

## Экспериментальные методы и механические свойства конструкционных материалов при высокоскоростной деформации ( $10^2 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$ ) и температурах 77...773 К

А. П. Ващенко

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев, Украина

*Представлены основные методические особенности и результаты механических испытаний конструкционных материалов при различных видах нагружения со скоростью деформации до  $10^5 \text{ с}^{-1}$  в диапазоне температур 77...773 К. Установлено повышение прочности всех исследуемых материалов с ростом скорости деформации и наиболее значительное при скоростях более  $10^3 \text{ с}^{-1}$ . При этом пластичность металлов возрастает, полимеров – падает. Предложена схема механического состояния металлов в зависимости от скорости деформации и температуры.*

**Ключевые слова:** прочность, пластичность, скорость деформации, температура, конструкционные материалы.

**Введение.** С целью изучения закономерностей изменения сопротивления конструкционных материалов деформированию и разрушению в диапазонах скорости деформации  $10^{-4} \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$  и температур 77...773 К в Институте проблем прочности НАН Украины разработаны методы механических испытаний материалов при различных видах высокоскоростного нагружения и создано специальное оборудование. Скорости нагружения до 20 м/с реализуются при испытаниях на вертикальных копрах со свободно падающим грузом, скорости до 500 м/с и выше – на пневмопороховом копре [1, 2].

Влияние скорости деформации на прочность и пластичность материалов определяют по результатам так называемых квазистатических испытаний, при которых напряженное и деформированное состояние в рабочей части образца может быть принято однородным.

**Методы высокоскоростных испытаний.** Метод высокоскоростных испытаний на растяжение базируется на реализации в широком диапазоне скорости нагружения  $V$  ( $10^{-6} \dots 3 \cdot 10^2 \text{ м/с}$ ) постоянной величины скорости деформации  $\dot{\epsilon}$ , при которой образцу задается постоянная скорость приращения абсолютного удлинения.

Эксперименты осуществляют ударом бойка кольцевого сечения 1 (рис. 1,а) по наковальне 5, соединенной с одним концом образца 2. Другой конец образца связан с упругим динамометром 4, на котором для измерения деформации наклеены тензорезисторы 3. При этом кинетическая энергия бойка как минимум на порядок превышает потери на удар и разрушение образца. Экспериментально установлено и численным моделированием подтверждено, что испытания на одноосное растяжение обеспечивают предельно достижимую скорость пластической деформации порядка  $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ .

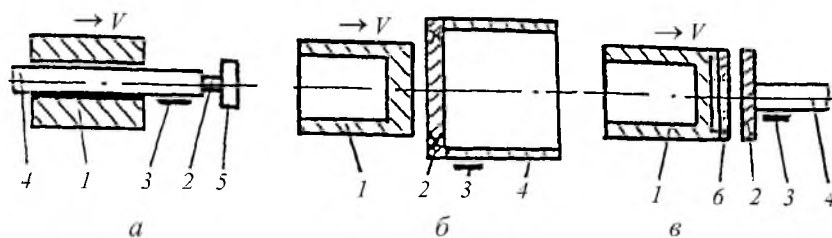


Рис. 1. Схемы испытаний на растяжение (а), сдвиг (б) и срез (в): 1 – боек; 2 – образец; 3 – тензорезистор; 4 – динамометр; 5 – наковальня; 6 – кольцо.

В зависимости от типа используемых образцов динамические испытания при плоском напряженном состоянии с примерно постоянными скоростями условного относительного сдвига  $\dot{\gamma}$  до  $5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  проводят по двум схемам, условно разделенным на сдвиг (образец 2, рабочая часть которого образована двумя симметричными кольцевыми выточками, рис. 1,б) и на срез (образец 2 представляет собой круглую пластинку, устанавливаемую на торце закрепленного динамометра 4, рис. 1,в). При этом диаметр выбираемой “пробки” практически равен диаметру динамометра.

Поведение материалов при скоростях деформации до  $\sim 5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  позволяют изучать также методы механических испытаний на сжатие, сжатие со сдвигом, внедрение конического бойка в преграду [3].

Для каждого вида испытаний на установках имеются индивидуальные съемные узлы крепления образца.

**Результаты испытаний.** Результаты квазистатических испытаний на одноосное растяжение сталей, титановых и алюминиевых сплавов разного уровня прочности [1–3] подтвердили отмечаемое ранее М. Мэнджоинном, Дж. Хардингом, У. Линдхольмом и В. Петушковым повышение характеристик прочности и пластичности металлов с ростом скорости деформации, особенно при скоростях выше  $10^3 \dots 10^4 \text{ с}^{-1}$  (с целью иллюстрации приведены данные для хромоникелемолибденовой стали (рис. 2 и 3) и арможелеза (рис. 4).

Микрофрактографический анализ изломов образцов из исследуемых сталей показал, что и в статическом режиме, и при максимально достигнутой в экспериментах скорости пластической деформации разрушение происходит по вязкому механизму с образованием характерного чашечного излома, свидетельствующего о высокой энергоемкости разрушения.

В отличие от металлов с повышением прочности полимеров происходит их охрупчивание.

Результаты экспериментальных исследований соответствуют установленным ранее [4–6] основным закономерностям поведения материалов при ударном нагружении в условиях комнатной температуры. Показано, что наиболее интенсивно при ударных нагрузках возрастает предел текучести, причем с увеличением степени деформации чувствительность металлов к скорости деформации уменьшается. Максимум на диаграмме усилие – время с ростом скорости деформации смещается в сторону малых деформаций, т.е.

участок деформационного упрочнения материала уменьшается. При скоростях деформации порядка  $10^4 \text{ с}^{-1}$  динамические пределы текучести и прочности практически совпадают.

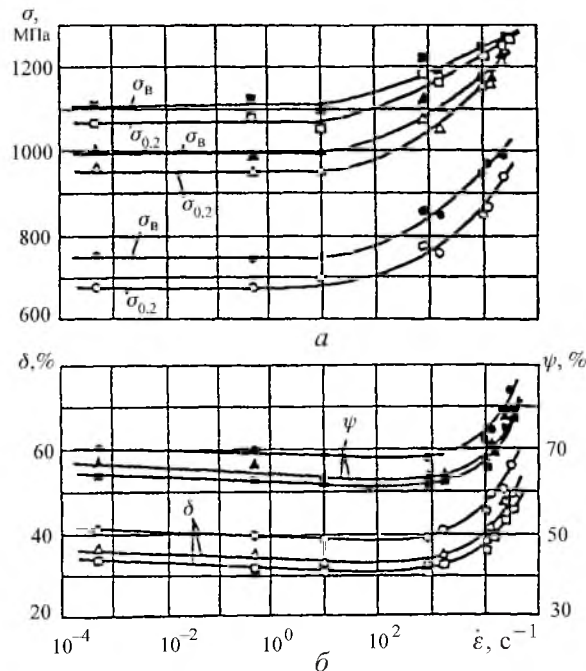


Рис. 2. Зависимость характеристик прочности (а) и пластичности (б) хромоникелемолибденовой стали, термообработанной на разный уровень прочности, от скорости деформации.

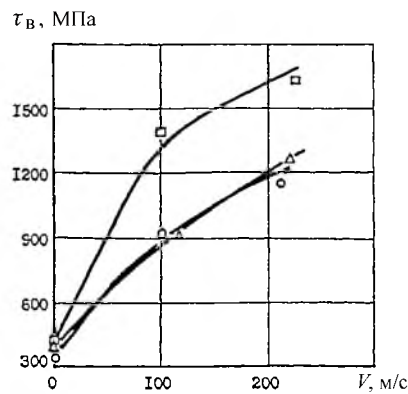


Рис. 3. Зависимость предела прочности хромоникелемолибденовой стали, термообработанной на разный уровень прочности, от скорости деформирования при испытании на сдвиг.

С повышением статической прочности материалов их чувствительность к скорости деформации падает. Так, стали со статическим пределом текучести примерно от 500 до 1200 МПа практически нечувствительны к скоростям деформации до  $10 \text{ с}^{-1}$ . Увеличение скорости деформации до  $10^3 \text{ с}^{-1}$  не оказывает заметного влияния на механические свойства высокопрочных сталей.

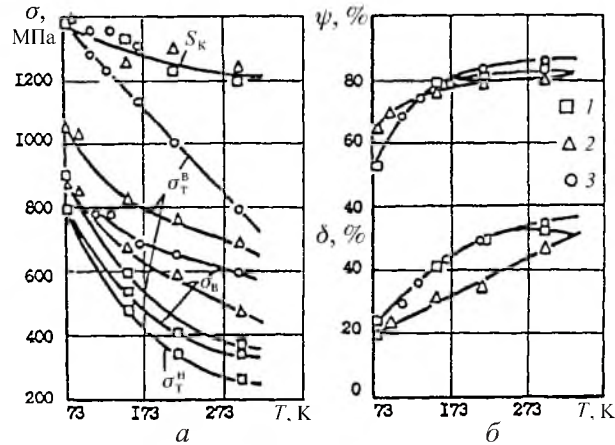


Рис. 4. Зависимость характеристик прочности (а) и пластичности (б) армко-железа от скорости деформирования и температуры: 1 –  $V = 2,0 \dots 2,5$  мм/мин; 2 –  $V = 5,8$  м/с; 3 –  $V \approx 75$  м/с.

Исследуемые алюминиевые сплавы в зависимости от уровня прочности при статическом растяжении нечувствительны к скоростям до  $10^3 \dots 5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ .

Пересчитанные с помощью вытекающих из третьей теории прочности соотношений  $\sigma = 2\tau$ ;  $\dot{\epsilon} = 2/3\dot{\gamma}$  характеристики прочности конструкционных материалов при сдвиге (срезе) хорошо коррелируют с соответствующими значениями прочности при растяжении, что свидетельствует о наиболее интенсивном росте сопротивления материалов деформированию при скоростях деформации более  $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  (рис. 5).

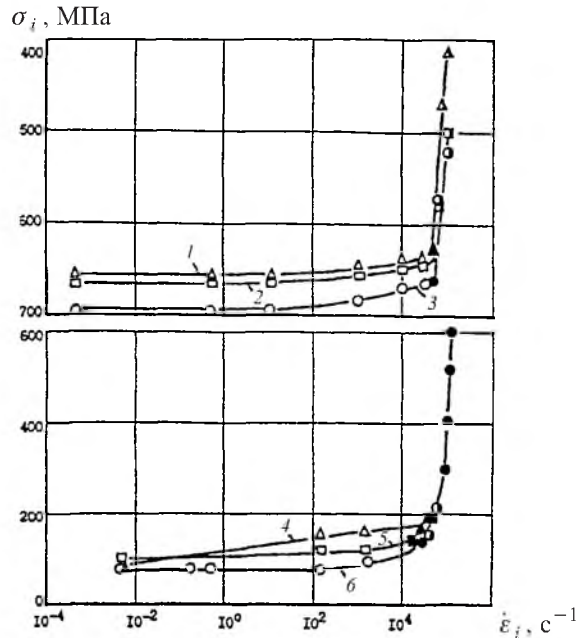


Рис. 5. Зависимость сопротивления исследованных материалов деформированию от скорости деформации: 1–3 – хромоникелемолибденовая сталь, термообработанная на разный уровень прочности; 4, 5 – полиамиды; 6 – капролон. (Светлые точки – испытания на растяжение, полутемные – испытания на сдвиг, темные – на срез).

Высокоскоростные испытания на растяжение в широком диапазоне повышенных и низких температур показали, что чувствительность металлов к скорости деформации зависит от структуры кристаллической решетки и определяется конкретными температурно-скоростными условиями деформирования.

На основе полученных экспериментальных данных о совместном влиянии высокоскоростной деформации и повышенных температур на механические свойства малоуглеродистых сталей, используемых для производства жести и автолиста, и метода термомеханических коэффициентов применительно к процессам тонколистовой прокатки разработаны аналитические зависимости сопротивления малоуглеродистых сталей деформированию от степени и скорости деформации, а также от температуры [7].

Экспериментально установлено отсутствие эквивалентности влияния на механические свойства металлов понижения температуры (до 77 К) и повышения скорости деформации (до  $10^4 \text{ с}^{-1}$ ). Показано существенное повышение характеристик прочности металлов при понижении температуры и увеличении скорости деформации без уменьшения показателей пластичности по сравнению с таковыми при статических испытаниях (рис. 4).

Более поздние исследования сталей на трещиностойкость также свидетельствуют о том, что увеличение скорости нагружения при низких температурах не влияет на их охрупчивание [8].

Для металлов в низкотемпературном диапазоне установлено, что с повышением скорости деформации предел текучести возрастает, приближаясь к величине истинного сопротивления разрыву  $S_K$ . Как видно из рис. 4, с понижением температуры испытания армко-железа при скоростях растяжения примерно 75 м/с ( $\dot{\epsilon} \approx 10^4 \text{ с}^{-1}$ ) наблюдается линейное увеличение верхнего предела текучести  $\sigma_T^B$ , величина которого при  $T \approx 77 \text{ К}$  достигает  $S_K$ . При этом все образцы, испытанные при  $T < 100 \text{ К}$ , разрушились хрупко. Следовательно, по аналогии со схемой Иоффе [9], точка пересечения кривых верхнего предела текучести и истинного сопротивления разрыву соответствует критической температуре хрупкости  $T_B$ , и в области температуры 77 К для армко-железа при скорости деформации  $\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$  имеет место критический интервал.

Анализ результатов высокоскоростных испытаний металлов на растяжение при низких температурах показал, что их поведение в зависимости от скорости деформации и температуры описывается схемой механического состояния, учитывающей два различных вида сопротивления металлов разрушению: вязкий срез и хрупкий отрыв (рис. 6). В соответствии с этой схемой переход металлов в хрупкое состояние при заданной температуре определяется критической скоростью деформации ( $\dot{\epsilon}_3$ ), при которой кривые изменения сопротивления деформированию (предела текучести  $\sigma_T$ ) и истинного сопротивления разрыву  $S_K$  в зависимости от скорости деформации и температуры пересекаются.

Из сопоставления результатов испытаний на растяжение, трещиностойкость и трехточечный изгиб падающим грузом следует, что при низких температурах определяющее влияние на переход металлов из вязкого состо-

яния в хрупкое оказывает не скорость деформации, а напряженно-деформированное состояние в зоне разрушения деформируемого тела.

Чем более жесткий способ нагружения и сильнее неоднородность напряженно-деформированного состояния испытуемого материала, затрудняющие протекание пластической деформации, тем легче совершается переход материала из пластического состояния в хрупкое.

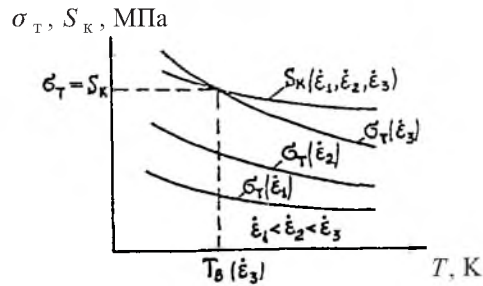


Рис. 6. Схема механического состояния металлов.

**Заключение.** Полученные при различных схемах нагружения экспериментальные результаты свидетельствуют о значительном повышении прочности всех исследуемых материалов с увеличением скорости деформации. При этом в отличие от полимеров прочность металлов повышается без снижения пластичности.

Установлено отсутствие эквивалентности влияния на механические свойства металлов понижения температуры и повышения скорости деформации.

### Резюме

Наведено основні методичні особливості і результати механічних випробувань конструкційних матеріалів за різних видів навантаження зі швидкістю деформації до  $10^5 \text{ с}^{-1}$  в інтервалі температур 77...773 К. Установлено збільшення міцності усіх досліджуваних матеріалів із ростом швидкості деформації і найбільше при швидкості  $> 10^3 \text{ с}^{-1}$ . При цьому пластичність металів зростає, полімерів – падає. Запропоновано схему механічного стану металів у залежності від швидкості деформації і температури.

1. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.
2. Ващенко О. П. Механічні випробування конструкційних матеріалів за високошвидкісного розтягу у широкому діапазоні температур. Навчальний посібник. – Київ: Національний трансп. ун-т, 2000. – 93 с.
3. Ващенко О. П. Методичні основи та результати експериментальних досліджень опору конструкційних матеріалів високошвидкісній деформації за різних напружених станів. Навчальний посібник. – Київ: Укр. трансп. ун-т, 1999. – 52 с.

4. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. – Томск: Полиграфиздат, 1999. – Т. 5. – 699 с.
5. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. Н. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
6. Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х. Ф. и др. Динамика удара. – М.: Мир, 1985. – 296 с.
7. Ващенко А. П., Суңцов Г. Н., Белалова Г. В. и др. Механические свойства малоуглеродистых сталей в широком диапазоне температур и скоростей деформации применительно к процессам тонколистовой прокатки // Пробл. прочности. – 1990. – № 8. – С. 76 – 84.
8. Ващенко А. П., Маковей В. А. Динамическая прочность и трещиностойкость металлов в диапазоне температур 293...777 К // Физ.-хим. механика материалов. – 1992. – № 1. – С. 14 – 18.
9. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 1. – 472 с.

Поступила 12. 07. 2001