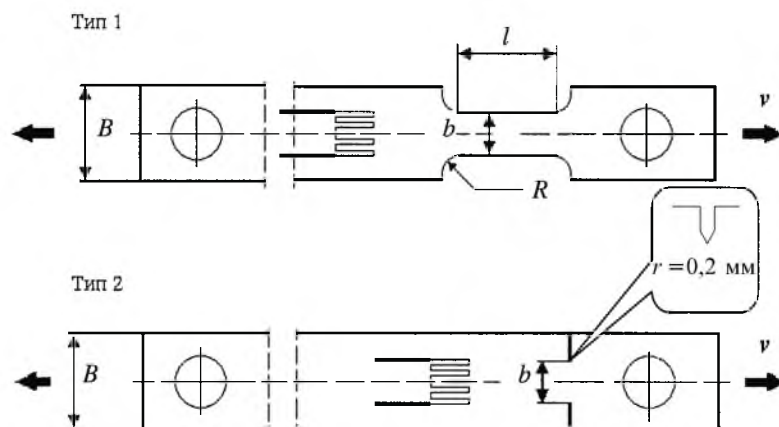


Рис. 1. Образцы для испытаний на растяжение.

При выбранных размерах рабочей (пластически деформируемой) части образца (длина  $l = 30$  мм, ширина  $b = 10$  мм) в ней обеспечивается близкое к однородному напряженно-деформированное состояние в процессе пластического деформирования вплоть до начала локализованного течения, вызванного образованием шейки. С достаточной точностью напряженное состояние в объеме рабочей части образцов может быть принято одноосным (до возникновения шейки).

Испытания на статическое растяжение проводили на стандартной испытательной машине “Инстрон” с графической записью диаграммы деформация в динамометрической части образца – удлинение. Последнее регистрировали стандартным тензометром на базе 10 мм.

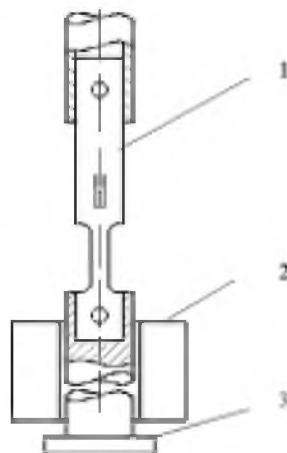


Рис. 2. Схема крепления и нагружения образцов на вертикальном копре: 1 – образец с паклепным тензодатчиком; 2 – нагружающая масса; 3 – наковальня.

Испытания на ударное растяжение со скоростью нагружения  $v_0 = 10$  м/с проводили на вертикальном копре со свободно падающим грузом (под действием силы тяжести) массой 60 кг [2]. Схема крепления образцов представлена на рис. 2. Испытания на ударное растяжение при  $v_0 > 10$  м/с

осуществляли на пневмогазопороховом копре [2] с аналогичной схемой крепления образцов. Начальную скорость ударного растяжения  $v_0$  в первом случае рассчитывали по высоте  $H$  падения нагружающей массы  $v_0 = \sqrt{2gH}$ , во втором – по времени ее движения на заданной базе измерения, определяемой электроконтактными датчиками. Из условия неупругого соударения нагружающей массы  $M$  и промежуточного стержня массой  $m$  номинальная скорость нагружения определяется следующим образом:  $v = v_0 M / (M + m)$ .

Упругую деформацию в динамометре, по которой рассчитывали растягивающую нагрузку, регистрировали тензорезисторами, наклеенными на образце в области его равномерной упругой деформации (на удалении 35 мм от границы с рабочей частью).

Диаграмму деформация динамометра–время записывали в блок памяти цифрового осциллографа и затем обрабатывали с использованием пакета прикладных программ EXCEL-97.

Характерные диаграммы условное напряжение – время при динамическом нагружении образцов с укороченной рабочей частью приведены на рис. 3. По этим диаграммам определяли предельные величины условных пределов текучести ( $\bar{\sigma}_T$ ). Условное сопротивление разрыву ( $\bar{S}_K$ ) определяется по резкому спаду нагрузки до нулевых значений. Правильно определить условный предел прочности для выбранных размеров образца не представляется возможным, поскольку имеет место интерференция волн в его рабочей части.

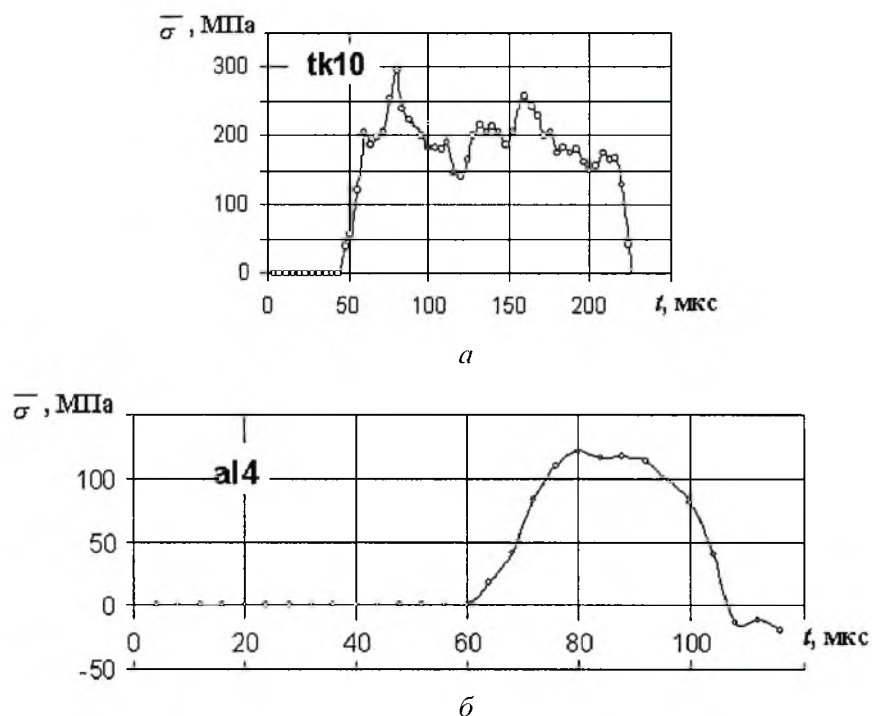


Рис. 3. Характерные диаграммы нагружения образцов из мягкой стали,  $v_0 = 107$  м/с (а) и алюминиевого сплава Д16Т,  $v_0 = 97$  м/с (б) при динамических испытаниях.

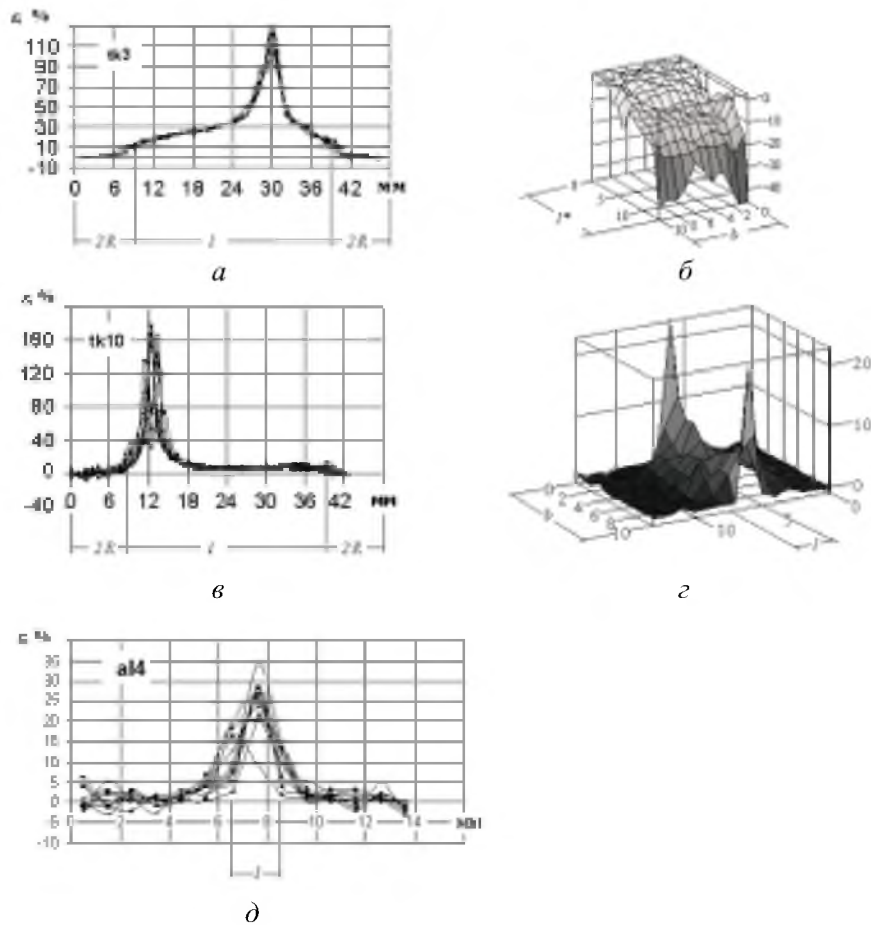


Рис. 4. Распределение остаточных деформаций на поверхности образцов: *а, б* – продольная и поперечная деформация мягкой стали при статических испытаниях; *в, г* – продольная деформация мягкой стали при динамических испытаниях соответственно при  $v_0 = 107$  и  $104$  м/с; *д* – продольная деформация сплава Д16Т при динамических испытаниях,  $v_0 = 97$  м/с.

Для оценки распределения остаточных деформаций в области, прилегающей к зоне разрушения, на поверхности образцов наносили прямоугольную сетку с шагом между реперными линиями 1,0 мм. Сопоставляя размеры между узлами вдоль продольных (поперечных) линий сетки до и после разрушения образцов, определяли распределение относительной остаточной деформации вдоль линий исходной разметки. Распределение остаточных деформаций при статических испытаниях представлено в виде остаточной продольной и поперечной деформации в плоскости ( $b \times l$ ) рабочей части образца и в зависимости от соответствующей координаты на рис. 4, *а, б* ( $l^*$  – расстояние до линии разделения (разрушения) образца) для мягкой стали.

Распределение остаточных поперечных деформаций недостаточно показательно ввиду их малой величины, поэтому на рис. 4, *в* и далее приведено распределение продольных остаточных динамических деформаций в плоскости ( $b \times l$ ) рабочей части образца.

## Данные испытаний на растяжение образцов из тонколистовых материалов

Материал	Тип образца	Условное обозначение образца	Размеры образца, $B \times \delta \times b \times l$ , мм	$v_0$ , м/с	$\bar{\sigma}_T$ , МПа	$\bar{S}_K$ , МПа	$\varepsilon_{\max}$ , %
Сталь	1	tk3	22,8×1,0×10,0×30,0	2·10 <sup>-5</sup>	124	101,7	125
		tk11		10	131	104,1	148
		tk10		107	170	168,6	178
	2	tk2	22,8×1,0×10,0×2,0	2·10 <sup>-5</sup>	126	50,0	86
		tk9		10	253	71,5	73
		tk4*		104	—	—	22
		tk8		104	284	82,6	85
	2	tk1	48,0×1,0×20,0×2,0	2·10 <sup>-5</sup>	133	100,0	57
		tk13*		10	127	—	—
		tk14		10	180	141,4	52
Сплав Д16Т	1	al3	23,3×0,75×10,0×30,0	2·10 <sup>-5</sup>	123	170,9	32
		al10		10	122	167,7	56
		al8		100	—	—	73
		al9*		103	124	151,0	—
	2	al2	23,3×0,75×10,0×2,0	2·10 <sup>-5</sup>	150	150,0	21
		al6		10	150	144,9	36
		al4		97	121	80,7	34
	2	al1	48,0×0,75×20,0×2,0	2·10 <sup>-5</sup>	143	140,0	36
		al13		10	150	110,0	31

\* Разрушение в захвате.

*Испытание образцов с боковыми надрезами.* Испытание образцов с симметричными боковыми надрезами (на рис. 1 тип 2) позволяет оценить совместное влияние концентрации напряжений и скорости нагружения на разрушающую нагрузку и распределение остаточной пластической деформации (ее предельную величину). Вблизи концентратора напряженное состояние отличается от одноосного (более жесткое и близкое к плоскому) и приближается к одноосному вблизи продольной оси образца.

Схемы нагружения, регистрации и методики обработки регистрируемой информации, полученной при растяжении образцов с надрезами, идентичны использованному при испытании образцов с укороченной рабочей частью.

Характерные диаграммы условное напряжение – время при ударном растяжении образцов типа 2 приведены на рис. 3,б.

Аналогичные оценки распределения остаточной продольной динамической деформации на поверхности образцов в плоскости ( $b \times l$ ) представлены для мягкой стали и алюминиевого сплава Д16Т на рис. 4,з,д, где  $l$  соответствует ширине надреза с углом у вершины 36° и радиусом закругления 0,2 мм. Следует отметить характерный вид распределения остаточной продольной деформации на поверхности образца из мягкой стали tk4, полученный остановкой начального страгивания трещин при условии динамического разрушения в захвате образца (рис. 4,з).

Полный объем данных исследований на растяжение образцов из тонколистовых материалов представлен в таблице.

**Анализ результатов испытаний.** Испытание образцов с укороченной рабочей частью. Согласно результатам испытания образцов с укороченной рабочей частью, переход от статического к ударному нагружению оказывает различное влияние на характеристики прочности и пластичности испытанных металлов в исследованном диапазоне скоростей растяжения. Как следует из диаграмм, приведенных на рис. 5, повышение скорости деформации, определяемой как  $\dot{\epsilon}' = v_0 / l$ , где  $v_0$  – начальная скорость растяжения образца, приводит к увеличению характеристик прочности и незначительному понижению характеристик пластичности мягкой стали, в то время как характеристики прочности алюминиевого сплава Д16Т не повышаются. Для указанного сплава наблюдается повышение характеристик пластичности при ударном нагружении, которые несколько выше, чем при статическом нагружении. Истинные характеристики прочности определялись с учетом размеров рабочей части образца:

$$\sigma_T = \bar{\sigma}_T (B / b);$$

$$S_K = \bar{S}_K (B / b)(F_0 / F),$$

где  $F_0, F$  – площади поперечных сечений рабочей части образца до и после испытаний.

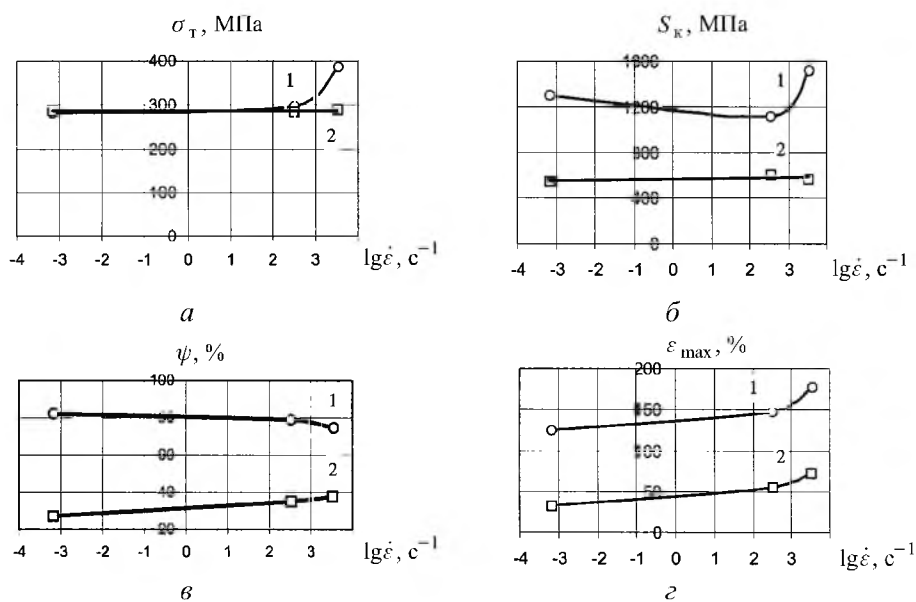


Рис. 5. Зависимость характеристик прочности  $\sigma_T$  (а),  $S_K$  (б) и пластичности  $\psi$  (в),  $\epsilon_{max}$  (г) от скорости деформации для образцов типа 1 из мягкой стали (1) и алюминиевого сплава Д16Т (2).

Поле продольных остаточных деформаций в образцах с укороченной рабочей частью, сформированное в результате действия растягивающей нагрузки, характеризуется повышенной величиной максимальных деформа-

ций и малой протяженностью вблизи области разрушения. Максимальная остаточная деформация имеет место в средней части области разрушения. Увеличение скорости деформации при испытании образцов приводит к росту остаточных максимальных деформаций с постепенной ее локализацией вблизи области разрушения.

*Испытание образцов с боковыми надрезами.* Аналогичная тенденция поведения материалов в зависимости от скорости деформации наблюдается при испытании образцов с острыми боковыми надрезами с той лишь разницей, что характеристики прочности и пластичности имеют свои соответствующие величины (таблица). Поле продольных остаточных деформаций в образцах с острыми боковыми надрезами, сформированное в результате действия растягивающей нагрузки, характеризуется пониженной величиной максимальных деформаций и малой протяженностью вблизи начальной границы надреза (рис. 4,з,д). Наличие концентратора обуславливает возникновение начального разрушения, которое затем распространяется в поперечном направлении к оси образца. Вблизи продольной оси образца величина продольной деформации и протяженность деформированной области максимальны. По результатам измерений, деформация в поперечном направлении значительно ниже, чем в продольном. Переход от статического растяжения к ударному приводит к уменьшению протяженности области остаточных деформаций, без существенного изменения их максимальной величины. Максимальная деформация у оси образцов из алюминиевого сплава Д16Т примерно соответствует деформации, определяемой при испытании на статическое растяжение образцов с короткой рабочей частью, однако для мягкой стали имеет место существенное отличие.

При испытании образцов с увеличенной шириной распределение остаточной продольной деформации для мягкой стали характеризуется большей равномерностью и пониженной величиной деформации в центральной области образца, для алюминиевого сплава – постоянной величиной остаточной продольной деформации. Это свидетельствует о влиянии концентратора на распределение деформации в ограниченной области, прилегающей к границе исходного надреза протяженностью порядка 2...3 мм.

**Заключение.** Переход от статического нагружения к ударному оказывает существенное влияние на характеристики прочности и пластичности мягкой стали, в то время как характеристики прочности алюминиевого сплава Д16Т не изменяются, а пластичность повышается незначительно в исследованном диапазоне скоростей растяжения.

Поле продольных остаточных деформаций вблизи острого надреза, сформированное вследствие инициирования развития трещины, характеризуется пониженной величиной максимальной деформации и малой протяженностью в продольном направлении.

При распространении трещины (удалении ее вершины от границы исходного концентратора) протяженность области пластического деформирования и максимальная остаточная деформация возрастают.

Переход от статического растяжения к ударному приводит к уменьшению вблизи острого надреза протяженности области остаточных деформаций, без существенного изменения их максимальной величины.

Работа выполнена по программе INTAS-96-2141. Авторы выражают искреннюю благодарность координатору проекта проф. Я. Клепачко за поддержку работы, полезные советы и замечания.

## Резюме

Описано методику і результати досліджень міцності та пластичності тонколистової м'якої сталі товщиною 1,0 мм і високоміцного алюмінієвого сплаву Д16Т товщиною 0,75 мм при ударному навантаженні. Експериментальні дослідження включають випробування на розтяг зразків із листового металу з укороченою робочою частиною і зразків із гострими симетричними боковими надрізами. За результатами випробувань, перехід від статичного до ударного навантаження зумовлює різний вплив на характеристики міцності та пластичності випробуваних металів у досліджуваному діапазоні швидкостей розтягу. Поле поздовжніх залишкових деформацій поблизу гострого надрізу (для ініціювання руйнування), сформоване в результаті дії розтягу, характеризується зниженою величиною максимальної деформації і малою протяжністю ізоліній деформації. З віддаленням від границі початкового надрізу область залишкових поздовжніх деформацій розширюється.

1. *Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М.* Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 488 с.
2. *Степанов Г. В.* Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 287 с.
3. *Ващенко А. П.* Деформирование и разрушение конструкционных материалов при высокоскоростной деформации ( $10^2 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$ ) и температурах 77...773 К: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Киев, 1995. – 48 с.
4. *Степанов Г. В.* Испытание на растяжение с высокой скоростью металлических листовых материалов // Пробл. прочности. – 1980. – № 7. – С. 37 – 38.
5. *Степанов Г. В., Маковей В. А.* Динамическая вязкость разрушения. – Киев: Наук. думка, 1993. – 140 с.
6. *Холл У. Дж., Кихара Х., Зут В., Уэллс А. А.* Хрупкое разрушение сварных конструкций. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

Поступила 15. 10. 99