

Влияние скорости деформации на предел текучести сталей различной прочности

В. И. Зубов, Г. В. Степанов, А. В. Широков

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

Приведены результаты испытаний на ударное сжатие образцов из мягкой и высокопрочной сталей. Отмечено качественное подобие зависимостей сопротивления испытанных металлов от скорости деформации. Показано, что с повышением скорости деформации сопротивление сжатию металлов существенно возрастает и выходит на насыщение, различие в уровне сопротивления металлов уменьшается. Рассмотрены некоторые особенности деформирования и разрушения испытанных металлов на микроструктурном уровне.

Ключевые слова: ударное сжатие, скорость деформации, адиабатический процесс, пластическая деформация, микроструктура, полоса сдвига.

Обозначения

- δ – толщина образца
- b – ширина полосы рабочей части образца
- h – шаг прорезей образца
- ρ – плотность исследуемого металла
- c_p – удельная теплоемкость металла
- c_0 – скорость продольной упругой волны в металле
- t_i – время достижения однородного напряженно-деформированного состояния в образце
- ε_i – интенсивность деформации
- ε' – скорость пластической деформации
- ε_{\max} – максимальная деформация
- σ_T – предел текучести металла
- $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентное напряжение при плоской деформации
- ΔT – повышение температуры металла образца
- v_0 – скорость ударника
- v – скорость сжатия образца

Введение. Известно, что конструкционные металлы (мартенситные и аустенитные стали, титановые, алюминиевые и другие сплавы) чувствительны к скорости деформации. С ее увеличением сопротивление большинства металлов деформированию [1–5] возрастает, особенно при $\varepsilon' \geq 10^3 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$.

В случае численного моделирования поведения металлов (при высоких скоростях деформации) обычно используют упруговязкопластическую модель [1, 6]. При этом необходимо располагать параметрами определяющих уравнений поведения металлов, учитывающими влияние скорости деформации (в широком диапазоне ее изменения) на сопротивление металлов дефор-

мированию. Недостаточный объем достоверных экспериментальных данных при $\varepsilon' \geq 10^3 \text{ с}^{-1}$ обусловлен ограниченными возможностями существующих методов испытаний [5]. В настоящей работе исследовалось влияние скорости деформации на предел текучести отожженной низкоуглеродистой и высокопрочной (твердость 43 HRC) сталей в диапазоне скоростей сжатия $10^3 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$, имеющих различную статическую прочность. При этом использовалась разработанная ранее методика [1, 7].

Методика испытаний. Динамическое сжатие образца *б* в виде тонкой пластины с параллельными прорезями (рис. 1) осуществляли с помощью газопневматической установки. Его рабочая часть (узкие полосы металла между прорезями) деформируется между плоскими поверхностями плиты-ударника 2 и плиты-наковальни 3. Ударник, закрепленный на легком алюминиевом поддоне 1 в виде стакана из алюминиевого сплава диаметром 90 мм и длиной 60 мм, разгоняется до заданной скорости в диапазоне 50...400 м/с по каналу ствола давлением сжатого газа. В проведенных экспериментах использовали ударник диаметром 88 мм и толщиной 10 мм и наковальню диаметром 120 мм и толщиной 15 мм, изготовленные из закаленной стали со шлифованными поверхностями. Образец с наковальней закрепляли на фланце 7 вблизи дульного среза ствола. Опорную поверхность фланца перед нагружением устанавливали параллельно поверхности ударника, что обеспечивало плоское соударение образца и ударника. Диэлектрический датчик давления 4 прижимали к тыльной поверхности наковальни пластиной из органического стекла 5. Сигнал датчика регистрировали с помощью цифрового осциллографа, соединенного с ЭВМ. Для повышения надежности регистрации использовали два параллельно соединенных цифровых осциллографа.

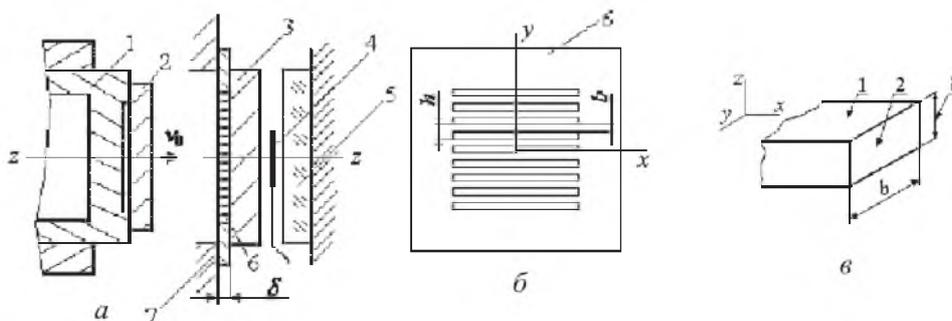


Рис. 1. Схема нагружения (*а*), образец на ударное сжатие (*б*) и элемент полосы образца с указанием поверхностей (1 и 2), используемых для исследования микротвердости и микроструктуры (*в*).

Измерение скорости ударника. По времени пролета ударником базового участка между двумя электрическими контактами, расположенными в конце ствола, определяли его скорость. Регистрацию скорости проводили с использованием электронного частотомера ЧЗ-34. Для повышения надежности регистрации использовали два параллельно соединенных частотомера.

Сигнал, полученный с датчика давления, обрабатывали и затем определяли давление сжатия металла рабочей части образца.

Для испытаний на сжатие использовали аналогичные образцы (рис. 1,б) в виде пластин толщиной δ и размером рабочей части 90×90 мм. Толщина образцов из высокопрочной стали составляла 2 мм, из низкоуглеродистой – 1 и 2 мм. Образцы получали путем разрезания пластин в состоянии поставки после прокатки. Механическая обработка включала шлифование поверхностей и изготовление пазов дисковой фрезой. Образцы из низкоуглеродистой стали подвергали отжигу при температуре $\sim 700^\circ\text{C}$ в течение 1 ч с последующим охлаждением вместе с печью.

Краткий анализ методики. В полосе образца в результате интерференции продольных волн, распространяющихся со скоростью упругой волны вдоль оси z , перпендикулярной плоскости xy , за время $t_i \approx (2 \dots 4)\delta/c_0 = 1,3 \cdot 10^{-6}$ с ($\delta = 2$ мм, $c_0 = 6050$ м/с [1]) возникает напряженно-деформированное состояние (НДС), близкое к однородному двухосному. Скорость деформации полосы рассчитывали как $\varepsilon' = v/\delta = [v_0 - 2\sigma_T(b/h)/(\rho c_0)]/\delta$.

Толщину ударника определяли из условия сжатия полосы до максимальной деформации $\varepsilon_{\max} = 0,5$ с постоянной скоростью, т.е. до прихода волны, отраженной от тыльной поверхности ударника и снижающей скорость сжатия. Волна разгрузки от боковой поверхности ударника за время сохранения постоянной скорости деформации распространяется к центру ударника на расстояние ~ 20 мм. Следовательно, при использовании ударника диаметром 88 мм деформирование центральной части образца диаметром около 40 мм происходит без воздействия боковой разгрузки.

Максимальное адиабатическое повышение температуры (пренебрежение теплопроводностью обосновано при высокоскоростном нагружении) к моменту установления однородного НДС в металле центральной части образца не может существенно изменить его сопротивление сжатию. Для образца из высокопрочной стали при $\varepsilon_i = t_i \cdot \varepsilon' = 1,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 \cdot 10^5 \approx 0,2$; $\sigma_T = 2 \cdot 10^9$ Па; $\rho = 7,85 \cdot 10^3$ кг/м³; $c_p = 6 \cdot 10^2$ Дж/(кг \cdot °C) [8] имеем

$$\Delta T = \sigma_T \varepsilon_i / (\rho c_p) \approx 2 \cdot 10^9 \cdot 0,2 / (7,85 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^2) \approx 85^\circ\text{C}.$$

При меньших величинах скорости деформации и предела текучести металла повышение температуры еще меньше.

Результаты экспериментов. Построенная на рис. 2 кривая является результатом обработки типичной осциллограммы сигнала, полученного при динамическом сжатии образца из отожженной стали ($\delta = 2$ мм, $v_0 = 201$ м/с). Там же стрелкой показана точка, принимаемая в качестве предела текучести металла при данной скорости деформации.

На рис. 3 представлена зависимость предела текучести высокопрочной и отожженной сталей от скорости деформации. Сплошной линией показана аналогичная зависимость, рассчитанная по уравнению Джонсона–Кука.

Испытания на статическое растяжение проводили на стандартной испытательной машине ИР 5047-50. При этом использовали полученные ранее [9] данные о растяжении образцов из высокопрочной стали с высокой скоро-

стью деформации (на рис. 3 темные точки). Согласно критерию текучести Мизеса, эквивалентное напряжение при плоской и одноосной деформации испытуемого металла связано соотношением $\sigma_{\text{эkv}} = 0,87\sigma_{\text{T}}$, поэтому результаты испытаний на сжатие (двухосное НДС) и на растяжение (одноосное НДС) могут быть представлены единой кривой, описывающей влияние скорости деформации на эквивалентное напряжение. Как видно, сопротивление всех металлов существенно зависит от величины скорости деформации.

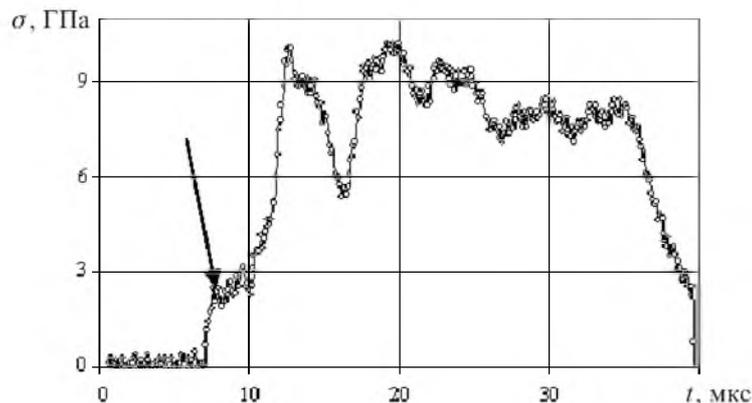


Рис. 2. Типичная осциллограмма обработанного сигнала, полученного при динамическом сжатии образца из отожженной стали.

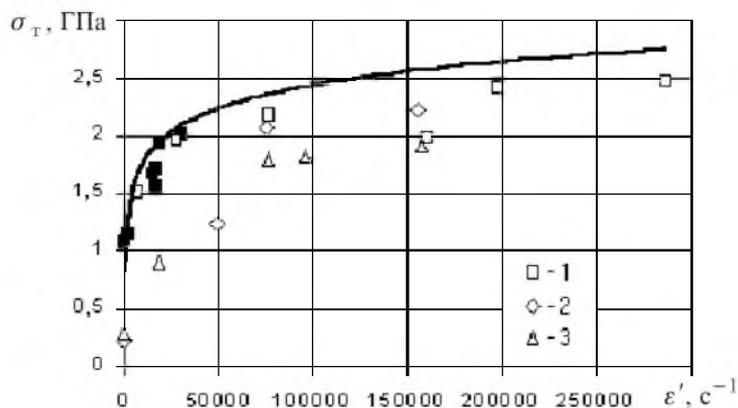


Рис. 3. Результаты испытаний на динамическое сжатие по описанной методике (светлые точки): 1 – высокопрочная сталь; 2, 3 – отожженная сталь, $\delta = 1$ и 2 мм соответственно.

Полученные графики качественно можно описать аналогичными кривыми, которые имеют участок значительного роста и пологий участок выхода предела текучести металла на насыщение. Отметим, что относительное повышение сопротивления отожженной стали выше, чем высокопрочной. Так, предел текучести высокопрочной стали при высокоскоростной деформации в 2–2,5 раза выше, чем при квазистатическом деформировании, в то время как предел текучести отожженной стали повышается в 6–8 раз. Следовательно, с увеличением уровня скорости деформации различие в сопротивлении отожженной и высокопрочной сталей снижается.

Заметим, что сопротивление образцов из отожженной стали толщиной 1 мм несколько выше, чем образцов из того же металла толщиной 2 мм (на рис. 3 точки 2, 3). Это может быть вызвано более однородным деформированием образцов толщиной 1 мм (при той же скорости деформации короче период выравнивания напряжений в объеме металла).

Расчет коэффициентов вязкости. Для расчета коэффициентов вязкости использовали следующую формулу [1]:

$$\mu = \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}'}$$

С целью упрощения расчетов характерные участки приведенных на рис. 3 графиков (точки 1, 2) аппроксимировали прямыми линиями, наклон которых характеризует вязкость металла в данном диапазоне скорости деформации. Полученные значения коэффициентов вязкости и диапазоны скоростей деформации, в которых они действительны, представлены в таблице.

Значения коэффициентов вязкости и диапазоны скоростей деформации, в которых они действительны

| Сталь | Диапазон скорости деформации (с ⁻¹) | Значение коэффициента вязкости (Па·с) |
|---------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Мягкая | 200...76200 | 19685 |
| | 76200...157876 | 1530 |
| Высокопрочная | 400...30100 | 30897 |
| | 30100...287010 | 1798 |

Измерение микротвердости. Неоднородность пластической деформации в металле влияет на уровень его сопротивления и микротвердость. Изучение микронеоднородного деформирования в процессе высокоскоростного сжатия крайне затруднено, однако остаточное распределение микротвердости в образце после нагружения позволяет получить дополнительные данные для оценки степени однородности деформирования металла.

Измерение микротвердости проводили по методу Виккерса алмазной пирамидой при нагрузке 100 г. На рис. 4 представлено типичное распределение микротвердости в полосе образца из отожженной стали до и после динамических испытаний ($v_0 \approx 201$ м/с). Результаты измерений микротвердости в направлении оси z по поверхности 2 полосы (рис. 1,в) вдоль ее оси симметрии представлены на рис. 4,а, в направлении оси y по поверхности 1 – иллюстрирует рис. 4,б. Микротвердость поверхности 2 понижается при удалении от поверхности нагружения, что можно объяснить повышенной скоростью деформации в металле образца со стороны удара и, следовательно, большим упрочнением. Центральная часть образца поверхности 1 имеет микротвердость, которая выше, чем на периферийных участках, по-видимому, из-за различной степени стесненности пластической деформации. Результаты измерений микротвердости свидетельствуют о неоднородном упрочнении металла и подтверждают его микронеоднородное деформирование.

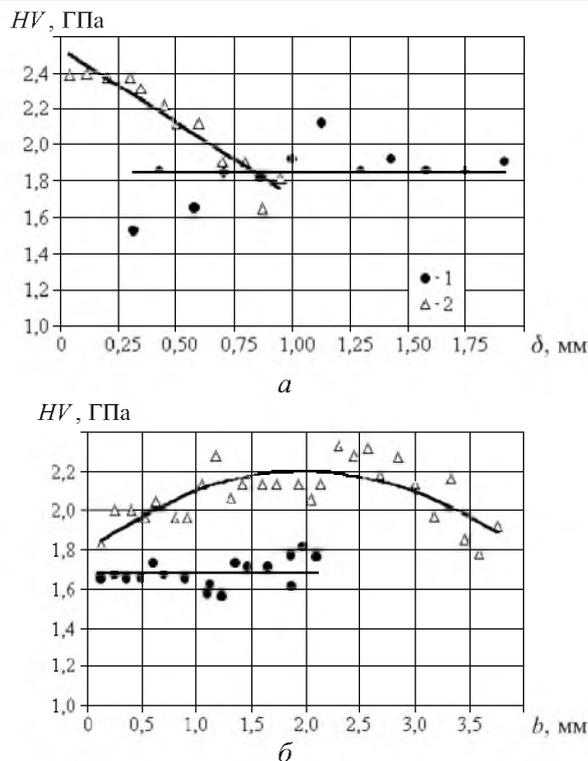


Рис. 4. Распределение микротвердости в полосе образца из отожженной стали: 1 – исходное состояние, $\delta = 2$ мм; 2 – $v_0 = 201$ м/с, $\delta = 2$ мм.

Исследование микроструктуры. Особенности деформирования и разрушения рассматриваемых металлов определяли при микроструктурных исследованиях. С этой целью из центра рабочей части образца вырезали часть деформированной полосы металла (~ 20 мм), изготовляли шлифы и травили поверхности 1 и 2 (рис. 1, в) по стандартной методике. Затем с помощью оптического микроскопа изучали микроструктуру.

Микроструктура металла образцов из отожженной стали в исходном состоянии и после нагружения со скоростью 201 м/с показана на рис. 5. Исходное состояние характеризуется равноосными зернами (размер ~ 30 мкм) с малочисленными небольшими порами по их границам. После ударного сжатия на поверхности 1 наблюдаются двойники, на поверхности 2 – полоса интенсивной пластической деформации (шириной в несколько зерен), расположенная у поверхности образца со стороны удара по всей его ширине. Следует отметить увеличение толщины деформированных зерен от поверхности нагружения в глубь образца. Вблизи поверхности нагружения толщина зерен составляет примерно 4 мкм (относительная деформация, не вызывающая видимых повреждений, достигает около 700%). С понижением скорости деформации характер изменения микроструктуры в общем сохраняется, однако плотность двойников, объем металла образца с сильнодеформированными зернами и величина деформации последних уменьшаются. Разрушений в образцах из отожженной стали в проведенной серии испытаний не наблюдалось.

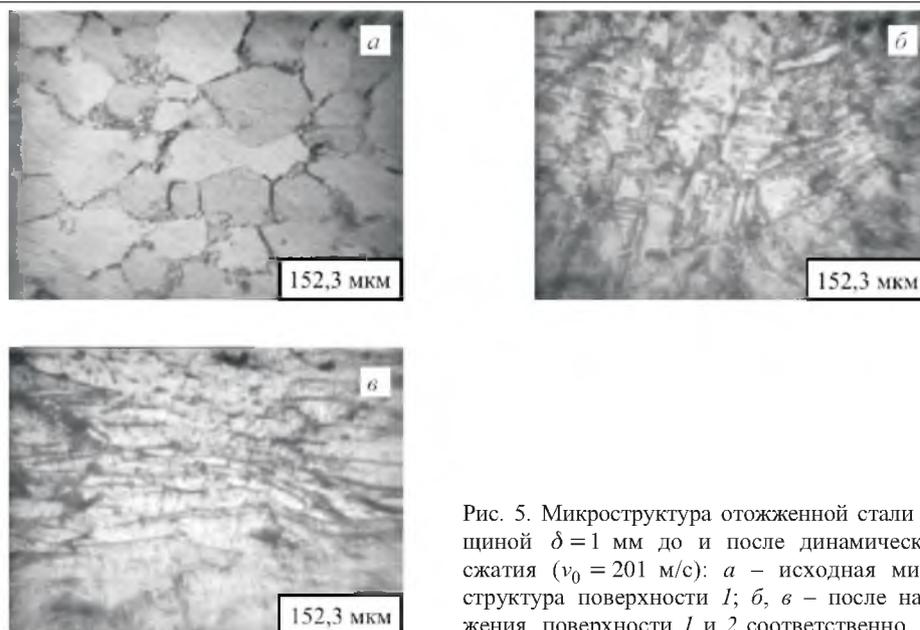


Рис. 5. Микроструктура отожженной стали толщиной $\delta = 1$ мм до и после динамического сжатия ($v_0 = 201$ м/с): *a* – исходная микроструктура поверхности 1; *б*, *в* – после нагружения, поверхности 1 и 2 соответственно.

На рис. 6 представлена микроструктура поверхности 1 образцов из высокопрочной стали после динамического сжатия. На макроскопическом уровне процесс разрушения включает зарождение, рост и коалесценцию микроскопических пор или трещин. В областях действия высоких касательных напряжений образуются полосы локализованного сдвига, переходящие в дальнейшем в полосы адиабатического сдвига (ПАС). После зарождения одной или нескольких ПАС в образце дальнейшее деформирование (вплоть до разрушения) контролируется их распространением, что подтверждается данными работы [10]. В образцах из высокопрочной стали зафиксированы ПАС толщиной около 5–7 мкм (рис. 6, *б*).

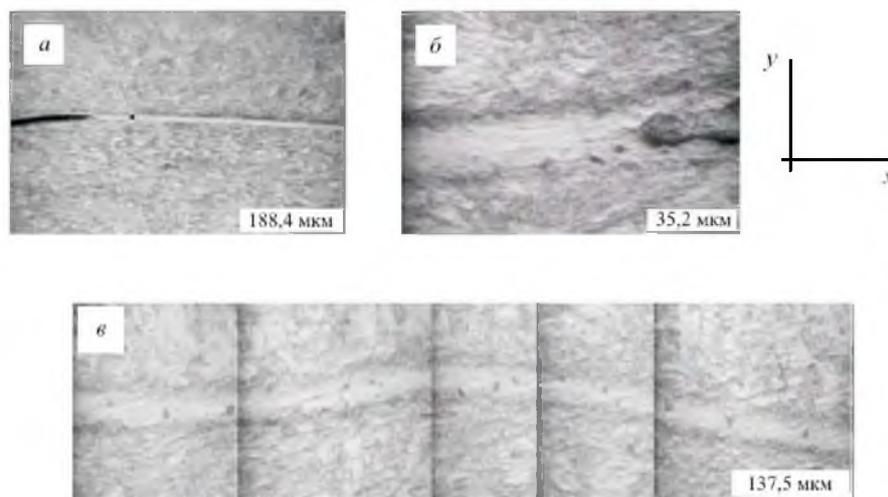


Рис. 6. Микроструктура поверхности 1 образцов из высокопрочной стали после динамического сжатия: *a* – трещина в ПАС; *б* – трещина с порами в ПАС; *в* – панорама ПАС с равномерно расположенными порами.

Характерный вид макроразрушения образцов из высокопрочной стали иллюстрирует рис. 7,а. Приведенные микроструктуры подтверждают микро-неоднородность деформирования металла, существенно зависящую от скорости деформации.

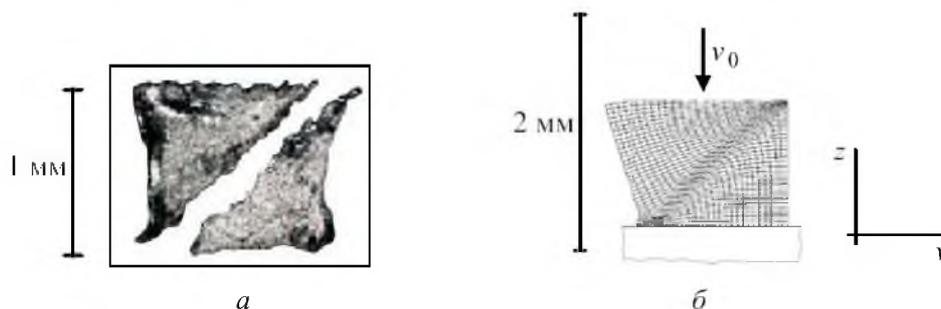


Рис. 7. Разрушение сдвигом образца из высокопрочной стали (поверхность 2) при динамическом сжатии – а и численный расчет деформирования образца из высокопрочной стали через 5,4 мкс после начала нагружения – б.

Численное исследование. Для качественного сравнения экспериментальных данных с расчетными осуществлено численное моделирование деформирования образцов из высокопрочной стали. По образцу (сечение $b \times \delta = 2 \times 2$ мм), опирающемуся на недеформируемую пластину толщиной 15 мм, ударяли недеформируемой пластиной толщиной 10 мм со скоростью 200 м/с. Трением соприкасающихся поверхностей пренебрегали. Поведение металла образца описывали с помощью уравнения Джонсона–Кука.

С началом пластического течения вблизи края полосы на поверхности контакта с ударником наблюдается зарождение неоднородности деформации, распространяющейся в глубь металла образца в направлении максимальных касательных напряжений. Приблизительно через 1 мкс в диагонально противоположном углу образца также зарождается неоднородность деформации, распространяющаяся навстречу предыдущей. Вид образца через 5,4 мкс после начала нагружения представлен на рис. 7,б.

Заключение. Приведенные данные по ударному сжатию отожженной низкоуглеродистой и высокопрочной сталей подтверждают существенное влияние скорости деформации на предел текучести исследуемых металлов. С ростом скорости деформации различие в сопротивлении сталей, имеющих разную статическую прочность, снижается.

Отожженная сталь по сравнению с высокопрочной более устойчива к развитию адиабатического сдвига.

Резюме

Наведено результати випробувань на ударний стиск зразків із м'якої та високоміцної сталей. Відмічено якісну подібність залежностей опору указаних металів від швидкості деформації. Показано, що зі зростанням швидкості деформації опір стиску металів істотно збільшується і виходить на насичення, різниця в рівні опору металів зменшується. Розглянуто деякі

особливості деформування та руйнування випробуваних металів на мікро-структурному рівні.

1. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.
2. Огородников В. А., Тюнькин Е. С., Иванов А. Г. Прочность и вязкость металлов в широком диапазоне изменения скорости деформации // Прикл. механика и теорет. физика. – 1995. – № 3. – С. 134 – 140.
3. Степанов Г. В., Зубов В. И., Олисов А. Н., Токарев В. М. Прочность тонколистовых металлов при ударном растяжении // Пробл. прочности. – 2000. – № 4. – С. 62 – 69.
4. Клифтон Р. Дж. Динамическая пластичность. – М.: Мир, 1986. – 186 с.
5. Klepaczko J. R. Remarks on impact shearing // J. Mech. Phys. Solids. – 1998. – 46, No. 10. – P. 2139 – 2153.
6. Степанов Г. В., Широков А. В. Распространение зоны локализованного пластического течения при простом сдвиге // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 75 – 82.
7. Степанов Г. В., Сафаров Э. Г., Олисов А. Н. и др. Методики оценки прочности твердых сплавов при динамическом нагружении // Там же. – 1992. – № 11. – С. 78 – 89.
8. Таблицы физических величин: Справочник. – М.: Атомиздат, 1976. – 452 с.
9. Stepanov G. and Zubov V. Impact tensile tests of structure materials at high strain rates // New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact / Eds. W. K. Nowacki and J. R., Klepaczko. – Warszawa: Institute of Fundamental Technological Research, 2002. – P. 437 – 443.
10. Бондарь М. П., Первухина О. Л., Нестеренко В. Ф., Лукьянов Я. Л. Особенности развития структуры титана при взрывном коллапсе толстостенных цилиндров // Физика горения и взрыва. – 1998. – 34, № 5. – С. 122 – 129.

Поступила 03. 02. 2003