

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 621.7: 620.1: 539.3

О единой кривой в механике сверхпластичности

Р. А. Васин, В. К. Бердин, Р. М. Кашаев

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

Проведены серии испытаний титанового сплава ВТ9 при деформировании на растяжение, сжатие, кручение и растяжение с одновременным кручением в условиях температуры 950°C и интенсивности скоростей деформаций $\dot{\xi}_e = 5 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Путем построения зависимостей интенсивность напряжений \sim интенсивность скоростей деформаций установлено, что для сверхпластичного титанового сплава ВТ9 выполняется гипотеза единой кривой для конечных деформаций с приемлемой в инженерной практике точностью.

Введение. Понятие “единая кривая” для случая изотермического деформирования широко используется в теории пластичности. Оно подразумевает независимость деформационной кривой материала, представленной в инвариантной форме, т.е. в виде соотношения между инвариантами девиаторов напряжений и деформаций, от вида напряженного состояния. Так, согласно теории малых упругопластических деформаций [1] (деформационная теория Генки–Ильюшина), при простом нагружении исходно изотропного материала существует единая для всех видов напряженного состояния кривая интенсивность напряжений $\sigma_e \sim$ интенсивность деформаций ε_e . В классической теории течения упрочняющихся материалов единая кривая, представляющая собой зависимость $\sigma_e \sim \varepsilon_e$ или зависимость максимальное касательное напряжение $T \sim$ максимальный сдвиг Γ , определяет вид функции упрочнения и является, по сути, основной материальной функцией математической модели материала.

Экспериментальное установление факта существования единой кривой имеет таким образом большое значение для аттестации (обоснования) некоторых вариантов теории пластичности, в которых понятие о единой кривой “заложено” в формулировку модели. Не менее важна проверка гипотезы единой кривой (ГЕК) и с общетеоретической точки зрения – как выявление некоторой общей закономерности в механическом поведении материалов. Обсуждая вопрос об экспериментальной проверке ГЕК, следует учитывать два обстоятельства. Во-первых, даже в случае малых деформаций запись зависимости между инвариантными характеристиками напряженного и деформированного состояний может быть сделана не единственным образом, т.е. широко используемым в литературе терминам “эквивалентное напряжение”, “эквивалентная деформация” может придаваться различный смысл. Эта проблема значительно усложняется при описании конечных деформаций. Таким образом, возникает задача подбора наиболее подходящих инва-

риантов для использования их в качестве эквивалентного напряжения и эквивалентной деформации при обработке экспериментальных данных. Во-вторых, очевидно, что, какую бы зависимость между эквивалентным напряжением и эквивалентной деформацией не выбрать в качестве единой кривой, она не будет адекватно описывать экспериментальные результаты при произвольном сложном нагружении. Следовательно, существует важная экспериментальная проблема определения области применимости ГЕК – для каких видов нагружения (для каких классов траекторий деформаций, по терминологии А. А. Ильюшина [2]) данная формулировка ГЕК справедлива.

Учет реологических свойств материала приводит к естественному обобщению ГЕК: в пространстве переменных $\sigma_e, \varepsilon_e, \dot{\xi}_e$ ($\dot{\xi}_e$ – интенсивность скоростей деформаций) при постоянном значении температуры существует единая для всех видов напряженного состояния термомеханическая поверхность. Примером такой обобщенной гипотезы является используемое в теории ползучести предположение о существовании термомеханического уравнения состояния [3], которое в инвариантной записи для одноосного случая представляет собой уравнение связи между вторыми инвариантами девиаторов напряжений, деформаций и скоростей деформаций и температурой. Как правило, существование единой поверхности ограничивается некоторыми условиями, например определенным диапазоном деформаций или скоростей деформаций. В случае развитых пластических деформаций и при значительной скоростной чувствительности материала зачастую можно пренебречь деформационным упрочнением; и тогда гипотеза о существовании единой термомеханической поверхности сводится к утверждению о существовании единой зависимости $\sigma_e \sim \dot{\xi}_e$. Именно эта зависимость называется гипотезой единой кривой во многих руководствах по обработке металлов давлением (см., например, широко известный учебник [4]). Особый интерес она представляет для теории сверхпластичности.

В феноменологических исследованиях явления сверхпластичности традиционно акцент делается не на детальном описании диаграмм деформирования ($\sigma \sim \varepsilon$ в одноосном случае), а на анализе скоростной чувствительности сверхпластичных материалов (СПМ) в режиме установившегося течения. В частности, сами диаграммы деформирования зачастую используются только для последующего построения так называемой сигмоидальной кривой сверхпластичности (СП) $\ln \sigma \sim \ln \dot{\xi}$ ($\lg \sigma \sim \lg \dot{\xi}$) и (или) параметра скоростной чувствительности СПМ $m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\xi}}$ как функции $\dot{\xi}$ [5–8].

Предполагается, что эти зависимости строятся для некоторого фиксированного значения деформации ε (из области установившегося течения), но поскольку экспериментально установлено, что величина ε слабо влияет на вид этих зависимостей, условие $\varepsilon = \text{const}$ при обработке экспериментальных данных не всегда соблюдается. Учитывая, что по скоростным зависимостям ($\ln \sigma \sim \ln \dot{\xi}$, $m \sim \ln \dot{\xi}$) СПМ имеется более обширный экспериментальный материал, чем, собственно, по диаграммам деформирования, и что они представляют для специалистов в некотором смысле больший интерес, естественно обсуждать возможность существования единых кривых СП не только в форме

$$F(\sigma_e, \varepsilon_e, \xi_e) = 0, \quad (1)$$

но и (для некоторого диапазона изменения величины ε_e) в виде

$$f(\sigma_e, \xi_e) = 0. \quad (2)$$

Соотношения (1), (2) написаны для случая фиксированной температуры. Они не включают первый инвариант напряжений σ_h , хотя в исследованиях по сверхпластичности известны различные точки зрения на роль σ_h при определении диапазона сверхпластического деформирования [7, 8].

Теоретическая методика построения зависимости вида (2) с учетом конечных деформаций в экспериментах на сплошных цилиндрических образцах изложена ранее [9].

В настоящей работе справедливость ГЭК в форме (2) исследуется экспериментально для частной, но наиболее широко используемой на практике степенной зависимости между σ_e и ξ_e . При обработке экспериментальных данных предполагается, что величина m слабо влияет на результаты вычисления σ_e .

Целью данной работы является исследование гипотезы единой кривой не только при пропорциональном нагружении, но и на двухзвенных траекториях деформации.

Материал и методика испытаний. Исследования проводили на промышленном двухфазном ($\alpha + \beta$)-титановом сплаве ВТ9 (Ti+6,6%Al+3,5%Mo+1,7%Zr+0,27%Si) в состоянии поставки – горячекатаный пруток диаметром 20 мм. При нагреве до температуры 950°C и выдержке в течение 30 мин в сплаве формируется структура с размером зерен α - и β -фаз ~ 2 и ~ 3 мкм в направлении, соответственно перпендикулярном и параллельном прокатке.

Деформирование сплава проводили при четырех видах напряженно-деформированного состояния: растяжение, сжатие, кручение и растяжение с одновременным кручением. При первых трех видах деформации реализуется однокомпонентное (одномерное) напряженное состояние, а при растяжении с одновременным кручением – двухкомпонентное. При растяжении, кручении и растяжении с одновременным кручением использовались одинаковые образцы с диаметром и длиной рабочей части соответственно 10 и 35 мм. В средней части образца, где деформация практически однородна, двумя рисками отмечали расчетную длину. Для учета неравномерности удлинения по длине образца определяли приведенную начальную длину образца по формуле

$$L_0 = \frac{\Delta L_k l_0}{l_k - l_0},$$

где l_0, l_k – начальная и конечная расчетная длина; ΔL_k – абсолютное удлинение образца по окончании деформации (расстояние между головками образца). При кручении приведенную начальную длину находили по формуле

$$L_0 = \frac{\varphi \cdot l_0}{\psi},$$

где ψ – угол поворота, ограничивающий расчетную длину l_0 поперечных сечений образца относительно друг друга. При сжатии применяли цилиндрические образцы диаметром также 10 мм и высотой 15 мм, которые изготавливали с цилиндрическими торцовыми выточками, заполняемыми перед деформацией стеклосмазкой ЭВТ-25.

Испытания были проведены со скачкообразным изменением скорости деформирования по двухзвенным траекториям деформаций в условиях сложного нагружения.

Скорости изменяли таким образом, чтобы скорость деформации на каждой ступени отличалась примерно в 2 и 2,5 раза от таковой на предыдущей ступени. При растяжении с одновременным кручением образец деформировали так, чтобы на каждой ступени выполнялись условия:

$$\frac{V}{L} = \frac{\omega R}{\sqrt{3} L},$$

где V – осевая скорость деформирования; ω – скорость кручения, L и R – соответственно текущая длина и текущий радиус образца. В этом случае кинематический параметр $q = \frac{\omega R}{\sqrt{3} V}$, характеризующий соотношение между

сдвиговой и осевой составляющими скорости деформации на поверхности образца, равен единице.

Испытание на сложное нагружение предполагает непрерывное исполнение траектории деформации, в том числе с точкой излома. Однако практически невозможно мгновенное переключение компонент деформации, тем более с одной и той же величиной интенсивности скорости деформации. При высокотемпературных испытаниях задержка в отработке программы в точке излома приводит к сильному снижению напряжений за счет релаксации. Это может дать неправильную информацию о тонких локальных свойствах материала, например, о следе запаздывания. Поскольку изучение локальных свойств при сложном нагружении не являлось целью, включение второй компоненты скорости деформации проводили после ступенчатого снижения первой компоненты до нуля. Испытания осуществляли по двухзвенным траекториям деформаций с изломом на 90° . Образец № 1: первое звено – растяжение, второе звено – кручение; образец № 2: первое звено – кручение, второе звено – растяжение. Кроме того, было проведено испытание на простое нагружение образца № 3: первое звено – кручение, второе звено – повторное кручение. Программа деформирования для каждого звена была одинаковой и состояла из двух этапов: первый этап – деформирование с постоянной интенсивностью скоростей деформации $\xi_e = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ до накопленной степени деформации $e \approx 0,15$ (при растяжении постоянство интенсивности скорости деформации на первом этапе было обеспечено

путем автоматической коррекции осевой скорости деформирования пропорционально текущей длине образца); второй этап – деформирование со ступенчатым снижением скорости деформирования, соответствующей интенсивностям скоростей деформации на поверхности образца $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, $1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

Все испытания проводили на специальном автоматизированном комплексе на базе машины СНТ-10БД и системы Iotech [10]. Температура испытаний составляла $(950 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Параметры испытания регистрировали в цифровом виде. В процессе испытания в каждый момент времени регистрировали следующие параметры: текущее время t , абсолютное удлинение ΔL или укорочение ΔH , угол закручивания φ , осевое усилие P , крутящий момент M . Количество записей в минуту – от 6 до 220. Полученные данные обрабатывали с помощью программного пакета “Microsoft Excel”. Перед обработкой зарегистрированных параметров уточняли приведенную начальную длину образца.

Накопленную деформацию e и интенсивность напряжений σ_e при одноосном растяжении, сжатии, кручении и одновременном растяжении с кручением для точек на поверхности образца рассчитывали соответственно по следующим формулам:

$$e_1 = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right); \quad (3.1) \quad \sigma_{e1} = \frac{P_1}{\pi R^2}; \quad (3.2)$$

$$e_2 = \ln\left(\frac{H_0}{H}\right); \quad (4.1) \quad \sigma_{e2} = \frac{P_2}{\pi R^2}; \quad (4.2)$$

$$e_3 = \frac{\varphi R}{\sqrt{3} L_0}; \quad (5.1) \quad \sigma_{e3} = \frac{\sqrt{3} M_3 (3+m)}{2\pi R^3}; \quad (5.2)$$

$$e_4 = \int_0^t \xi_e dt; \quad (6.1) \quad \sigma_{e4} = \frac{P_4 (m+1) q^2 (1+q^2)^{m/2}}{2\pi R^2 [(1+q^2)^{(m+1)/2} - 1]} \quad (6.2)$$

и (или)

$$\sigma_{e4} = \frac{\sqrt{3} M_4 (m+3)(m+1)q^3(1+q^2)^{m/2}}{2\pi R^3 [(m+1)(1+q^2)^{(m+3)/2} - (m+3)(1+q^2)^{(m+1)/2} + 2]}, \quad (6.3)$$

где L_0 и $L = L_0 + \Delta L$ – соответственно приведенная начальная и текущая длина образца; H_0 и $H = H_0 - \Delta H$ – соответственно начальная и текущая высота образца при сжатии; $R = R_0 \sqrt{L_0/L}$ – текущий радиус образца; ξ_e – интенсивность скоростей деформации при одновременном растяжении с кручением.

Формулы (3.1)–(6.1) хорошо известны, а формулы (6.2) и (6.3) являются обобщением формул (3.2) и (5.2) для процесса растяжения с одновременным кручением [11].

В формуле (5.2) коэффициент скоростного упрочнения m на каждой ступени по скорости кручения, учитывающий неравномерность скорости деформации по сечению сплошного образца, определяли по выражению

$$m = \frac{\ln(M_1/M_2)}{\ln(\omega_1/\omega_2)},$$

где M_1 и ω_1 – соответственно крутящий момент и скорость кручения на этой ступени; M_2 и ω_2 – то же на соседней ступени, причем $\omega_1 > \omega_2$. При кручении цилиндрического образца основной вклад в сопротивление пластической деформации вносят его периферийные слои, где диапазон изменения скорости сдвига достаточно узкий и внутри которого с достаточной степенью точности можно считать m постоянным. Следует заметить, что в случае растяжения с кручением при $q = 1$ влияние коэффициента m на σ_e незначительное, т.е. значимость m в точности определения σ_e несущественна [11].

Анализ результатов испытаний. Влияние вида деформирования на кривые ($\sigma_e \sim \xi_e$). Для получения сравнимых результатов при всех видах деформирования испытания проводили методом переключения скорости деформирования (рис. 1). На рис. 2 представлены зависимости $\sigma_e \sim \xi_e$ в логарифмических координатах, построенные на основе диаграмм (рис. 1) для разных видов деформаций. Каждое значение σ_e взято непосредственно перед переключением скорости деформирования и соответствует установившемуся течению для $e = (0,15 \dots 0,5)$. Статистическую ошибку оценивали по результатам испытаний шести образцов на сжатие с переключением скоростей деформирования. Среднее квадратическое отклонение напряжений течения от среднеарифметического значения в зависимости от скорости деформации составило от 5 до 13%. Как видно, при однонаправленном формоизменении степень несовпадения экспериментальных точек $\sigma_e \sim \xi_e$ при разных видах деформации находится в рамках разброса эксперимента.

Проверка формулировки гипотезы единой кривой в виде степенной зависимости σ_e от ξ_e . Для описания сверхпластичности, как правило, используется эмпирическое уравнение связи $\sigma_e \sim \xi_e$ степенного вида:

$$\sigma_e = \sigma_0 \left(\frac{\xi_e}{\xi_0} \right)^m, \quad (7)$$

где σ_0 – напряжение течения при скорости деформации ξ_0 ; m – коэффициент скоростного упрочнения, который принимается постоянным. Аппроксимируя сигмаидальные кривые (рис. 2) в диапазоне $\xi_e = (5 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-2}) \text{ с}^{-1}$ и задавая значение $\xi_0 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, получаем из различных экспериментов значения констант в определяющем соотношении (7), которые приведены в таблице.

Экспериментальные значения констант σ_0 и m

Вид деформирования	ξ_0, c^{-1}	$\sigma_0, \text{МПа}$	m
Растяжение	$2 \cdot 10^{-3}$	17,6	0,56
Сжатие	$2 \cdot 10^{-3}$	17,1	0,56
Кручение	$2 \cdot 10^{-3}$	17,1	0,57
Растяжение с кручением	$2 \cdot 10^{-3}$	18,6	0,52

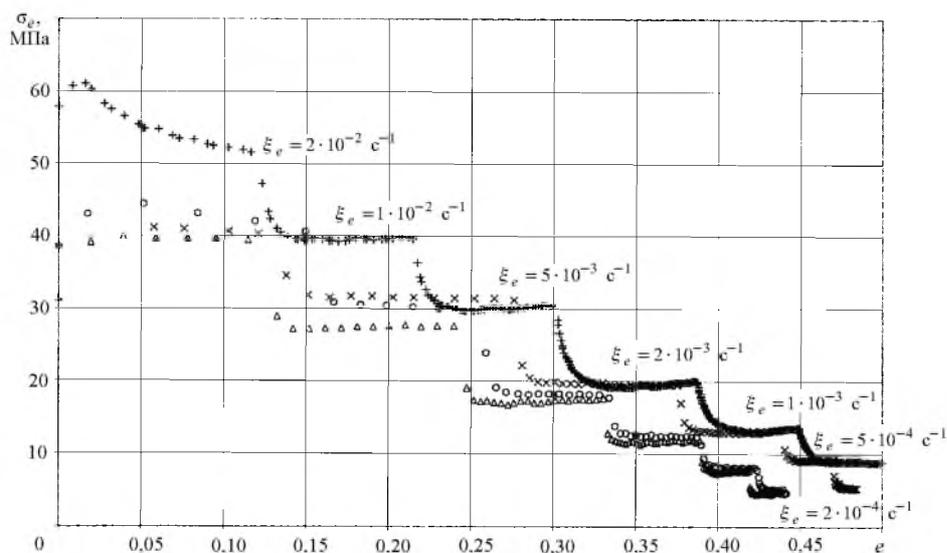


Рис. 1. Диаграммы деформирования со ступенчатым изменением скорости деформирования: \circ – растяжение; $+$ – сжатие; \times – растяжение с кручением; Δ – кручение.

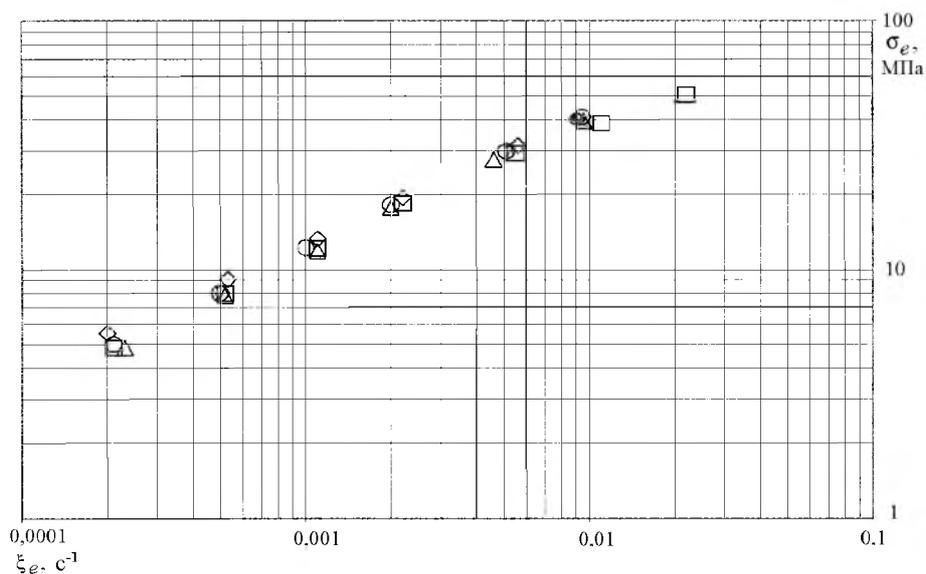


Рис. 2. Влияние вида деформирования на зависимость $\sigma_e \sim \xi_e$: \circ – растяжение; \diamond – растяжение с кручением; \square сжатие; Δ кручение.

Видно, что экспериментальные данные удовлетворительно описываются уравнением связи степенного вида (7). Запись связи $\sigma_e \sim \xi_e$ в безразмерном виде (7) позволяет устойчиво определять константы материала; в то же время при использовании уравнения $\sigma_e = K\xi_e^m$ разброс определяемых из эксперимента значений константы K достигает 30%.

Эксперименты по двухзвенным траекториям деформаций. На рис. 3 представлены диаграммы деформирования образцов в условиях сложного нагружения: переход от растяжения к кручению; переход от кручения к растяжению, а также повторное кручение после предварительного кручения. Видно, что диаграмма деформирования, а также зависимость интенсивности напряжений и параметра скоростной чувствительности от интенсивности скорости деформации практически не зависят от вида деформирования. Сравнение же зависимости величины m ($m = \ln(\sigma_e^I / \sigma_e^{II}) / \ln(\xi_e^I / \xi_e^{II})$, где интенсивностям скоростей деформации на соседних ступенях ξ_e^I и ξ_e^{II} соответствуют интенсивности напряжений σ_e^I и σ_e^{II} перед переключением скорости деформирования (в конце ступени)), от интенсивности скорости деформации для первого и второго звена (рис. 4) свидетельствует о некотором снижении максимального значения m и о его смещении в сторону меньших скоростей деформации с увеличением накопленной степени деформации при переходе от первого звена ко второму для всех трех испытаний, что согласуется с известным влиянием степени деформации на изменение m . Следует заметить, что при растяжении после предварительного кручения напряжение течения несколько снижается. Это связано, по-видимому, с формированием неоднородной структуры по сечению образца при предварительном кручении.

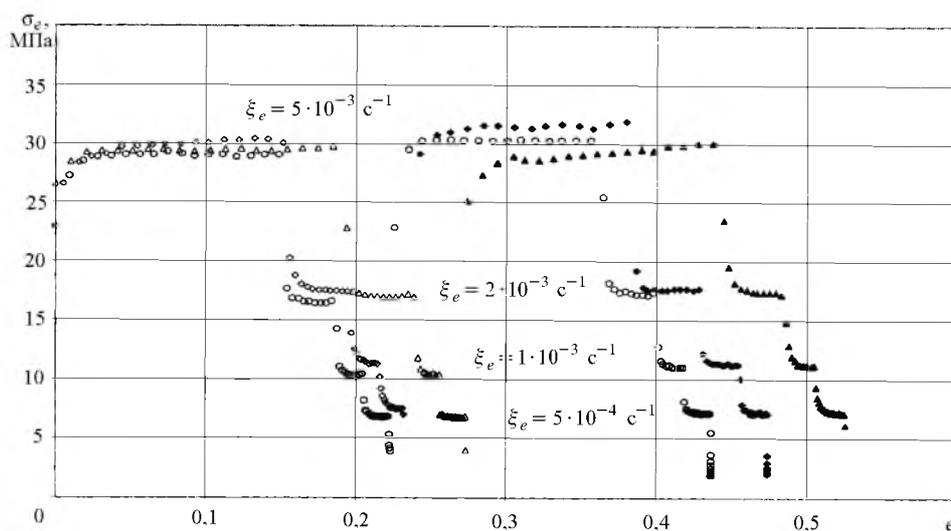


Рис. 3. Диаграммы деформирования образцов, испытанных по двухзвенным траекториям деформаций: \diamond – образец № 1, растяжение; \blacklozenge – образец № 1, кручение; \triangle – образец № 2, кручение; \blacktriangle – образец № 2, растяжение; \circ – образец № 3, кручение.

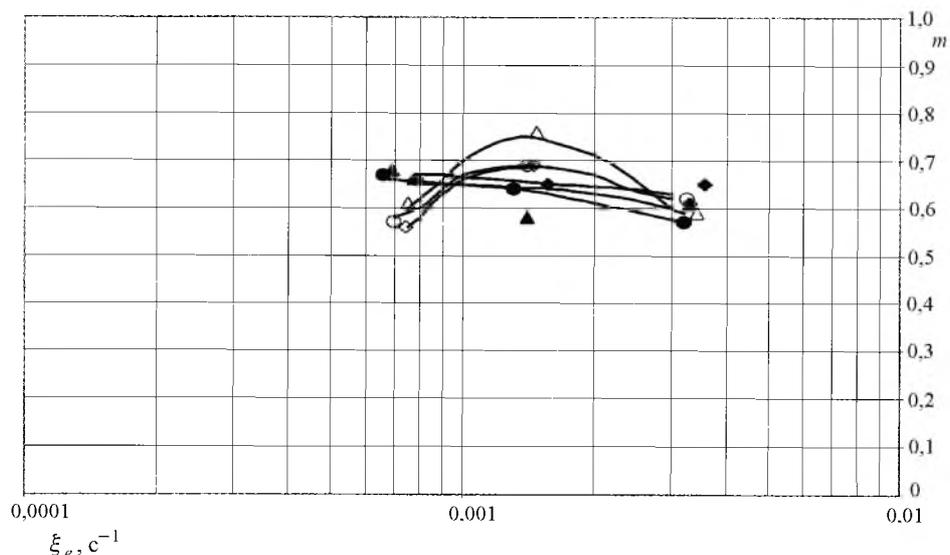


Рис. 4. Изменение коэффициента скорости чувствительности m в зависимости от интенсивности скорости деформации ξ_e при испытании по двухзвенным траекториям деформаций (1-е звено: \diamond – образец № 1, растяжение; \triangle – образец № 2, кручение; \circ – образец № 3, кручение; 2-е звено: \blacklozenge – образец № 1, кручение; \blacktriangle – образец № 2, растяжение; \bullet – образец № 3, кручение).

Таким образом, полученные данные позволяют заключить, что для сверхпластичного титанового сплава ВТ9 в исследованном скоростном интервале вид деформации оказывает слабое влияние на зависимость $\sigma_e \sim \xi_e$. Отметим, что эти результаты носят предварительный характер и требуют проведения дальнейших систематических исследований, направленных на повышение надежности построения единой кривой и выявление области применимости ГЕК как по набору аргументов в уравнении (2), например, необходимо ли включать первый инвариант напряжений σ_h , так и по набору траекторий деформаций (видов нагружения), для которых эта формулировка пригодна.

Резюме

Проведено серії випробувань титанового сплаву ВТ9 при деформуванні на розтяг, стиск, кручення і розтяг з одночасним крученням за температури 950°C й інтенсивності швидкостей деформацій $\xi_e = 5 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Шляхом побудови залежностей інтенсивність напружень \sim інтенсивність швидкостей деформацій встановлено, що для надпластичного титанового сплаву ВТ9 виконується гіпотеза єдиної кривої для скінченних деформацій з прийнятною в інженерній практиці точністю.

1. Ильюшин А. А. Пластичность. Ч. 1. Теория малых упруго-пластических деформаций. – М.: ГИТТЛ, 1948. – 300 с.

2. *Ильюшин А. А.* Пластичность. Основы общей математической теории. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 271 с.
3. *Работнов Ю. Н.* Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
4. *Колмогоров В. Л.* Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
5. *Кайбышев О. А.* Пластичность и сверхпластичность металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 280 с.
6. *Кайбышев О. А.* Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.
7. *Смирнов О. М.* Обработка металлов в состоянии сверхпластичности. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.
8. *Radmanabhan K. A. and Davies G. J.* Superplasticity. – Berlin: Springer-Verlag, 1980. – 314 p.
9. *Васин Р. А., Филиппов О. Г.* О зависимости напряжения от скорости деформации у сверхпластических материалов // Пробл. прочности. – 2000. – № 4. – С. 2 – 11.
10. *Кайбышев О. А., Васин Р. А., Бердин В. К., Кашаев Р. М.* Установка для изучения больших пластических деформаций материалов в условиях сложного нагружения // Кузнеч.-штамп. пр-во. – 1999. – № 4. – С. 8 – 11.
11. *Бердин В. К., Кашаев Р. М.* Об определении напряженного состояния при растяжении с кручением сплошного цилиндра // Пробл. прочности. – 2001. – № 1. – С. 28 – 37.

Поступила 13. 04. 2001