

Динамическое сжатие высокопрочной стали и титанового сплава

Г. В. Степанов, В. И. Зубов

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Представлена методика ударного сжатия высокопрочной стали типа 20Х2Н4А и титанового сплава типа ВТ8. Приведены экспериментальные результаты испытаний указанных материалов. Анализ данных показал существенное повышение сопротивления сжатию при расширенном на порядок диапазоне исследуемых скоростей деформации. Зависимость сопротивления деформации сжатия при увеличении скорости деформации значительно возрастает.

Ключевые слова: ударное сжатие, скорость деформации, изотермический процесс, адиабатический процесс, пластическая деформация, цикл нагружения.

Испытания на ударное сжатие позволяют определить влияние скорости деформации на сопротивление пластическому деформированию при близком к одноосному напряженному состоянию в зависимости от деформации и ее скорости. При динамическом нагружении процесс деформирования с достаточной точностью может быть принят адиабатическим, что приводит к повышению температуры с ростом деформации. Определение эффектов, связанных с деформационным упрочнением (без дополнительного влияния температуры), обеспечивается ступенчатым деформированием в результате ряда последовательных нагружений (с небольшим приращением пластической деформации в каждом цикле нагружения). Незначительное повышение температуры в каждом цикле, исчезающее за время между циклами, не оказывает существенного влияния на сопротивление деформации, а измеренные после каждого цикла нагружения пластическая деформация и соответствующее ей усилие позволяют построить по точкам зависимость истинные напряжение–деформация. Полученная зависимость может быть принята изотермической для динамического нагружения. Методика и результаты таких испытаний высокопрочной стали и титанового сплава представлены ниже.

Схема испытаний на ударное сжатие (рис. 1) основана на разработках Института проблем прочности НАН Украины, апробированных и использованных ранее [1]. Образец 2 деформируется между наковальной-индентором 1 и передающим стержнем 3, которые центрируются в отверстии плиты 4. Стержень 3 воспринимает удар тела 5 с заданной скоростью. Деформация образца за цикл нагружения прекращается при соприкосновении торца нагружающей массы с плитой 4. Величина деформации за цикл ограничивается установкой стального кольца соответствующей высоты.

Максимальную нагрузку на образец определяли по размеру отпечатка, образованного внедрением конической части наковальни индентора в подкладную пластину-свидетель 6, с использованием тарировочной зависимости усилие–диаметр отпечатка, полученной при статическом внедрении конического индентора с углом у вершины 90°.

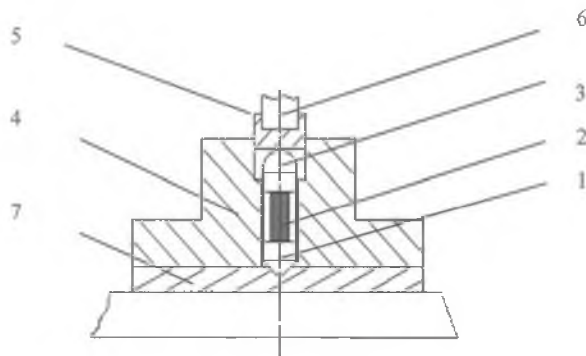


Рис. 1. Схема нагружения образца при испытаниях на динамическое сжатие на вертикальном копре с падающим грузом.

Скорость пластической деформации образца за цикл нагружения рассчитывали по скорости нагружающего тела с учетом увеличения глубины отпечатка в подкладной плите.

Принимается, что в объеме образца в виде короткого цилиндра длиной l создается напряженно-деформированное состояние (НДС), близкое к однородному одноосному. Напряженное состояние возникает в образце до начала его пластического деформирования в результате интерференции волн после начала нагружения за время нескольких пробегов продольной упругой волны по образцу, $t_i = (2 - 5)l/c_0$ (c_0 – скорость продольной упругой волны). Скорость деформирования во времени (после короткого периода ее нарастания) определяется по скорости соударения. Время неустановившегося состояния, которое определяется неупругими эффектами в областях контакта элементов цепи нагружения (поверхностей контакта нагружающей массы и передающего стержня, торцов образца с прилегающими элементами, индентора с плитой-свидетелем) и волновыми процессами в этих элементах, примерно равно t_i .

Деформирование на малую величину обеспечивается благодаря последовательным ударам тела массой M_0 . Деформация за каждый цикл нагружения выбирается такой, чтобы:

- а) построить аппроксимационную кривую деформирования по точкам;
- б) предотвратить возникновение существенного теплового разогрева и проявления связанных с ним изменения сопротивления, локализации деформации и других возможных эффектов;
- в) максимальное усилие в конце цикла нагружения соответствовало установившемуся течению материала, которое происходит при длительности цикла нагружения $t_c > t_i = 5l/c$. Для образцов из стали и титанового сплава длиной $l = 12$ мм получим $t_c > 12$ мкс, что определяет необходимое изменение длины образца за цикл $\Delta l > t_c v/2$. Это приращение равно $\Delta l = 0,03$ мм ($\delta\varepsilon = 0,25\%$) при $v = 5$ м/с и $\Delta l = 0,3$ мм ($\delta\varepsilon = 2,5\%$) при $v = 50$ м/с.

Постоянство скорости (с заданным допуском $\Delta v/v$) на стадии установившегося течения материала образца обеспечивается соответствующим выбором нагружающей массы с учетом сопротивления испытываемого материала, объема образца $V = \pi d^2 l/4$, величины его деформации $\delta\varepsilon$ за удар и

скорости удара v . Заданное допустимое снижение скорости движения $\Delta v/v$ нагружающей массы M в результате ее замедления при деформировании образца определяется уравнением баланса энергии:

$$\Delta v/v = 1 - [1 - 2(\sigma \delta \varepsilon)V / Mv^2]^{1/2}. \quad (1)$$

Следовательно, масса M должна удовлетворять условию

$$M > (\sigma \delta \varepsilon)(\pi d^2 l / 4) / v^2 [(\Delta v/v) - (\Delta v/v)^2 / 2]. \quad (2)$$

При соответствующих параметрах: $d = 8$ мм, $l = 12$ мм, $\Delta v/v = 0,05$, $\sigma = 1,2$ ГПа получим условия:

$$\begin{aligned} M > 24 \text{ кг} & \quad \text{для } v = 2,5 \text{ м/с}; \quad \delta \varepsilon = 0,010; \\ M > 0,15 \text{ кг} & \quad \text{для } v = 50 \text{ м/с}; \quad \delta \varepsilon = 0,025. \end{aligned}$$

В цепи нагружения происходит перераспределение скорости между ее элементами. Ударное воздействие массы M_0 , имеющей начальную скорость v_0 при массе передающего стержня M_1 , позволяет определить расчетную скорость движения нагружаемой поверхности образца, принимая удар неупругим (без учета упругой деформации, отскоков и волновых процессов в цепи нагружения),

$$v = v_0 [M_0 / (M_0 + M_1)] = v_0 [1 - M_1 / M]; \quad M = M_0 + M_1. \quad (3)$$

Средняя скорость перемещения нагружаемой поверхности при ударе равна

$$v_c = v [1 - (\Delta v/v) / 2]. \quad (4)$$

Средняя скорость пластической деформации на установившемся участке цикла нагружения определяется по средней скорости перемещения v_c массы M с учетом перемещения образца Δl и дополнительного внедрения индентора Δh (время нагружения $\Delta t \approx (\Delta l + \Delta h) / v_c$). Таким образом, из (3), (4) получаем

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= (\Delta l / l) / \Delta t = v_c (\Delta l / l) / (\Delta l + \Delta h) = \\ &= (v_0 / l) [1 - (\Delta v/v) / 2] [1 - \Delta h / (\Delta l + \Delta h)] [1 - M_1 / (M_0 + M_1)]. \end{aligned} \quad (5)$$

При выборе масс в соответствии с условием (2) при $\Delta v/v = 0,1$ изменением скорости в процессе осадки образца можно пренебречь, и определять скорость деформации по упрощенной зависимости

$$\varepsilon' = (v_0 / l) [1 - 1 / (\Delta l / \Delta h + 1)] [1 - M_1 / (M_0 + M_1)]. \quad (6)$$

Адиабатическое повышение температуры (пренебрегая теплопроводностью) за один цикл нагружения при деформации не более 2,5%, плотности ρ и удельной теплоемкости c_p для стали составляет

$$\Delta T = \sigma \varepsilon / (\rho c_p) = 1,2 \cdot 10^9 \cdot 0,025 / 7,85 \cdot 10^3 \cdot 461 < 10 \text{ К.}$$

Статическое нагружение. Сжатие при статическом нагружении проводили на испытательной машине Instron-100kN со скоростью 1 мм/мин (таблица). При деформации сжатия более 10% происходит искривление оси образца, следовательно, регистрируемое усилие не отражает корректно сопротивление материала.

Результаты испытаний на статическое сжатие

Материал	P , кг	l , мм	d , мм	ε , %	σ , МПа
Титановый сплав	0	12,01	8,00	0	0
	5000	11,93	8,01...8,05	0,67	988
	5500	11,64	8,05...8,28	3,08	1051
	6000	11,22	8,12...8,60	6,58	1094
Высокопрочная сталь	0	12,01	7,99	0	0
	6500	11,89	8,04	1,00	1281
	7000	11,65	8,15	3,00	1343
	7500	11,20	8,38	6,74	1361

Динамическое нагружение. Динамическое сжатие со скоростью до 5 м/с проводили на вертикальном копре ударом свободно падающего груза массой 25 кг, что соответствует условию (2). Скорость удара с высокой точностью отвечает скорости движения этого груза, поскольку масса передающего стержня M_1 мала, $M_1 / (M_0 + M_1) \ll 1$.

Динамическое сжатие со скоростью выше 25 м/с осуществляли на пневматическом вертикальном копре [1, 2]. Закрепленная на пенопластовом поддоне нагружающая масса, величина которой удовлетворяет условию (2), разгонялась по каналу ствола давлением сжатого воздуха.

Величину нагрузки на образец определяли по диаметру отпечатка в подкладной металлической пластине, образованного наковальной-индентором под действием нагрузки на образец. В качестве материала подкладной пластины использовали полосу из испытываемой высокопрочной стали. Поверхности полосы прошлифованы. Размеры отпечатка измеряли на инструментальном микроскопе (диаметр на уровне верхней точки наплыва) и с использованием шара в лунке (рис. 2).

Тарировочную зависимость усилие–квадрат диаметра отпечатка (рис. 3) при статическом нагружении строили по регистрируемому усилию и измеренному диаметру отпечатка при внедрении на разную глубину индентора с углом у вершины 90°.

Скорость v_0 разгоняемой массы M_0 рассчитывали по высоте ее свободного падения или по времени пролета базового участка пути при разгоне на вертикальном пневматическом копре. Время перемещения между

двумя электрическими контактами регистрировали электронным хронометром. Чтобы повысить надежность регистрации, использовали два параллельно соединенных хронометра.

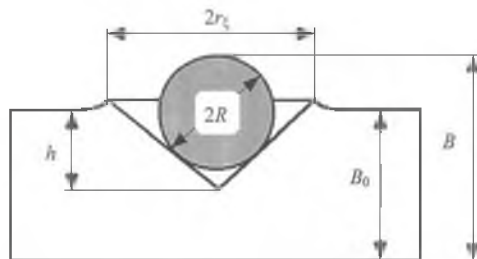


Рис. 2. Схема измерения глубины отпечатка, $h = B_0 - B + R(1 + \sqrt{2})$.

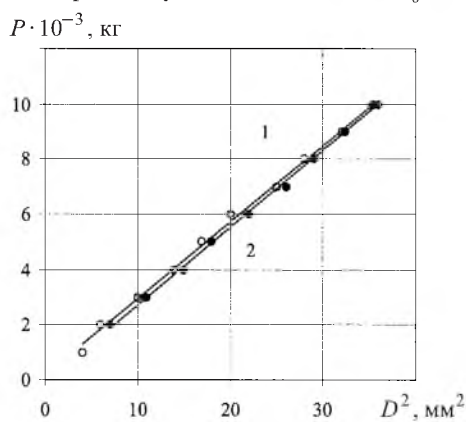


Рис. 3. Тарировочная зависимость усилие–квадрат диаметра отпечатка при статическом нагружении стали (1) и титанового сплава (2).

Для статических и динамических испытаний высокопрочной стали и титанового сплава применяли идентичные образцы в виде цилиндра диаметром $d_0 = 8$ мм и длиной $l_0 = 12$ мм. Образцы были изготовлены токарной обработкой заготовок в виде полос 12×12 мм, вырезанных из листового проката в состоянии поставки без термообработки с твердостью 43 HRC (высокопрочная сталь) и 42 HRC (титановый сплав).

Осевую и поперечную деформацию образца с начальными длиной l_0 и диаметром d_0 определяли после каждого цикла ударного нагружения непосредственным измерением микрометром соответствующих размеров образца (l – длина; d_1 и d_2 – диаметры в средней части в двух перпендикулярных направлениях после деформации, $d = (d_1 + d_2)/2$):

$$\varepsilon = l/l_0 - 1; \quad \psi = (d/d_0)^2 - 1.$$

Максимальное усилие сжатия образца P в каждом цикле нагружения определяли по измеренному на инструментальном микроскопе радиусу отпечатка: $R = (R_1 - R_2)/2$ (R_1 и R_2 – радиусы отпечатка в двух перпендикулярных направлениях) с использованием тарировочной зависимости $P((D)^2)$.

Истинное напряжение в средней части образца составляет:

$$\sigma = P/(\pi d^2/4); \quad \varepsilon \approx (v/l)t.$$

где l и d – текущие длина и диаметр рабочей части образца.

Средняя скорость деформации, определенная по величине предельного удлинения l_c/l при разрушении и времени неупругой деформации t_c ,

$$\varepsilon' \approx (l_c/l - 1)t_c$$

примерно соответствует расчетной скорости деформации. Результаты экспериментов представлены на рис. 4. Повышение скорости деформации приводит к росту сопротивления. Согласно данным испытаний, модуль деформационного упрочнения материала $K_M = d\sigma/d\varepsilon$, определяемый наклоном касательной к кривой $\sigma(\varepsilon)$, монотонно снижается с ростом пластической деформации как при статическом, так и динамическом нагружении и повышается с ростом скорости деформации. Это согласуется с известными исследованиями, свидетельствующими, что деформационное упрочнение при динамическом нагружении выше, чем при статическом. Показателем влияния на упрочнение материала является история предшествующей деформации [1, 2].

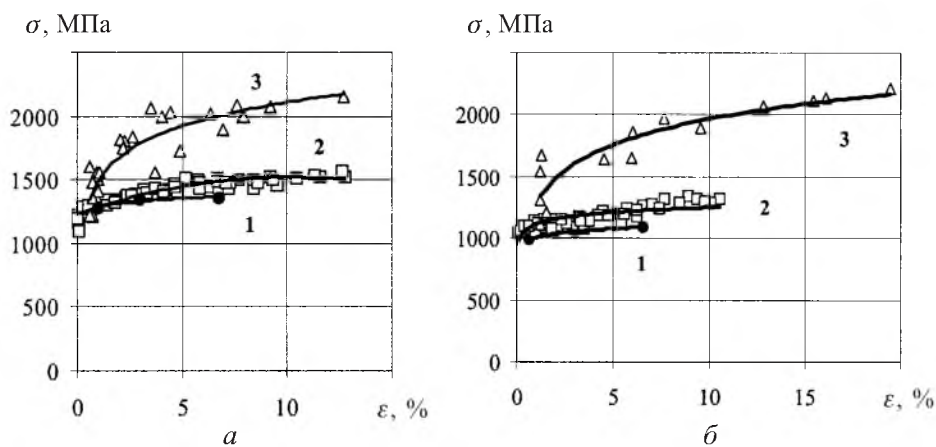


Рис. 4. Экспериментальные зависимости сопротивления сжатию от величины деформации для стали (а) и титанового сплава (б) при различных уровнях скорости деформации ε' : 1 – $\varepsilon' = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; 2 – $\varepsilon' = (0,2 \dots 0,4) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$; 3 – $\varepsilon' = (0,4 \dots 4,0) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Испытание на ступенчатое ударное сжатие с высокой скоростью коротких цилиндрических образцов позволяет получить кривую напряжение–деформация при высокоскоростном изотермическом сжатии. Такая методика может быть применена для исследования влияния скорости деформации в диапазоне более высоких скоростей нагружения и оценки влияния на сопротивление материала температуры.

Диаграммы деформирования стали и титанового сплава (диаграммы истинные напряжение–деформация) показывают, что металлы проявляют

существенное деформационное упрочнение при статическом и динамическом нагружении. С повышением скорости нагружения сопротивление деформации сжатия монотонно возрастает.

Резюме

Представлено методику ударного стиску високоміцної сталі типу 20Х2Н4А та титанового сплаву типу ВТ8. Наведено експериментальні результати досліджень цих матеріалів. Аналіз результатів свідчить про суттєве підвищення опору стиску при розширеному на порядок діапазоні досліджуваних швидкостей деформування. Залежність опору стиснення при підвищенні швидкості деформації істотно зростає.

1. *Степанов Г. В.* Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.
2. *Ващенко О. П.* Деформування та руйнування конструкційних матеріалів за високошвидкісної деформації ($10^2 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$) і температур 77 ...773 К: Автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. – Київ, 1995. – 48 с.

Поступила 14. 11. 2001