

6. Косевич А. Н., Танатаров Л. В. Пластическая деформация и необратимые изменения в твердом теле при локальном плавлении. — ПММ, 1960, т. 24, № 5, с. 843.
7. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М., Гостехтеориздат, 1966.
8. Механические свойства материалов при повышенных температурах. М., «Металлургия», 1965.

УДК 539.374

### СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЖАТИИ

*В. И. Кунеев, Я. И. Рудаев,  
А. Г. Попов, Н. В. Жданов*

*(Фрунзе)*

Явление сверхпластичности изучалось в работах [1—3].

Основные феноменологические признаки наличия эффекта сверхпластичности при растяжении можно сформулировать в виде следующих положений [4]: 1) однородный процесс деформирования; 2) чрезвычайно высокие показатели относительного удлинения; 3) большая чувствительность к скорости деформирования; 4) малые значения напряжений при деформировании; 5) малая скорость деформирования; 6) интенсивный рост деформации в определенных интервалах температур.

Первая попытка сформулировать подобные признаки имеется в работе [5]. Указанная формулировка включает положения 2), 6), а также требование отсутствия зоны локальной деформации в образцах. Отсутствие шейки необязательно сопутствует эффекту сверхпластичности [6]. Ее возникновение можно объяснить появлением температурного градиента после накопления достаточно больших деформаций.

подавляющее большинство результатов получено при изучении эффекта сверхпластичности на малопрочных материалах. Относительно малое количество работ [7 — 9] посвящено обнаружению и изучению сверхпластичности в сталях. До недавнего времени исследованием поведения материалов в условиях сверхпластичности занимались физики и металловеды.

Попытка применить методы механики сплошной среды к теоретическому описанию макроскопического поведения материалов при сверхпластической деформации сделана в работе [2].

Другая попытка имеется в работе [10], где аналитически сформулировано условие существования однородной деформации растяжения при сверхпластичности. Нарушение указанного условия приводит к образованию шейки. Здесь же высказывается мысль о необходимости изучения эффекта сверхпластичности не только при растяжении, но и при других схемах напряженного состояния (чистый сдвиг, двусное растяжение, одноосное сжатие).

Благодаря тому, что макроскопический характер поведения материалов в условиях сверхпластичности известен, появилась перспектива практического использования этого явления. Считается, что почти все металлические материалы рассматриваются как потенциально сверхпластичные.

При достаточном количестве сведений об указанных явлениях при растяжении применение эффекта сверхпластичности при сжатии носит пока потенциальный характер. Последнее, по-видимому, связано как со сложностью осуществления одноосного сжатия в условиях сверхпластичности, так и с недостаточным объемом сведений по проявлению свойства сверхпластичности при сжатии.

Испытаниям сталей У8А, 5ХНМ, 12ХНЗА в диапазоне температур фазового перехода предшествовали обычные механические испытания на сжатие. В этих опытах использовались образцы, форма и размеры которых представлены на фиг. 1, а.

Диаграмма зависимости сжимающего усилия  $P$  от укорочения образца  $\Delta h$  записывалась с помощью электронного аппарата, разработанного на базе тензометра МКе.

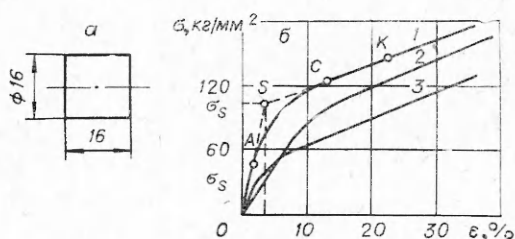
По данным испытаний для каждой стали строились усредненные диаграммы  $\sigma \sim \varepsilon$  ( $\sigma = P/F$ ), где  $F$  — первоначальная площадь сечения образца;  $\varepsilon = \Delta h/h$ . Диаграммы представлены на фиг. 1, б, где кривая 1 соответствует стали 5ХНМ; 2 — У8А, 3 — 12ХНЗА. За предел текучести  $\sigma_S$  принималась величина напряжения в точке пересечения двух линий, аппроксимирующих упругий участок  $OA$  и прямолинейный отрезок диаграммы  $CK$  за пределом упругости. Определенные указанным способом пределы текучести  $\sigma_S$  и модули Юнга  $E$  сталей даны в табл. 1.

Для изучения изменения формы и микроструктуры образцов в процессе деформирования образцы подвергались различной степени обжатия от  $\varepsilon = 5\%$  до  $\varepsilon = 40-50\%$ .

Из-за трения между плитами пресса ЦД-40 и торцами образцов последние принимали форму бочки.

Рассмотрим особенности одноосного сжатия при повышенных температурах. Для изучения сверхпластичности сталей при сжатии машины на ползучесть ZST — 2/3 были оборудованы специальными реверс-захватами, преобразующими растягивающие усилия в усилия сжатия. Деформирование образцов в реверс-захватах происходило с незначительным градиентом температур ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ).

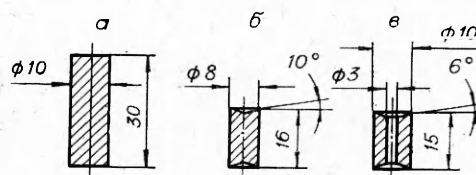
При повышенных температурах испытывались образцы различных размеров и форм, показанных на фиг. 2. Испытания образцов велись по двум программам. По условию первой программы к образцам прикладывались усилия, значения которых взяты из табл. 2, где  $\bar{P}_S = \sigma_S F$ . После нагружения образцы нагревались. Сжатие образцов прекращалось по достижении ими относительного укорочения  $\varepsilon = 65-70\%$ .



Фиг. 1

Таблица 1

Марка стали	$\sigma_S$ , кг/мм <sup>2</sup>	$E$ , кг/мм <sup>2</sup>
У8А	82	$3,5 \cdot 10^3$
5ХНМ	119	$2,9 \cdot 10^3$
12ХНЗА	34	$2,8 \cdot 10^3$



Фиг. 2

Таблица 2

Номер образца	Нагрузка на образец в долях $P_S$
1	0,4
2	0,3
3	0,2
4	0,09
5	0,08
6	0,07
7	0,06
8	0,05

Если при этом образец попадал в область фазовых превращений, то его температура изменялась циклически с перекрытием границ области. Постоянство напряжений сжатия в данном случае обеспечивалось путем догружения образцов на нижней границе каждого цикла, начиная со второго.

Результаты выполнения первой программы экспериментов представлены на фиг. 3, *a—в*, где показаны кривые зависимости укорочения  $\varepsilon$  от температуры  $T$  соответственно для сталей У8А, 5ХНМ, 12ХНЗА при различных значениях напряжений  $\sigma$  (кривая 1 соответствует  $\sigma=0,4\sigma_S$ ; 2— $\sigma=0,3\sigma_S$ ; 3— $\sigma=0,09\sigma_S$ ; 4— $\sigma=0,07-0,08\sigma_S$ ).

В ряде опытов образцы из перечисленных материалов подвергались сжатию ( $\sigma=0,07\sigma_S$ ) с циклическим изменением температур за верхней границей фазовых превращений.

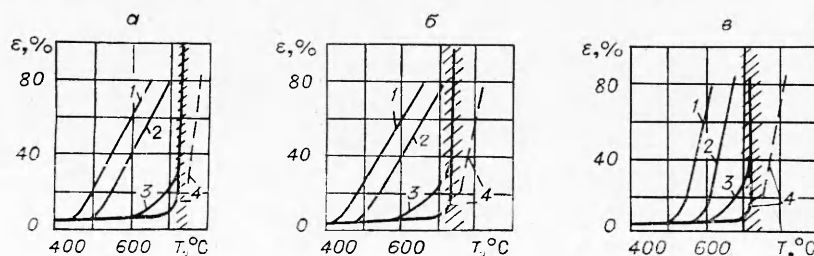
Во второй программе экспериментов образцы получали в области температур фазового перехода деформации  $\varepsilon_1=15\%$ ,  $\varepsilon_2=30\%$ ,  $\varepsilon_3=45\%$ ,  $\varepsilon_4=60\%$ ,  $\varepsilon_5=75\%$  при напряжениях  $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=\sigma_4=\sigma_S=0,08\sigma_S$ . Структура образцов после деформирования исследовалась на микроскопе МИМ-9.

Как показали проведенные эксперименты, рост пластических деформаций прекращается уже на втором цикле из-за увеличения площади сечения образцов. В целях обеспечения укорочения  $\varepsilon$  к образцам прикладывалась дополнительная нагрузка  $\Delta P$  на нижней границе циклов, начиная со второго. Величина  $\Delta P$  рассчитывалась из условия постоянства напряжений.

Таким образом, напряжение сжатия, отнесенное к первоначальной площади сечения образца, в ходе опыта увеличивается от 0,07 до  $0,15\sigma_S$ , однако истинные напряжения оставались постоянными и равными  $0,07-0,08\sigma_S$ . Если сопоставить накопление аномальных деформаций при растяжении с аналогичным процессом при сжатии, то можно заметить, что циклическое изменение температур в границах фазового перехода способствует непрерывному росту деформаций в растягиваемых образцах от цикла к циклу в отличие от сжатия.

В образцах, подвергнутых растяжению, отмечалось появление максимальных деформаций под действием напряжений, названных оптимальными [11].

По аналогии оптимальными для сжатия назовем величины наименьших напряжений, вызывающих деформацию образца со скоростью 0,5 мм/мин. На фиг. 3, *a—в* диапазон оптимальных напряжений сжатия выделен штрихом. Диапазон имеет границы  $0,07\sigma_S \leq \sigma_0 \leq 0,08\sigma_S$  ( $\sigma_0$ —



Фиг. 3

оптимальное напряжение), в то время как при растяжении оптимальные напряжения находились в пределах  $0,05\sigma_s \leq \sigma_0 \leq 0,07\sigma_s$ .

Следовательно, сверхпластичность сжимаемых образцов наблюдается под действием более высоких напряжений, чем при растяжении. В специальных опытах за верхней границей фазовых превращений обнаружено уменьшение скорости деформирования образцов по сравнению со скоростью деформирования в области фазового перехода.

Указанное обстоятельство отражено прерывистой линией на фиг. 3, а — в.

Накопление аномальных деформаций сопровождалось изменениями формы и структуры образцов. С увеличением деформации до  $\epsilon=15-20\%$  образцы принимали форму двойной бочки, которая затем переходила в одинарную.

С ростом аномальных деформаций зерна микроструктуры материала, незначительно уменьшаясь в размерах, ориентировались вдоль оси образца. Заметим, что в обычных испытаниях зерна структуры располагались по образующим бочки.

Поступила 14 V 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бочвар А. А., Свидерская З. А. Сверхпластичность некоторых сталей при сжатии.—«Изв. АН СССР. ОТН», 1945, № 9, с. 241.
2. Рагаб А. Р., Дж. Л. Дункан. Сверхпластичность; определяющие уравнения и проблемы формоизменения.—Сб. пер. Механика, 1969.
3. Pearson O. E.—«J. Metals», 1974, N 54.
4. Кунеев В. И., Рудаев Я. И., Попов А. Г. О сверхползучести сталей при фазовых превращениях.—«Труды ФПИ. Расчет на прочность», 1974, вып. 65.
5. Старикова Г. В. Исследование явления сверхпластичности в металлических сплавах. Автореферат дис. на соискан. учен. степени канд. техн. наук. Ин-т металлургии и обогащения. АН КазССР, Алма-Ата, 1963.
6. Кунеев В. И., Рудаев Я. И., Попов А. Г. Аномальная ползучесть некоторых сталей при повышенных температурах. Изд-во АН КиргССР, 1974.
7. Тихонов А. С. Элементы физико-химической теории деформируемости сплавов. М., «Наука», 1973.
8. Охрименко Я. М., Смирнов О. М., Сурмач Л. В. О возможности количественной оценки состояния сверхпластичности.—«Физика и химия обработки материалов». 1971, № 6.
9. Охрименко Я. М., Смирнов О. М. Методика совместного исследования процессов деформирования и фазового превращения стали и сплавов.—«Физика и химия обработки материалов», 1967, № 3.
10. Шоршоров М. Х., Тихонов А. С. и др. Сверхпластичность металлических материалов. М., «Наука», 1973.
11. Кунеев В. И., Рудаев Я. И., Попов А. Г. Исследование сверхпластичности сталей У8А, 5ХНМ, 12ХНЗА при растяжении в диапазоне температур  $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ -перехода. Отчет по х/теме 52/72 ВИНТИ. Фрунзе, 1974.