

Контроль и испытания

УДК 531.78.2

К МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНОМУ НАГРУЖЕНИЮ

Г.М. Купершляк-Юзефович, Ю.В. Шкербин, Н.Ю. Исаева

TO THE METHOD TO DEFINE THE IMPULSE LOAD STRENGTH OF MATERIALS

G.M. Kupershlyak-Yuzefovich, Y.V. Shkerbin, N.Y. Isaeva

Приведена оригинальная методика синхронного измерения продольной силы и деформации в контрольном сечении стержня-образца при распространении упругопластической волны. По экспериментальным зависимостям напряжение-деформация-время алюминиевых сплавов и аустенитной стали выявлены два последовательных вида деформирования: упругопластическое при постоянной скорости нагружения и динамическая ползучесть при уменьшении скорости нагружения и разгрузке.

Ключевые слова: напряжение, деформация, скорость, импульсное нагружение.

An original technique of synchronous measurement of longitudinal force and deformation in the check section of model rod at elastoplastic wave transmission is presented. By experimental dependences tension-deformation-time of aluminum alloys and austenitic steel two consecutive types of deformation are defined: elastoplastic at constant speed of load and dynamic creep at loss of speed of load and unload.

Keywords: tension, deformation, speed, impulse load.

Технологии изготовления деталей машиностроительных конструкций в основном основаны на пластическом деформировании материалов. Анализ условий работы материалов в конструкциях и при изготовлении деталей показывает на необходимость учета реономных (зависящих от времени) свойств материалов. Особенно это нужно учитывать при высокоскоростных нагружениях конструкций и технологиях штамповки и сварки взрывом,ковки и штамповки на автоматах.

Одной из основных задач экспериментальной механики деформируемого твердого тела является разработка методик для определения параметров, характеризующих пластическое деформирование материала. Обычно эти параметры определяют по экспериментальной зависимости напряжение-продольная деформация при испытаниях образцов в виде цилиндрических стержней при линейном напряженном состоянии растяжения или сжатия.

При импульсном нагружении (удар, взрыв), длительность фронта которого характеризуется микросекундами, необходимо учитывать, что напряженно-деформированное состояние стержня-образца создается упругопластическими волнами. В этом случае нужно определить зоны образца, где создается линейное напряженное состояние с равномерным распределением напряжений по поперечному сечению. На фронте волны практически невозможно создать однородное состояние по продольной координате и возникает задача синхронного определения напряжения и деформации в контрольном сечении образца.

Для определения зависимости напряжение-время, синхронной с деформацией, в Южно-Уральском государственном университете разработана оригинальная методика [1].

В отличие от принятых в мировой практике методик, рассмотренных в обзорных работах [2, 3] и известных нам по публикациям в периодической печати, по этой методике впервые удалось определить напряжения в контрольном сечении образца без предположений о виде уравнения состояния исследуемого материала и условий распространения волн в системе нагружения образца.

На схеме нагружения образца и установки датчиков (рис. 1) передающий стержень T установлен на центрирующих резиновых втулках в стволе вертикальной пневмоустановки. Упругий прижим, не влияющий на распространение волны, обеспечивает контакт образца M со стержнем T .

Импульс силы $F(t)$, нагружающий систему, создается ударом бойка, скорость которого обеспечивает упругое соударение. На расстоянии от точки удара более двух диаметров в стержне распространяется волна линейного напряженного состояния [4]. В работе [5] показано, что при этом напряжения равномерно распределены по поперечному сечению стержня. Упругая волна, распространяющаяся в стержне T , при переходе границы $T-M$ создает в образце Муупругопластическую волну. В работе [1] показано, что даже при притертых плоских контактных торцах стержней T и M одинаковых диаметров D линейное напряженное состояние в образце формируется на расстоянии $x_0 = 0,6D$.

На основании уравнения движения элемента образца длиной dx

$$\frac{\partial F(x,t)}{\partial x} dx = \rho S(x) \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} dx, \quad (1)$$

сила в контрольном сечении

$$F(x_0,t) = \rho \int_{C_0 t}^{x_0} \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} S(x) dx, \quad (2)$$

где ρ и $S(x)$ - плотность и площадь поперечного сечения недеформированного стержня, $v(x,t)$ - массовая скорость, $C_0 = \sqrt{E/\rho}$ - скорость распространения упругого фронта волны, E - модуль упругости.

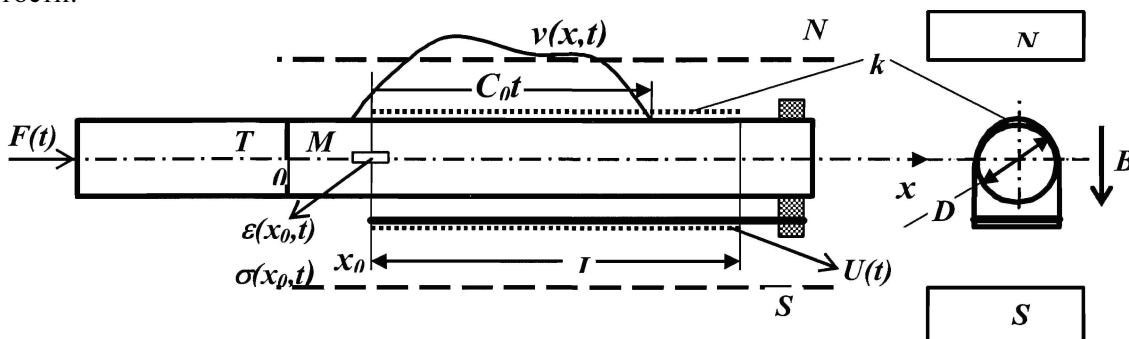


Рис. 1. Схемы нагружения образца M через стержень T импульсом силы $F(t)$ и установки датчиков для синхронного определения напряжения $\sigma(x_0,t)$ и деформации $\varepsilon(x_0,t)$ в контрольном сечении x_0

Если при изготовлении образца площадь поперечного сечения в пределах его длины выдерживается с ошибкой не более 0,5 %, то можно принять $S(x) = \text{const}$.

По правилу дифференцирования интеграла по параметру (времени) имеем

$$\frac{d}{dt} \int_{C_0 t}^{x_0} v(x,t) dx = \int_{C_0 t}^{x_0} \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} dx - v(C_0 t, t) \frac{dv(x,t)}{dt}. \quad (3)$$

Учитывая, что $v(C_0 t, t) = 0$, получим

$$F(x_0,t) = \rho S \frac{d}{dt} \int_{C_0 t}^{x_0} v(x,t) dx. \quad (4)$$

Для определения функции времени, представленной интегралом

$$J(x_0,t) = \int_{C_0 t}^{x_0} v(x,t) dx, \quad (5)$$

разработан индукционный датчик [6], показанный на рис. 1.

Начиная от контрольного сечения x_0 , на образце намотана «виток к витку» однослойная катушка тонкого медного изолированного провода. Витки катушки k охватывают стержень и консольную планку, закрепленную на свободном конце образца. Часть каждого витка, примыкающая

к образцу, приклеена к нему и движется со скоростью $v(x,t)$ в поле постоянного магнита $N-S$. Участок, примыкающий к планке, неподвижен, а соединительные участки при движении не пересекают магнитный поток. Поэтому активная длина витка, в которой наводится ЭДС индукции, равна диаметру D образца. Длина магнита, в 1,5 раза большая длины катушки, и ширина, в 4 раза большая диаметра образца, обеспечивают равномерность магнитного поля в пределах катушки датчика не более 1 %. Для сохранения однородности магнитного поля передающий стержень и образец изготовлены из немагнитных материалов. Сигнал ЭДС индукционного датчика

$$U(t) = \frac{BDn}{L} \int_{C_0 t}^{x_0} v(x,t) dx, \quad (6)$$

где B - магнитная индукция, n и L - количество витков и длина катушки датчика.

На основании (4) и (6) сила в контрольном сечении

$$F(x_0,t) = \frac{\rho SL}{DBn} \cdot \frac{dU}{dt}, \quad (7)$$

условные напряжения

$$\sigma(x_0,t) = \frac{F(x_0,t)}{S}. \quad (8)$$

Деформацию в контрольном сечении $\varepsilon(x_0,t)$ определяют тензорезистором, база которого согласована с длиной фронта волны. Применение серийных фольговых тензорезисторов с базой 3 мм обеспечивает измерение деформаций до 5 %. В работе [7] показано, что для стержней из алюминия и стали ($C_0 \approx 5$ мм/мкс) при длительности фронта импульса силы не менее 4 мкс, динамическая ошибка такого тензорезистора при определении максимального значения деформации в точке стержня, совпадающей с центром тензорезистора, не превышает 2 %. При определении не-максимального значения деформации на фронте и спаде импульса ошибка значительно меньше.

Если поперечным тензорезистором измерить поперечную деформацию, то можно определить фактическую площадь $S(x_0,t)$ и действительные напряжения

$$\sigma_D(x_0,t) = \frac{F(x_0,t)}{S(x_0,t)}.$$

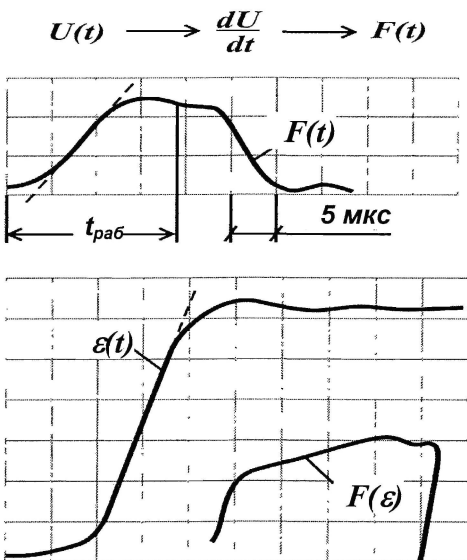


Рис. 2. Осциллограммы деформации $\varepsilon(t)$ и силы $F(t)$ в контрольном сечении образца

этих опытов $t_{\text{раб}} = 20$ мкс. Там же показана статическая диаграмма сжатия образцов того же диаметра, высотой 20 мм.

Характерные закономерности процессов нагружения и деформирования проследим по рис. 3.

На рис. 2 показаны типичные осциллограммы силы и деформации, полученные по данной методике и зарегистрированные на двух двухлучевых запоминающих аналоговых осциллографах С8-17.

Для получения сигнала $F(t)$ сигнал индукционного датчика $U(t)$ обрабатывали в дифференцирующей блоке dU/dt .

Один луч осциллографа регистрировал зависимость деформация-время $\varepsilon(x_0,t)$. Второй луч в режиме X-Y одновременно регистрировал зависимость сила-деформация $F(\varepsilon)$. Второй осциллограф регистрировал зависимость сила-время $F(x_0,t)$, которую калибровали при упругом нагружении образца по сигналу $F(x_0,t) = \varepsilon(x_0,t)ES$. Время регистрации силы ограничено длиной катушки датчика $t_{\text{раб}} = L/C_0$.

На рис. 3 приведены зависимости напряжение-деформация-время для алюминия АМц при сжатии стержней длиной 200 мм и диаметром 11,6 мм импульсами напряжений $\sigma(x_0,t)$. Передающий стержень, таких же размеров как образец изготовлен из алюминия Д16Т с пределом пропорциональности 290 МПа. Для

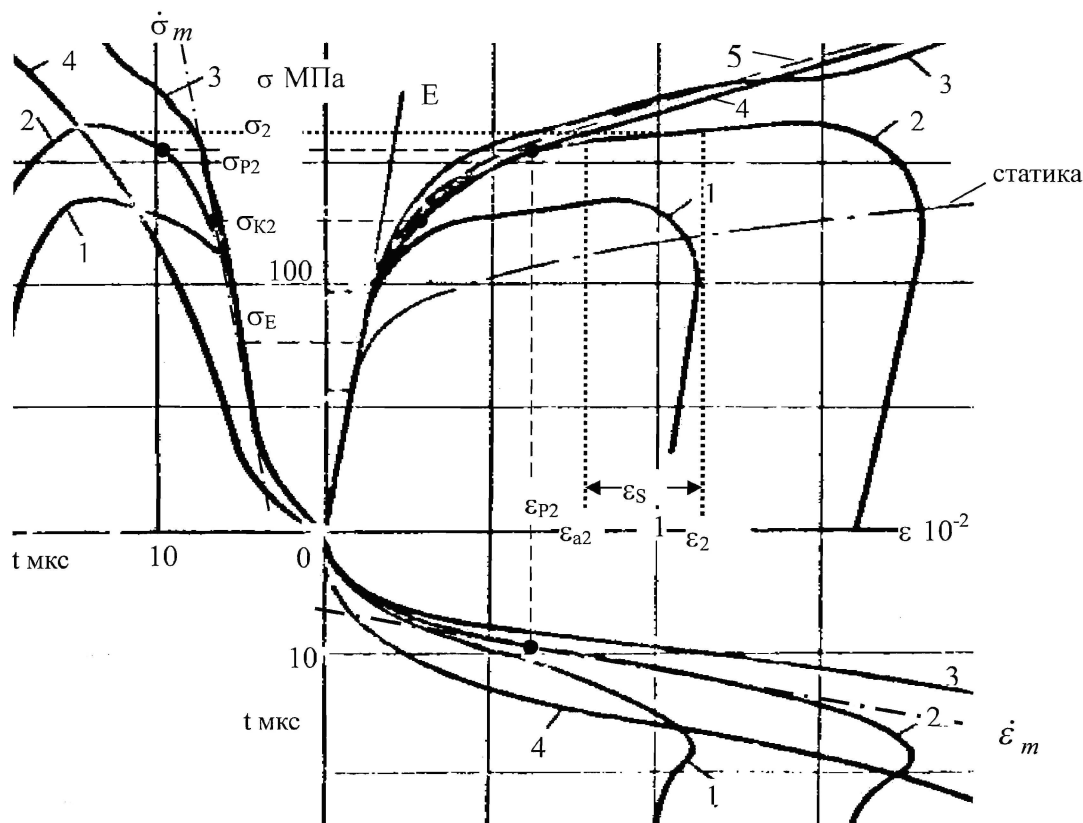


Рис. 3. Напряжение-деформация-время для алюминия АМц при режимах нагружения 1-4. Зависимость 5 - среднее значение для семи образцов, испытанных по режиму 4

Зависимости напряжение-деформация определяли при четырех режимах нагружения $j=1-4$, представленных осциллограммами напряжение-время. Соответствующие деформации представлены осциллограммами деформация-время. Штриховой линией 5 показана зависимость напряжение-деформация, осредненная по результатам испытаний 7 образцов в режиме нагружения 4.

Начальный режим нагружения характеризуется практически постоянной максимальной скоростью нагружения $\dot{\sigma}_m$, которая формируется при напряжениях, меньших предела пропорциональности $\sigma(t) < \sigma_E$, и сохраняется при напряжениях, существенно превышающих предел пропорциональности. При испытаниях алюминия АМц реализовано $\dot{\sigma}_m = 3,3 \cdot 10^7$ МПа/с. В этом режиме материал проходит два этапа деформирования, при которых увеличивается скорость деформации $\dot{\varepsilon}(t) > 0$.

Первый этап - упругое деформирование

$$\varepsilon = \sigma / E,$$

(10)

ограниченное пределом пропорциональности σ_E и характеризуемое модулем упругости E .

В экспериментальной механике деформируемого твердого тела установлено, что для металлов и многих конструкционных материалов модуль упругости, определенный по результатам ультразвуковых измерений, практически совпадает со статическим значением. Наши измерения соответствуют этому результату.

Второй этап - пластическое деформирование, характеризующееся единой для всех режимов нагружения $j=1-3$ нелинейной зависимостью напряжение-деформация при действии напряжений $\sigma_E \leq \sigma(t_E \leq t \leq t_{Kj}) \leq \sigma_{Kj}$.

Плавное уменьшение скорости нагружения относительно максимальной до значения $\dot{\sigma}_{Pj} \leq \dot{\sigma} \leq \dot{\sigma}_m$ в интервале напряжений $\sigma_{Kj} \leq \sigma(t_{Kj} \leq t \leq t_{Pj}) \leq \sigma_{Pj}$, а также уменьшение максимальной скорости нагружения режима 4 $\dot{\sigma}_{m4} \leq \dot{\sigma}_m$ практически не влияют на единую для всех режимов зависимость напряжение-деформация.

В табл. 1 приведены скорости нагружения, реализованные при испытаниях алюминия АМц. В этих условиях для АМц $\dot{\sigma}_{pj} \geq 0,4\dot{\sigma}_m$. Результаты аналогичного анализа: для алюминия АМГб $\dot{\sigma}_{pj} \geq 0,15\dot{\sigma}_m$, для стали Х18Н10Т $\dot{\sigma}_{pj} \geq 0,3\dot{\sigma}_m$.

Пластические зависимости напряжение-деформация исследованных материалов при статическом ($\dot{\sigma}_m < 1$ МПа/с) сжатии (рис. 4, а) можно аппроксимировать уравнением

$$\sigma = a_c \ln(\varepsilon) + b_c, \quad (11)$$

где a_c и b_c - статические параметры материала, $\varepsilon_{EC} = \frac{\sigma_{EC}}{E} \leq \varepsilon \leq 2 \cdot 10^{-2}$, σ_{EC} - статический предел пропорциональности.

Аналогичные зависимости получены при статическом растяжении нескольких марок конструкционных сталей.

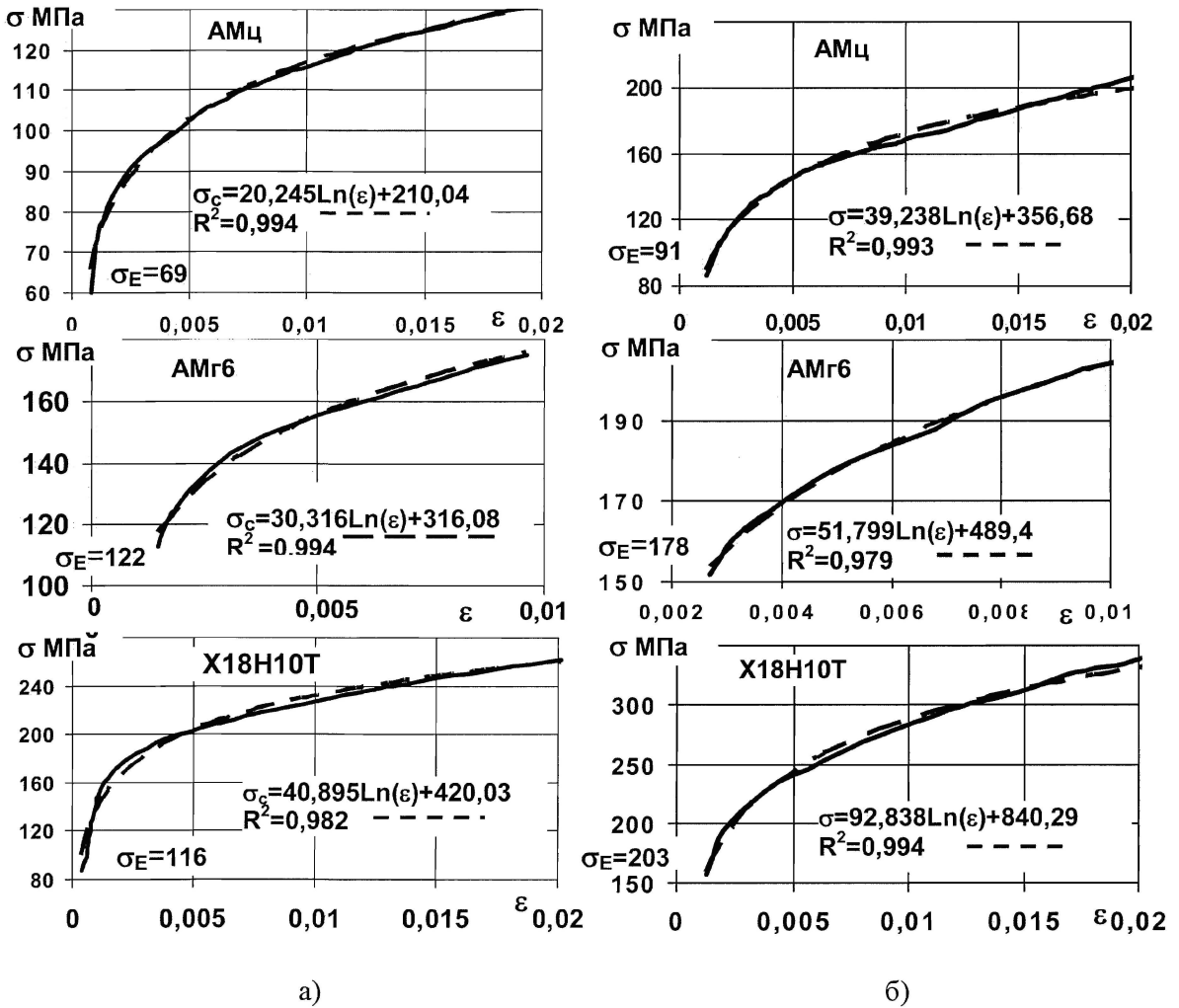


Рис. 4. Аппроксимация зависимостей напряжение-деформация при сжатии: а – статика; б – скорость нагружения $(3-9) \cdot 10^7$ МПа/с

При импульсном нагружении (рис. 4, б) пластическую зависимость напряжение-деформация можно аппроксимировать аналогичным уравнением

$$\sigma = a \ln(\varepsilon) + b, \quad (12)$$

где a и b - параметры материала при скорости нагружения $\dot{\sigma}_p$.

При пластическом деформировании в диапазоне напряжений $\sigma_E \leq \sigma(t_{E} \leq t \leq t_{Pj}) \leq \sigma_{Pj}$ скорость деформации $\dot{\varepsilon}_j(t) \leq \dot{\varepsilon}_{mj}$ плавно увеличивается до максимального значения $\dot{\varepsilon}_{mj}$, соответствующего конкретному режиму нагружения $j=1-4$.

На основании (12) зависимость деформация-время

$$\varepsilon_j(t) = \exp\left(\frac{\sigma_j(t) - b}{a}\right), \tag{13}$$

скорость деформации

$$\dot{\varepsilon}_j(t) = \frac{\dot{\sigma}_j(t)}{a} \exp\left(\frac{\sigma_j(t) - b}{a}\right). \tag{14}$$

В соответствии с условием аппроксимации $\sigma_E \leq \sigma \leq \sigma_{Pj}$ максимальная скорость деформации

$$\dot{\varepsilon}_{mj} = \frac{\dot{\sigma}_p}{a} \exp\left(\frac{\sigma_{pj} - b}{a}\right). \tag{15}$$

Для алюминия АМц максимальные скорости деформации приведены в табл. 1.

Деформация предела пропорциональности ε_E и параметры a и b зависят от максимальной скорости нагружения $\dot{\sigma}_m$. Поэтому при пластическом деформировании зависимость напряжение-деформация может быть описана уравнением

$$f_p(\sigma, \varepsilon, \dot{\sigma}_m) = 0. \tag{16}$$

Напряжение σ_p , ограничивающее этап пластического деформирования, по физическому смыслу можно назвать пределом пластичности.

На основании (11) и (12) с учетом (10) пределы пропорциональности при статическом и импульсном нагружениях определяем из уравнений:

$$\sigma_{EC} = a_c \ln(\sigma_{EC} / E) + b_c, \tag{17}$$

$$\sigma_E = a \ln(\sigma_E / E) + b.$$

Таблица 1

Скорости нагружения и деформирования алюминия АМц

Режим	Нагружение	Скорость нагружения, 10^6 МПа/с		$\dot{\varepsilon}_{mj}, 10^3$ 1/с
		$\dot{\sigma}_m$	$\dot{\sigma}_p$	
1	$\sigma \leq \sigma_{K1}$	33		
	$\sigma > \sigma_{P1} = \sigma_{K1}$		4,5	1,1
2	$\sigma \leq \sigma_{K2}$	33		
	$\sigma_{K2} \leq \sigma \leq \sigma_{P2}$		14	
	$\sigma > \sigma_{P2}$		3,6	1,9
3	$\sigma \leq \sigma_{K3}$	33		
	$\sigma_{K3} \leq \sigma \leq \sigma_{P3}$		8	
	$\sigma > \sigma_{P3}$		<8	2,8
4	$\sigma \leq \sigma_{K4}$	20		
	$\sigma_{K4} \leq \sigma \leq \sigma_{P4}$		8	
	$\sigma > \sigma_{P4}$		<8	1,9

Третий этап - деформирование при уменьшении скорости нагружения $0 \leq \dot{\sigma}(t) < \dot{\sigma}_p$, происходит при напряжениях, больших предела пластичности, но не превышающих максимальное для заданного режима нагружения, $\sigma_{Pj} < \sigma(t_{Pj} < t \leq t_{Mj}) \leq \sigma_{Mj}$. При этом деформация

$$\varepsilon_j(t > t_{Pj}) = \varepsilon_{Pj} + \dot{\varepsilon}_{mj}(t - t_{Pj}), \tag{19}$$

где t_{pj} - время достижения напряжения σ_{pj} , увеличивается с постоянной максимальной скоростью $\dot{\varepsilon}_{mj}$ (15), зависящей от режима нагружения.

Для АМц в режиме 2 максимальная скорость деформации $\dot{\varepsilon}_{m2} = 1,9 \cdot 10^3 1/c$, т.е. сопротивление деформированию меньше, чем при пластическом деформировании. Как показано на рис. 3 (режим 2) общая деформация ε_2 , вызванная напряжением $\sigma_2 > \sigma_{p2}$, равна сумме деформации ε_{a2} , определяемой по уравнению (13), и дополнительной деформации ε_s , зависящей от скорости нагружения $0 \leq \dot{\sigma}(t) < \dot{\sigma}_p$. На основании (19) дополнительная деформация

$$\varepsilon_{sj}(t) = \varepsilon_j(t) - \varepsilon_{pj} = \varepsilon_{pj} + \dot{\varepsilon}_{mj}(t - t_{pj}) - \exp\left(\frac{\sigma_j(t) - b}{a}\right), \quad (20)$$

где $\varepsilon_{pj} = \exp\left(\frac{\sigma_{pj} - b}{a}\right)$.

Для рассматриваемого примера $j=2$ и $\varepsilon_s = \varepsilon/3$. Скорость дополнительной деформации

$$\dot{\varepsilon}_{sj}(t) = \dot{\varepsilon}_{mj} - \frac{\dot{\sigma}_j(t)}{a} \exp\left(\frac{\sigma_j(t) - \sigma_p}{a}\right). \quad (21)$$

При нагружении постоянным максимальным напряжением $\sigma_j(t \geq t_M) = \sigma_{Mj} = \text{const}$, $\dot{\sigma}_j(t \geq t_M) = 0$ и дополнительная деформация является деформацией ползучести

$$\varepsilon_{sj}(t \geq t_M) = \varepsilon_{pj} + \dot{\varepsilon}_{mj}(t - t_{pj}) - \exp\left(\frac{\sigma_M - b}{a}\right), \quad (22)$$

скорость которой равна $\dot{\varepsilon}_{mj}$.

Однако при этом вместо воздействия на материал повышенной температуры реализовано действие динамических напряжений, превышающих статические при заданной деформации. Поэтому дополнительную деформацию ε_s можно назвать деформацией динамической ползучести.

В работе [8] показана ползучесть стали при комнатной температуре при действии постоянных статических напряжений различного уровня.

На основании (19) и (12) с учетом (15), (16) деформирование в режиме динамической ползучести может быть представлено уравнением

$$f_s(\sigma, \varepsilon, \dot{\sigma}_m, \dot{\sigma}, t) = 0, \quad (23)$$

где $\sigma_p < \sigma \leq \sigma_M$ и $0 \leq \dot{\sigma}(t) < \dot{\sigma}_p$.

При нагружении алюминия АМц по режиму 3 (рис. 3) на 8-й микросекунде произошло локальное резкое уменьшение скорости нагружения, которое отразилось локальной ползучестью. При увеличении скорости нагружения материал возвращается на пластическую зависимость напряжение-деформация.

Четвертый этап деформирования - разгрузка. При разгрузке ($\sigma < \sigma_M$ и $\dot{\sigma}(t) < 0$) деформация продолжает увеличиваться до максимального значения, но с уменьшающейся скоростью. При дальнейшем уменьшении напряжений происходит линейное уменьшение деформаций.

Аналогичное явление ползучести при разгрузке было установлено в работе [9] при низких скоростях нагружения титанового сплава ВТ1-1.

Полученные результаты испытаний образцов аустенитной стали X18H10T.

При режимах нагружения 2 и 3 выявили те же закономерности (рис. 5) пластического деформирования (динамической ползучести и разгрузки), что и при испытании образцов алюминия АМц, показанных на рис. 3.

После нагружения по режиму 3 и разгрузки тот же образец был дважды испытан в режимах нагружения 4 и 5.

При нагружении по режиму 4 увеличение напряжений до уровня $\sigma_{3\max}$, с которого была проведена разгрузка режима 3, сопровождается упругим деформированием по уравнению (10). Но в этом случае предел пропорциональности $\sigma_{E4} \approx \sigma_{3\max}$. Дальнейшее пластическое деформирование, динамическая ползучесть и разгрузка происходят по законам первичного нагружения. Эти же

явления имеют место и при нагружении по режиму 5 образца, испытанного в режимах 3 и 4. Осредненные результаты испытаний девяти образцов по этой программе, показанные пунктирной линией на рис. 5, соответствуют уравнению (12).

При повторных нагружениях увеличиваются значения предела пропорциональности σ_E и предела пластичности σ_P , но сохраняются параметры уравнения (12). При $\sigma > \sigma_P$ проявляется ползучесть материала, как и при первом нагружении.

Такая реакция металлов на повторное статическое нагружение известна как наклеп.

При нагружении по режиму 1 в начале пластического деформирования была проведена частичная разгрузка с напряжения $1,8\sigma_E$ до напряжен $1,4\sigma_E$ затем догрузка до $2,1\sigma_E$ и полная разгрузка. Догрузка после частичной разгрузки продолжает процесс пластического деформирования. Следовательно, реакция материала на микросекундные изменения режима нагружения в виде наклепа такая же, как и при повторных нагружениях с интервалом в десятки минут.

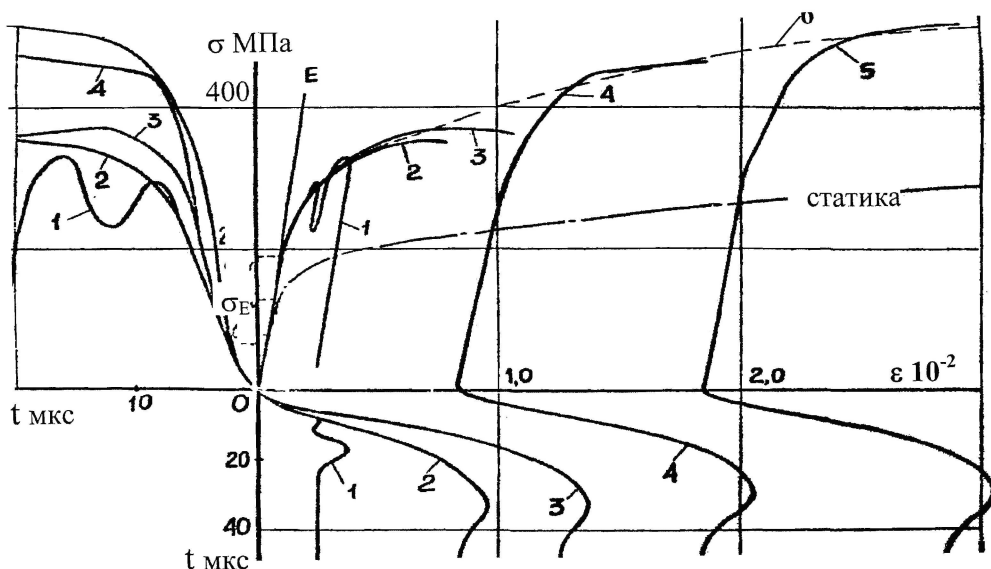


Рис. 5. Напряжение–деформация–время для стали X18H10T при режимах нагружения 1–5.
Линия 6 – среднее значение результатов испытаний 9 образцов

Импульсные испытания стержневых образцов проводят в заданном режиме нагружения $\sigma(t)$, характерного для работы материала в конструкциях и при технологическом переделе. Деформация является реакцией материала на режим нагружения. Поэтому поведение материала обусловлено параметрами импульса напряжений: амплитудой, длительностью фронта, вершины и спада, скоростями нагружения и разгрузки.

Параметры статического и импульсного нагружения испытанных материалов, осредненные по результатам испытаний 5-9 образцов, приведены в табл. 2.

Наибольшее сопротивление материала импульсному деформированию - импульсное упрочнение реализуется на фронте импульса при максимальной скорости нагружения $\dot{\sigma}_m$. На основании (12) и (11) импульсное упрочнение можно оценить отношением импульсного и статического напряжений, при которых реализуется одинаковая деформация $\varepsilon \geq \varepsilon_E$,

$$\frac{\sigma}{\sigma_c} = \frac{a \ln(\varepsilon) + b}{a_c \ln(\varepsilon) + b_c} \quad (25)$$

На графиках импульсного упрочнения исследованных материалов (рис. 6) на оси ординат отмечены отношения импульсного и статического пределов пропорциональности σ_E/σ_{EC} (табл. 2).

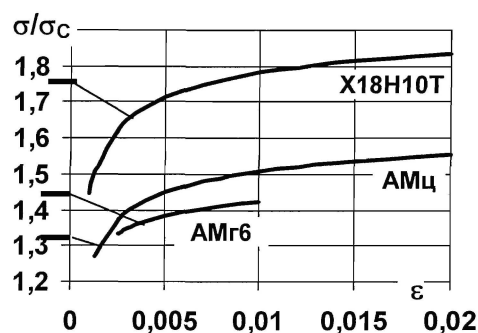


Рис. 6. Импульсное упрочнение σ/σ_c для реализации деформации $\varepsilon \geq \varepsilon_E$

Параметры статического и импульсного нагружений испытанных материалов

Материал	АМц		АМгб		Х18Н10Т	
$E, 10^5 \text{ МПа}$	0,724		0,723		1,94	
$C_0, \text{ м/с}$	5100		5170		4950	
$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$	2,78		2,68		7,92	
Нагружение	Статика	Импульс	Статика	Импульс	Статика	Импульс
$\varepsilon_{\max}, 10^{-2\%}$	2		1		2	
$a, \text{ МПа}$	20,245	39,238	30,316	51,799	40,895	92,838
$b, \text{ МПа}$	210,04	356,68	316,08	489,4	420,03	840,29
R^2	0,994	0,995	0,994	0,979	0,982	0,994
$\sigma_E, \text{ МПа}$	69	91	122	178	116	203
σ_E/σ_{EC}	1,32		1,46		1,75	
$\varepsilon_E, 10^{-2}$	0,095	0,13	0,17	0,25	0,06	0,1
$\dot{\sigma}_m, 10^6 \text{ МПа/с}$	33		39		88	
$\dot{\sigma}_p/\dot{\sigma}_m$	0,24		0,16		0,3	
$\dot{\varepsilon}_m, 10^3 \text{ 1/с.}$	1,8		1,0		0,8	

* Диапазон логарифмической аппроксимации $\varepsilon_E - \varepsilon_{\max}$ при $\dot{\sigma}_m - \dot{\sigma}_p$.

Упрочнение алюминия АМц и стали Х18Н10Т интенсивно увеличивается до деформации 1%, затем при $\varepsilon > 1,5\%$ практически стабилизируется на уровне 1, 5 5 и 1, 8 5 соответственно. У алюминия АМгб импульсное упрочнение стабилизируется на уровне 1, 4 2 при $\varepsilon = 1\%$.

Увеличение предела пропорциональности ($\sigma_p/\sigma_{EC} > 1$) и импульсное упрочнение необходимо учитывать при разработке технологий обработки соответствующих материалов и при проектировании конструкций, работающих при волновом нагружении.

Выводы

1. Применение разработанной методики синхронного определения напряжений и деформаций в контрольном сечении стержня-образца при распространении упругопластической волны обеспечивает детальное исследование процесса деформирования.

2. Экспериментально показано, что процесс деформирования зависит от напряжения и скорости нагружения.

3. Выявлены два последовательных вида деформирования: упругопластическое при постоянной максимальной скорости нагружения и динамическая ползучесть при уменьшении скорости нагружения и разгрузке.

4. Но применение методики ограничено возможностью испытаний только неферромагнитных материалов, которые не вносят искажения в равномерное магнитное поле индукционного датчика силы.

Литература

1. Купершляк-Юзефович, Г.М. Методика измерения напряжений при импульсном нагружении стержня / Г.М. Купершляк-Юзефович, Ю.В. Шкербин // Проблемы прочности. - 1981. - № 1. - С. 41-45.

2. Николас, Т. Поведение материалов при высоких скоростях деформации / Т. Николас // Динамика удара: пер. с англ. - М.: Мир, 1985. - С. 198-256.

3. Wang Li-Li Influences of Stress Wave Propagation upon Studying Dynamic Response of Materials at High Strain Rates // Journal of Beijing Institute of Technology. - 2004. - Vol. 13. - No.3.

4. Александров Е.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем / Е.В. Александров, В.В. Соколинский. - М.: Наука, 1969. - 200 с.

5. Гольдсмит, В. Удар и контактные явления при средних скоростях / В. Гольдсмит // Физика быстротекущих процессов: сб. науч. тр. - М.: Мир, 1971. - Т. 2. - С. 153-201.

6. А.с.666447 (СССР). Датчик мгновенных значений механических напряжений в образце/ Г.М. Купершляк-Юзефович, Ю.В. Шкербин. -Приоритет 19.04.1977;опубл. Б.К, 1979, №21.

7. Купершляк-Юзефович, Г.М. Оценивание погрешностей измерения динамических деформаций тензорезисторами /Г.М. Купершляк-Юзефович //Датчики и системы. - 2003. - № 9. - С 8-11.

8. Жуков, А.М. Некоторые особенности поведения металлов при упругопластическом деформировании/ А.М. Жуков //Вопросы теории пластичности: сб. науч. тр. - М: Издательство АН СССР, 1961. - С. 30-57.

9. Викторов, В.В. Математическое и экспериментальное моделирование влияния временных и скоростных эффектов на механическое поведение материалов / В.В. Викторов, В. Н Кукуджанов // Труды IX конференции по прочности и пластичности. - М.: Издательство РАН, 1996. -Т. 2.- С 45-51.

Поступила в редакцию 3 июня 2009 г.

Купершляк-Юзефович Георгий Марианович. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин» Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов - экспериментальные исследования эксплуатационной нагруженности конструкций и сопротивления материалов с учетом волн напряжений.

Georgiy M. Kupershlyak-Yuzefovich. Candidate of engineering science, senior scientific worker of the Applied Mechanics, Dynamic and Strength of Machines department of South Ural State University. Professional interests - experimental researches of operational load of constructions and strength of materials with account of stress waves.

Шкербин Юрий Владимирович. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Машины и технология сварочного производства» Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов - экспериментальные исследования эксплуатационной нагруженности конструкций и сопротивления материалов с учетом волн напряжений.

Yuriy V. Shkerbin. Candidate of engineering science, senior scientific worker of the Machines and Technologys of Welding department of South Ural State University. Professional interests - experimental researches of operational load of constructions and strength of materials with account of stress waves.

Исаева Наталия Юрьевна. Аспирант кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин» Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов - компьютерное моделирование эксплуатационной нагруженности конструкций.

Nataliya Yu. Isaeva. Post graduate student of the Applied Mechanics, Dynamic and Strength of Machines department of South Ural State University. Professional interests - computer simulation of operational load of constructions.