

УДК 621.327.7

## **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСОВ ТОКА НА ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ**

**В.А. Порохов, В.Н. Кукуджанов**

*Москва*

Рассмотрены методики построения динамических диаграмм деформирования в условиях воздействия мощных электромагнитных полей (ЭМП) и электрических токов. Установлено, что при использовании методики кольцевых образцов деформирующее воздействие ЭМП и его действие, изменяющее механические свойства материала, разделено по времени. Свойства металлов под действием ЭМП меняются в большей степени уже после завершения деформации. Наиболее подходящей из рассматриваемых методик для выявления особенностей высокоскоростного деформирования материалов в ЭМП является методика составного стержня Гопкинсона с независимым механическим и электромагнитным нагружением.

Быстрое изменение механических свойств металлов под действием импульсов высокоэнергетического электромагнитного поля (ЭМП) и связанного с ним электрического тока (ЭТ) представляет большой интерес при изучении процессов высокоскоростного деформирования металлов при обработке давлением. С одной стороны, за счет диссипации энергии ЭМП происходит разупрочнение металла [1], а с другой стороны, – его высокоскоростное упрочнение [2]. Для надежного описания такого рода процессов требуется определение зависимостей механических свойств деформируемых материалов от скорости деформации и плотности вводимой в деформируемый объем энергии ЭМП. Непростая задача построения динамических диаграмм деформирования осложняется как условием сохранения постоянства скорости деформации [2], так и зависимостью электродинамических параметров нагружаемого образца от изменения его геометрии и структуры и свойств образца в процессе нагружения.

Цель работы – на основе сравнения различных методик определения динамических и квазистатических свойств металлов в условиях воздействия ЭМП выявить особенности влияния импульсов ЭТ и ЭМП на процессы высокоскоростной деформации металлов, а также установить, в какой момент прохождения импульса тока выгоднее прикладывать импульс давления, более короткий по времени, чем импульс тока, что возможно лишь при изучении динамических диаграмм деформирования. Среди известных методик построения динамических диаграмм деформирования, в которых возможно воздействие ЭМП или ЭТ на деформируемый объем материала, выделим методику электродинамического деформирования кольцевых образцов (ЭДДКО) [3] и методику составного (разрезного) стержня Гопкинсона (ССГ) [2].

Методика построения динамических диаграмм деформирования, основанная на электродинамическом взаимодействии трубчатого (кольцевого) образца с импульсным магнитным полем (рис.1), состоит в следующем. Нестационарное магнитное поле  $\mathbf{H}$  индуктора, где протекает импульсный ток от генератора импульсных токов (ГИТ), наводит импульсный ток в образце. Взаимодействие наведенного тока и импульсного магнитного поля приводит к созданию электродинамических сил в образце, которые его деформируют. Эта методика позволяет достигать в условиях квазистатики скоростей деформаций до  $10^4 \text{ с}^{-1}$  [3].

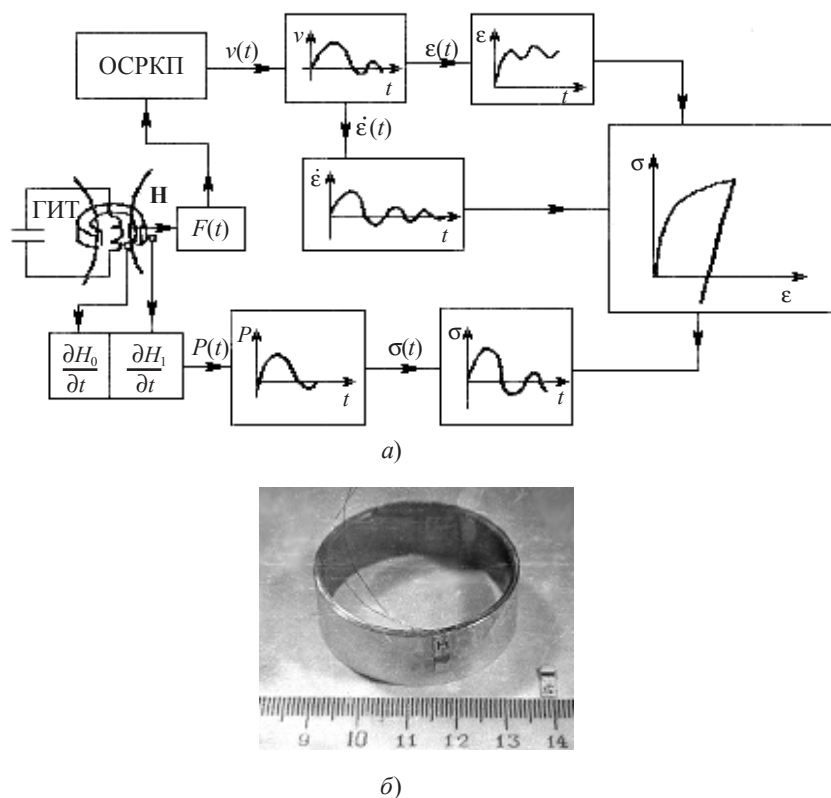


Рис. 1. Методика построения динамической диаграммы деформирования на кольцевых образцах (а – блок-схема эксперимента; б – кольцевой образец с датчиками)

На рис. 1 обозначено:  $H_0(t)$ ,  $H_1(t)$  – напряженность магнитного поля соответственно на внутренней наружной поверхностях образца;  $v(t)$  – скорость движения образца, определяемая по частоте биений  $F(t) \sim v(t)$  опорного и отраженного от движущегося образца лазерного луча; ОСРКП – оптическая система регистрации кинематических параметров на базе лазера ЛГ-38;  $P_M(t)$  – магнитное давление,  $\sigma(t)$  – механическое напряжение,  $\epsilon(t)$  – деформация образца,  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации.

Следует заметить, что наведенный ЭТ распределяется по толщине образца неравномерно. Поэтому для относительно однородной обработки деформируемого объема ЭМП и ЭТ толщина образца  $h$  не должна превышать толщины скин-слоя  $\delta = \sqrt{2\gamma_0/(\omega\mu_0)}$ , где  $\gamma_0$  – удельное электрическое сопротивление материала,  $\omega$  –

циклическая частота разряда ГИТ,  $\mu_0$  – магнитная постоянная в системе СИ. Уменьшение толщины образца  $h$  менее чем на  $0,5\delta$  ведет к значительному просачиванию ЭМП сквозь материал образца, что приводит к снижению КПД электросилового воздействия и возникновению запаздывающего противодействия ЭМП, сжатию и возможной потере устойчивости кольцевого образца. На рис. 2 показаны типичные осциллограммы измеряемых электромагнитных параметров.

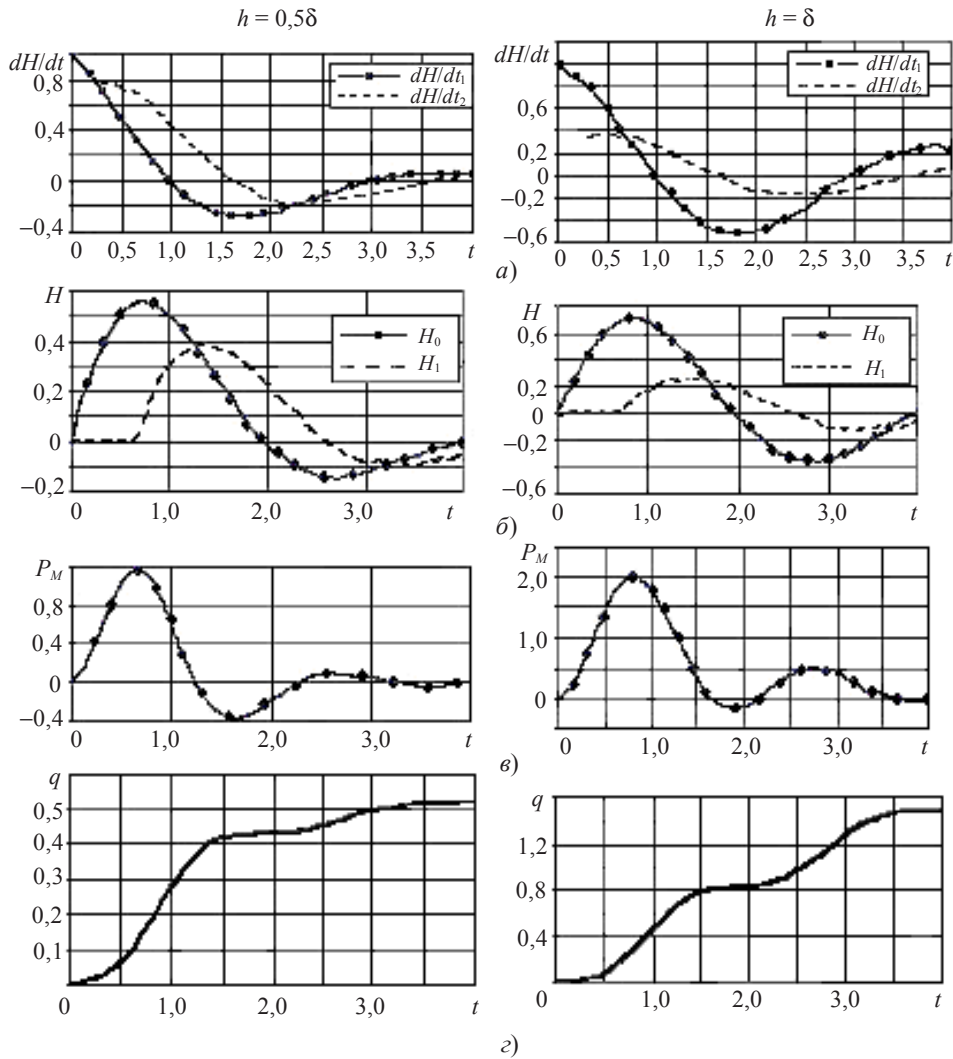


Рис. 2. Типичные осциллограммы электромагнитных параметров при ЭДКО  
 (а – исходные осциллограммы  $\partial H / \partial t$  ; б – осциллограммы  $H(t)$ ;  
 в – магнитное давление  $P_M$ ; г – энергия ЭПМ, выделившаяся в образце)

Из графиков на рис.2 видно, что эффективность воздействия ЭМП для  $h = \delta$  выше, чем для  $h = 0,5\delta$ . Так, максимальное магнитное давление выше в 1,5 раза, а энергия, переданная образцу для преобразования структуры, более чем в 2,5 раза. Давление сжатия для  $h = 0,5\delta$  составляет треть от давления растяжения и более чем в 2,5 раза выше, чем для  $h = \delta$ . Из рис. 2 также наглядно видно, что максимуму

давления соответствует только треть диссипируемой энергии  $q$ , которая достигает своего максимума, когда давление магнитного поля практически исчезает. Максимально достижимая энергия  $q$  в процессе нагружения со скоростью деформирования  $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  не превышает 0,2 от эффективной энергии ЭМП ( $q^*$ ), вызывающей наибольшее увеличение пластичности при раздельном действии ЭМП и механической нагрузки [1], и не достигает порогового значения  $q^*$  для одновременного действия [4]. Таким образом, при построении динамических диаграмм нагружения методом ЭДДКО специфическое действие ЭМП, меняющее пластические свойства ЭМП, практически отсутствует. Изменение пластичности возможно лишь после снятия нагрузки или за счет другого высокочастотного источника ЭМП, подключаемого к индуктору до создания деформирующей нагрузки.

В работе использовались две методики ЭДДКО. Первая – единовременная, которая позволяла построить полную диаграмму деформирования в процессе воздействия высокоэнергетического ЭМП, и вторая – упрощенная, пошаговая экспериментально-расчетная позволяла определять зависимость предела текучести от скорости деформации, ограничиваясь минимумом измерений с использованием несложного математического расчета вместо применения сложного измерительного оборудования.

В качестве образцов использовались кольцевые образцы из алюминиевых сплавов АМг6 и Д16, которые вырезались из трубчатой заготовки с внутренним диаметром 40 мм, толщиной стенки 0,5–2 мм и высотой от 3 до 20 мм (см. рис. 1, б).

По упрощенной методике (ЭДДКО–У) образец обрабатывали импульсным магнитным полем цилиндрического индуктора таким образом, чтобы конечная деформация не превышала 1%. В процессе эксперимента измеряли напряженность магнитного поля в зазоре между кольцом и индуктором, а также конечный диаметр кольца. Эти данные закладывали в программу расчета на ЭВМ, в которой материал кольца считался упругопластическим с упрочнением. Модуль упрочнения в начале пластических деформаций до 1% определялся по статической диаграмме.

Программа работала следующим образом. По напряженности магнитного поля и геометрии образца устанавливали магнитное давление:

$$P_M = \frac{\mu \mu_0 (H_0(t)^2 - H_1(t)^2)}{2}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);  $H_0$  – напряженность поля на внутренней стороне кольца;  $H_1$  – напряженность поля на внешней стороне. Затем задавали предел текучести  $\sigma_T^C$  (обычно статический). Расчетную конечную деформацию образца  $\epsilon_p$  оценивали из условия возникновения чисто упругих колебаний около конечного размера в момент, когда ускорение равнялось нулю. После этого сопоставляли расчетную и экспериментальную величину диаметра кольца с точностью до 0,1% от величины деформации. Если расчетный диаметр оказывался больше экспериментального, то предел текучести повышался на 1–0,1% от первоначального, а если меньше экспериментального, то предел текучести снижался. Счет продолжался до совпадения (на 0,1%) конечного расчетного и экспериментально полученных диаметров. Расчетная схема и алгоритм расчета представлены на рис. 3.

На рис. 3, а обозначено:  $\sigma_{T1}$  и  $\sigma_{T2}$  – первый и второй расчетные пределы текучести для расчетных деформаций  $\epsilon_{p1}$  и  $\epsilon_{p2}$ ,  $\sigma_T^C$  – предел текучести для статического

нагрузки,  $\epsilon_3$  – экспериментально установленная деформация, для которой определяется динамический предел текучести  $\sigma_T^D$ ,  $\epsilon_y$  – упругая деформация,  $\epsilon_{31}$ ,  $\epsilon_{32}$ ,  $\epsilon_{33}$  – экспериментальные значения деформаций при пошаговом последовательном нагружении.

На рис. 3,б обозначено:  $\sigma_{0,2}$  – предел упругости для деформации соответствующей 0,2%,  $K$  – упрочнение,  $\epsilon_p$  и  $\epsilon_3$  – соответственно расчетные и экспериментальные деформации,  $\Delta$  – задаваемое отклонение.

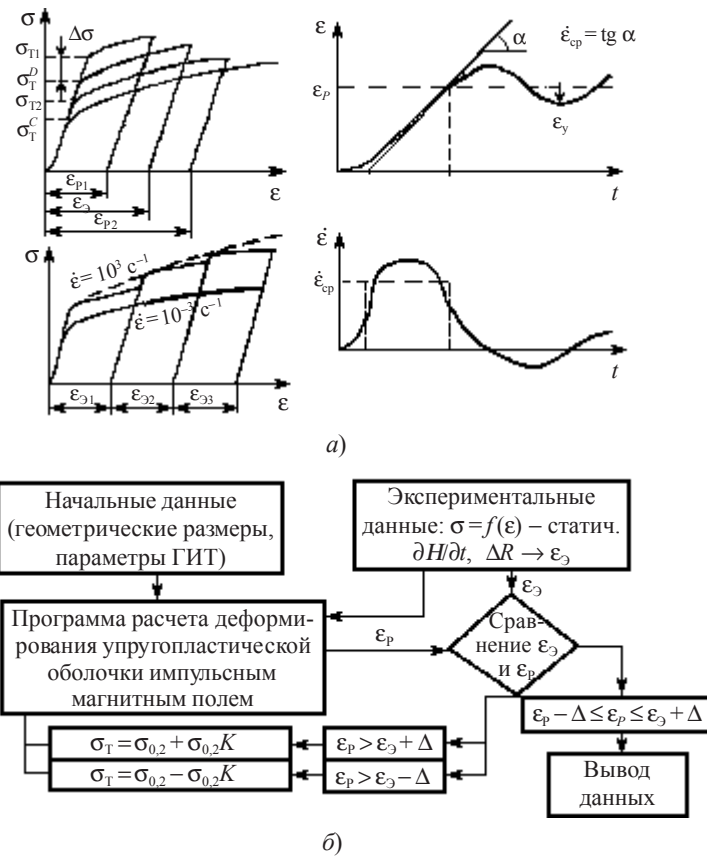


Рис 3. Расчетная схема (а) и алгоритм расчета (б) диаграммы деформирования на кольцевых образцах по конечной деформации

Скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  определялись геометрическими размерами образцов и находились в диапазоне от  $5 \cdot 10^2$  до  $5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ . Динамический модуль упрочнения устанавливали по полной диаграмме  $\sigma$ – $\epsilon$ , которую строили на основании данных отдельных последовательных испытаний деформирования, при деформации не более чем на 1% (0,4 мм) на каждом испытании. Датчик поля приклеивался к кольцу с внутренней стороны. Конечный внешний диаметр измеряли с двух сторон кольца с точностью 0,01 мм. Допускалась овальность кольца не более 0,05 мм. После первой (и для каждой последующей) деформации испытываемое кольцо для сохранения равномерного магнитного зазора центрировалось относительно индуктора конической втулкой из фторопласта.

Результаты отдельных экспериментов сохранялись в памяти ПК, образуя общий массив данных в координатах  $\sigma_T, \epsilon, \dot{\epsilon}$ , где  $\sigma_T$  – предел текучести,  $\epsilon$  – деформация,  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации. Затем эти результаты обрабатывались по программе, включающей в себя замену дискретных значений (расчетных точек) непрерывной поверхностью второго порядка в координатах  $\sigma_T, \epsilon, \dot{\epsilon}$ . Полученные таким образом данные для каждого материала сохранялись в отдельном файле для последующего использования их при расчете конкретного технологического процесса.

Для примера приведены графики функций  $\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon} = \text{const})$  и  $\sigma_T = \psi(\dot{\epsilon})$  для материалов Д16Т (рис. 4) и АМг6 (рис. 5). На рис. 5,а приведены данные  $\sigma_T = \psi(\dot{\epsilon})$  для исходного материала  $\epsilon_{\text{пр}} = 0$  и для предварительно деформированного –  $\epsilon_{\text{пр}} = 0,1$ . Точность построения динамической диаграммы составляла около 5% и определялась в основном точностью замера осциллограмм изменения магнитного поля.

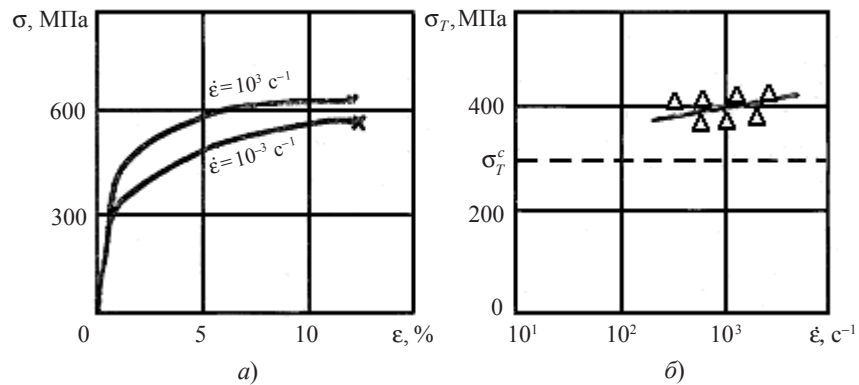


Рис. 4. Графики функций: а)  $\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon} = \text{const})$  и б)  $\sigma_T = \psi(\dot{\epsilon})$  для сплава Д16Т ( $\sigma_T^c$  – статический предел текучести)

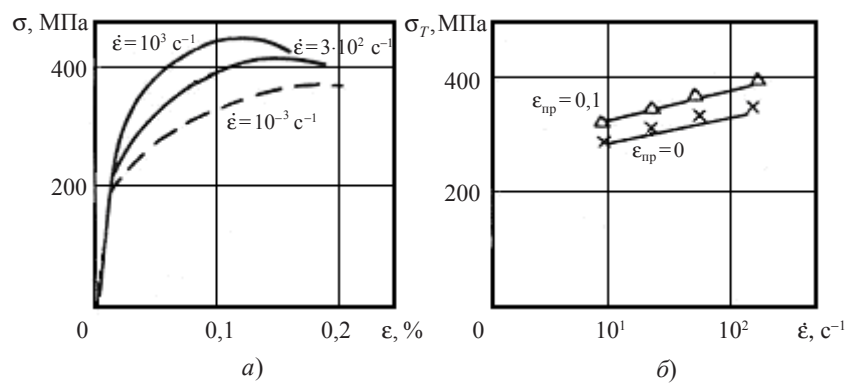


Рис. 5. Графики функций: а)  $\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon} = \text{const})$  и б)  $\sigma_T = \psi(\dot{\epsilon})$  для сплава АМг6

По основной методике ЭДКО при построении динамической диаграммы путем деформирования кольца импульсным магнитным полем порядок построения диаграммы деформирования был следующим (см. рис. 1,а). Одновременно производились измерения изменения производной напряженности магнитного поля на внутренней  $\partial H_0(t)/\partial t$  и наружной  $\partial H_1(t)/\partial t$  поверхностях образца и скорости движения

образца  $v(t)$ , определяемой по частоте биений  $F(t) \sim v(t)$  опорного и отраженного от движущегося образца лазерного луча, проходящего через оптическую систему регистрации кинематических параметров (ОСРКП) на базе лазера ЛГ-38 [3]. Производную магнитного поля измеряли пробной катушкой, установленной в зазоре между кольцом и индукторами на внешней поверхности образца (см. рис. 1, б). Осциллограммы исходных сигналов  $\partial H_0(t)/\partial t$ ,  $\partial H_1(t)/\partial t$  и  $F(t)$  синхронизировались и преобразовывались с помощью специальной программы в  $H_0(t)$ ,  $H_1(t)$  и  $v(t)$ . Затем по (1) определялось магнитное давление  $P_M$ .

Напряжение в материале рассчитывали из уравнения:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{P_M}{\delta} - \frac{\sigma}{R_0 + u}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность материала;  $\partial v/\partial t$  – ускорение;  $P_M$  – магнитное давление;  $\delta$  и  $R_0$  – толщина и радиус кольца;  $u$  – смещение.

Смещение  $u$  определялось путем интегрирования графика скорости (с проверкой по конечному значению смещения). По магнитному давлению, смещению и ускорению, полученному дифференцированием графика скорости, из формулы (2) рассчитывали напряжение как функцию времени. Исключая из диаграмм  $\sigma(t)$  и  $\epsilon(t)$  время, получали диаграмму  $\sigma$ – $\epsilon$ . Однако при таком нагружении скорость деформации оказалась переменной. Для построения расчетных схем технологических процессов нужна диаграмма  $\sigma$ – $\epsilon$  при  $\dot{\epsilon} = \text{const}$ . Для этого данные с переменными скоростями деформации вводились в общий массив результатов в координатах  $\sigma_T$ ,  $\epsilon$ ,  $\dot{\epsilon}$ , откуда строилась диаграмма с  $\dot{\epsilon} = \text{const}$ . Кроме того, программа позволяла выбрать из всего массива данных зависимости  $\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon} = \text{const})$ .

Расчетное приращение температуры в поверхностном слое образца обычно не превышало  $40^\circ\text{C}$  в среднем по всему сечению образца, что также подтверждается измерением остаточной температуры примерно через 0,5 с после деформирования. В этом диапазоне температур механические свойства исследуемых материалов изменяются незначительно, поэтому при построении диаграмм влияние температуры на механические характеристики не учитывалось. Величина удельной электромагнитной энергии, рассеиваемой в образце, как было указано выше, была значительно ниже плотности энергии  $q^*$ , вызывающей существенные изменения его свойств [1].

Как было указано ранее, методика ЭДКО не позволяет внести в образец электромагнитную энергию, значительно изменяющую пластические свойства материалов. Для устранения этого недостатка была выбрана методика составного (разрезного) стержня Гопкинсона (ССГ) [2], которая обеспечивала подвод тока к испытываемому образцу без искажения механической нагрузки.

Установка, на которой проводили испытания (рис. 6), состояла из индуктора 1, создающего импульсное магнитное поле; ударника 2, который или разгонялся магнитным полем индуктора, или был жестко связан с передающим стержнем 3 для передачи ударного магнитного импульса; нагружающего устройства 4 (рис. 7), в котором устанавливали цилиндрический образец и с внешней стороны крепили токоподводы; опорного стержня 5. В процессе эксперимента регистрировали напряженность магнитного поля в зазоре индуктор–ударник, деформации стержней от проходящих и отраженных волн, а также ускорение свободного конца каждого стержня.

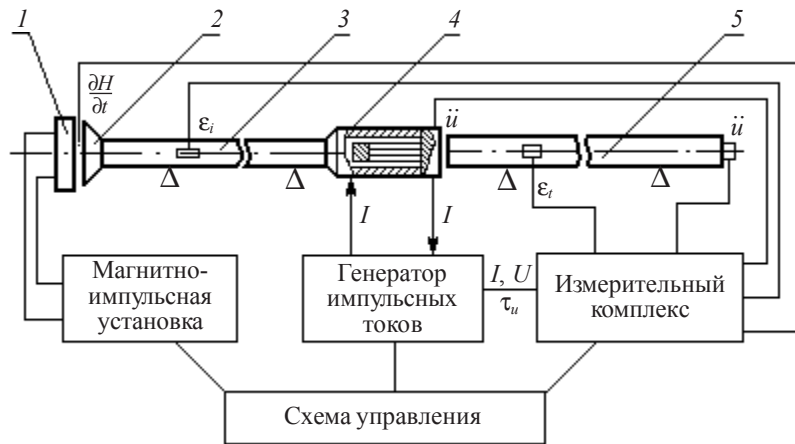


Рис. 6. Схема установки для испытания по методике ССГ

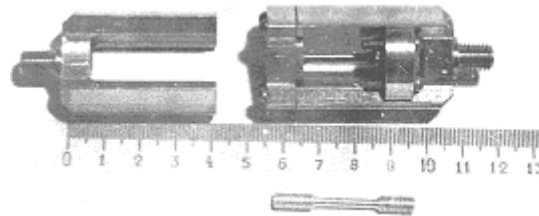


Рис. 7. Нагружающее устройство и образец для испытаний

Деформацию образца рассчитывали по формуле:

$$\epsilon(t) = \frac{u_1 - u_2}{2} = \frac{2c_0}{l_0} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_t) dt, \quad (3)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  – смещения соответственно передающего и опорного стержней;  $l_0$  – длина образца;  $c_0$  – скорость распространения упругих волн;  $\epsilon_i$  – деформация в падающей волне;  $\epsilon_t$  – деформация в проходящей волне;  $t$  – время.

Напряженно-деформированное состояние образца при этом принимали приближенно однородным. Напряжения в образце определяли по уравнению:

$$\sigma(t) = E \frac{F_0}{F} \epsilon_i(t), \quad (4)$$

где  $E$ ,  $F_0$ ,  $\epsilon_i$  – соответственно модуль упругости, площадь поперечного сечения и деформация опорного стержня;  $F$  – площадь сечения образца.

Образцы диаметром 1,5–2,5 мм и длиной рабочей части 10–15 мм изготавливали из сплавов АМг6, АД1, Д16, М1 и др. Однако в связи с быстрой локализацией деформации (особенно у меди) достаточно надежные результаты получены лишь для алюминиевых сплавов. Так как импульс механического давления ( $P$ ) был короче импульса ЭТ ( $I$ ), то данная методика позволяла исследовать диаграммы деформирования на разных этапах как в момент прохождения ЭТ, так и после него. Режимы совместного воздействия ЭТ ( $I$ ) и механической нагрузки ( $P$ ) приведены на рис. 8.



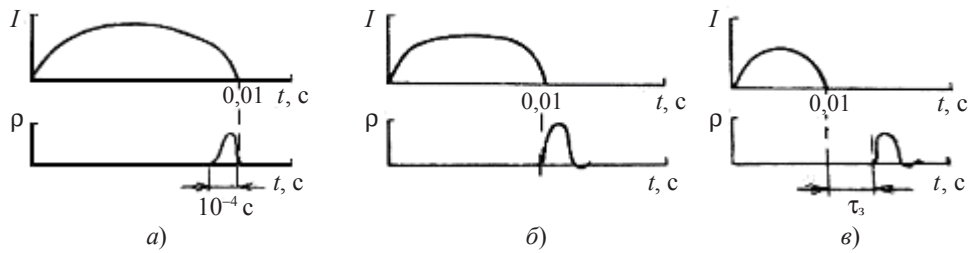


Рис. 8. Графики режимов воздействия ЭТ и давления на образец  
(а – в момент прохождения ЭТ, б – непосредственно по завершении действия ЭТ,  
в – с некоторым временем задержки  $\tau_3$ )

На рис. 9 показаны результаты исследования влияния времени задержки импульса механического давления на предел текучести АМгб в зависимости от относительной удельной энергии  $\mu = q/q^*$  воздействия ЭТ. Из этих графиков видно, что последствие воздействия ЭТ снижается с увеличением времени задержки и пропадает при  $\tau_3 > 30$  с.

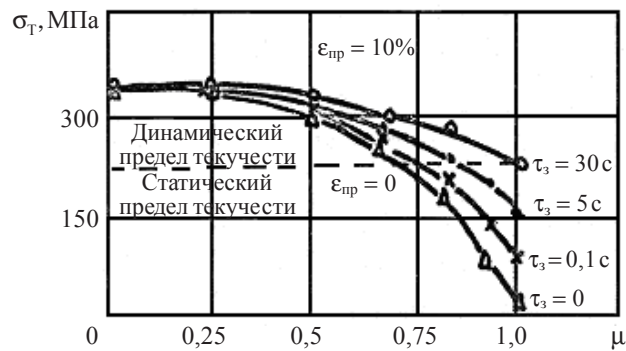


Рис. 9. Влияние времени задержки импульса давления по отношению к завершению импульса ЭТ для АМгб

На рис. 10 показаны типовые диаграммы деформирования АМгб при  $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$  для различных  $\mu$ , где

$$q = \frac{1}{V} \int_0^{\tau} I(t) U(t) dt.$$

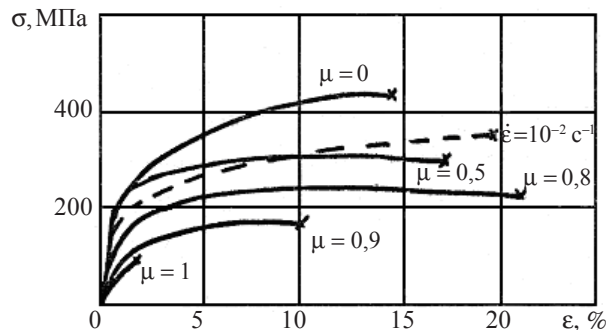


Рис. 10. Влияние относительной удельной энергии  $\mu$  на динамические диаграммы АМгб

Здесь  $V$  – объем обрабатываемой области образца,  $\tau$  – длительность импульса ЭТ,  $I(t)$  и  $U(t)$  – осциллограммы тока и напряжения.

Следует отметить, что полную диаграмму  $\sigma$ – $\epsilon$  до предельной деформации (разрушения) довести не удалось (максимально достижимая деформация не превышала 80%). В результате высокоскоростных испытаний выяснено, что при  $\mu = q/q^* = 0,9$  ( $q^* = 1,65$  Дж/мм<sup>3</sup> – эффективная энергия обработки для АМг6 для достижения максимальной пластичности в условиях раздельного действия  $I$  и  $P$  при статическом нагружении) предельная деформация начинает резко уменьшаться и в случае  $q/q^* \sim 1$  (по раздельному действию) наблюдается хрупкое разрушение образца.

На рис. 11 показаны сравнительные динамические диаграммы деформирования при  $\dot{\epsilon} = 10^3$  с<sup>-1</sup> и  $\mu = 0,1$ , полученные по различным методикам для предварительно деформированных на 10% образцов из АМг6.

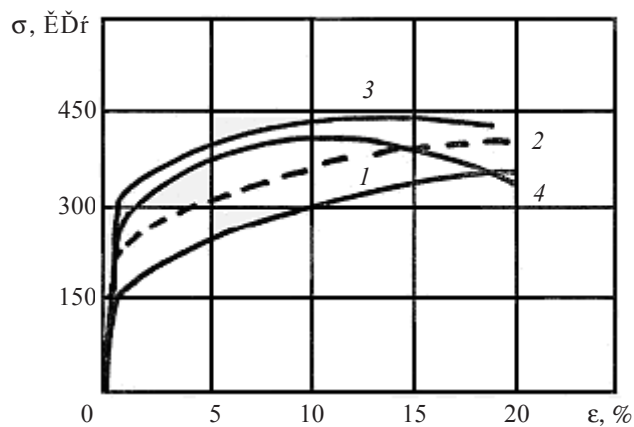


Рис 11. Сравнение диаграмм деформирования, полученных по различным методикам

На рис. 11 обозначено: 1 – статическая диаграмма деформирования при  $\dot{\epsilon} = 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>; 2 – диаграмма, построенная по конечной деформации  $\dot{\epsilon} = 10^3$  с<sup>-1</sup> (пошаговая методика кольцевых образцов ЭДДКО-У, показана пунктиром); 3 – диаграмма, построенная методом ССГ на цилиндрических образцах ( $\dot{\epsilon} = 10^3$  с<sup>-1</sup>); 4 – диаграмма для кольцевых образцов ЭДДКО ( $\dot{\epsilon} = 10^3$  с<sup>-1</sup>). Из этих графиков следует, что вид диаграммы деформирования зависит от методики испытаний. Методики кольцевых образцов дают менее высокую чувствительность материала к скорости деформации, при этом упрочнение при больших деформациях снижается и может переходить в разупрочнение, очевидно, за счет нарастания электромагнитной энергии в конце импульса давления (см. рис. 2).

Диаграммы деформирования, полученные по различным методикам, приведенные к одной плотности электромагнитной энергии и одинаковой средней скорости деформации, совпадают при малых и умеренных деформациях и существенно различаются в случае их повышения.

Наиболее универсальной методикой получения количественных закономерностей динамического деформирования при импульсном воздействии ЭМП и ЭТ является методика составного стержня Гопкинсона, которая в отличие от методик кольцевых образцов имеет более широкие возможности варьирования нагружающих параметров как по ЭТ, так и по динамической механической нагрузке.

### *Литература*

1. Пластичность и прочность металлических материалов при импульсном воздействии ВЭМП / Н.Н. Беклемишев [и др.] // Препринт ИПМ АН СССР, № 372. М., 1989.
2. *Васин, Р.А.* Динамические зависимости между напряжениями и деформациями / Р.А. Васин, В.С. Ленский, Э.В. Ленский. – В кн.: Механика. Проблемы динамики упруго-пластических сред. – М.: Мир. – 1975. – № 5.
3. *Аверьянов, А.Г.* Об определении динамической диаграммы растяжения с помощью кольцевых образцов / А.Г. Аверьянов, Н.Н. Беклемишев, Г.С. Шапиро // Проблемы прочности. – 1980. – № 9. – С. 7.
4. *Порохов, В.А.* Квазистатическое одноосное разупрочнение некоторых металлических материалов в условиях жесткого закрепления под действием импульсов электромагнитного поля / В.А. Порохов, Н.Н. Беклемишев, В.Н. Кукуджанов // Вестник ННГУ. Серия Механика / Н. Новгород: Изд-во ННГУ. – 2003. – Вып.1(5). – С. 129–141.

[10.02.2005]