

## ЭФФЕКТЫ ПРОЯВЛЕНИЯ КРАТКОВРЕМЕННОГО РАЗУПРОЧНЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ РЕЗКИХ СМЕН В РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ

Чаусов Н. Г., Пилипенко А. П., Параца В. Н.

*Национальный аграрный университет,  
Киев, Украина*

### Введение

Классические представления о деформировании материалов при растяжении с учетом влияния скорости нагружения указывают на то, что превалирует возрастание сопротивления деформированию с ростом скорости деформации (при отсутствии фазовых превращений) в результате роста вязкой составляющей сопротивления и уменьшения времени для развития процессов ее релаксации [1].

Однако опыты по влиянию резких смен в режиме нагружения на процессы деформирования пластичных материалов, проведенные на кафедре сопротивления материалов Национального аграрного университета Украины, показали, что вышеуказанные особенности деформирования материалов с учетом влияния скорости нагружения проявляются лишь тогда, когда энергия удара свободно передается на исследуемый образец материала. В случае же, когда закон нарастания деформации более сложный, например, когда в процессе резкого нарастания скорости деформации осуществляется однократное или многократное замедление процесса высокоскоростного деформирования, то поведение материала при резких сменах в режиме нагружения может стать «аномальным». Эта «аномальность» проявляется в том, что за счет резких смен в режиме нагружения реализуется кратковременное разупрочнение материалов практически на любой стадии деформирования, включая и восходящую ветвь стандартной статической диаграммы деформирования [2, 3]. Естественно, что такие сложные режимы нагружения отражаются, в первую очередь, на механических свойствах материалов. В процессе «аномального» разупрочнения резко перестраивается структура материала, и поэтому при повторном статическом растяжении механические свойства материала могут существенно отличаться от механических свойств материалов, полученных на тех же стадиях при «чистом» статическом растяжении.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что время выдержки после резких смен в режиме нагружения и полной разгрузки образцов также существенно влияет на изменение механических свойств материалов при повторном статическом растяжении.

### Методика испытаний и результаты эксперимента

Испытания пластичных материалов проводили в составе механической системы, которая представляет собой простейшую статически неопределимую конструкцию в виде одновременно нагружаемых параллельных элементов.

Центральный элемент такой конструкции включает захваты со сферическими опорами, тензодинамометр и образец исследуемого материала. Симметричные боковые элементы включают по две одинаковые штанги, одна из которых используется в качестве тензодинамометра, и образцы-спутники из закаленной стали 65Г разного минимального диаметра. При нагружении описанной конструкции, при заданной деформации (силе) на образце образцы-спутники разрушаются, и происходит импульсная подгрузка образца. В данном случае именно свойства нагружающей системы определяют скорость деформации материала при динамическом перераспределении напряжений, вызванных разрушением образцов-спутников.

Указанный вид испытаний реализован на базе испытательной гидравлической машины ZD-100Pc, отличительной особенностью которой является массивная подвижная траверса (масса составляет 1350 кг).

Как оказалось, данная конструктивная особенность машины может сыграть исключительно важную роль для задания закона повышения скорости деформации при резких сменах в режиме нагружения. Практически реализована методика испытаний, при которой на участке резкого нарастания скорости деформации осуществляется мгновенное замедление процесса деформирования пластичного материала, в первую очередь, за счет инерционности подвижной траверсы. В результате такой процедуры резко меняется баланс энергии в процессе высокоскоростного деформирования материала, и значительная часть кинетической энергии, освобождающейся в процессе разрушения образцов-спутников, диссипирует в исследуемом материале, преобразовываясь в тепло и вызывая существенные структурные изменения, которые сопровождаются "аномальным" разупрочнением на всех стадиях деформирования.

Разработанная установка оснащена компьютеризированной измерительной системой для проведения и обработки результатов испытаний, которая позволяет фиксировать до 2400 измерений за секунду.

Типичные картины динамического перераспределения нагрузок в системе при испытаниях представлены на рис. 1.

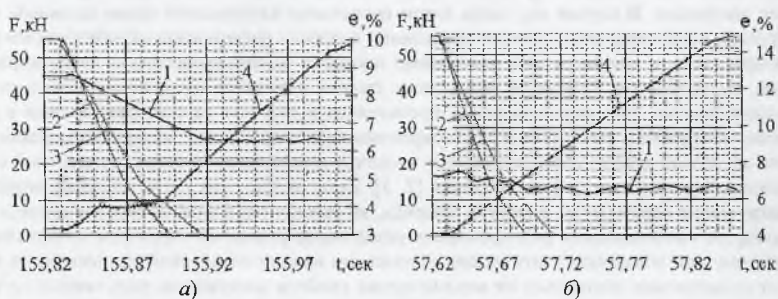


Рис. 1. Динамика перераспределения нагрузок в системе и рост деформации материалов при резких сменах в режиме нагружения: *а* – сталь, *б* – армо-железо; 1 – нагрузка на образце, 2,3 – нагрузка на образцах-спутниках, 4 – деформация материала основного образца

На рис. 2. представлены результаты испытаний ряда материалов при сложном режиме нагружения (статическое растяжение – резкое повышение скорости деформации – статическое растяжение). Испытания проводили на стандартных цилиндрических образцах диаметром 8 мм.

Анализ результатов показывает, что в процессе резких смен в режиме нагружения на восходящей ветви стандартной статической диаграммы деформирования фиксируется кратковременное разупрочнение материалов, аналогичные эффекты разупрочнения зафиксированы и на ниспадающей ветви диаграммы [2].

Опыты проведенные на плоских образцах (рис. 3) также подтверждают наличие вышеупомянутого эффекта, причем, следует отметить, что при таких процессах деформирования материал может приобретать новые свойства, в частности, могут усиливаться показатели сверхпластичной деформации (см. участок *AB* на рис. 3).

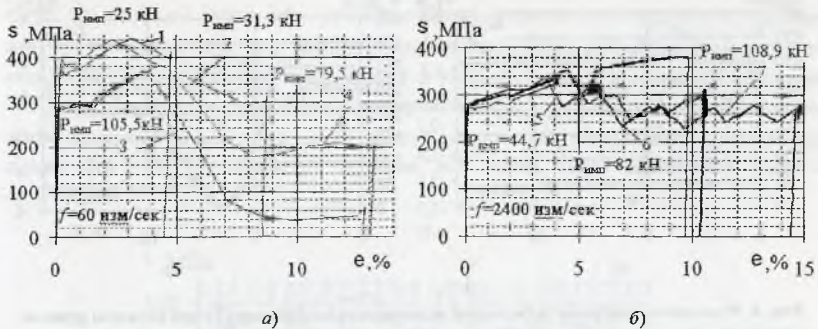


Рис. 2. Фрагменты диаграмм деформации исследованных материалов с учетом влияния резких смен в режиме нагружения: а – малоуглеродистые стали 10 (кривые 1,2), 20 (кривые 3,4), б – армо-железо (кривые 5,6,7).

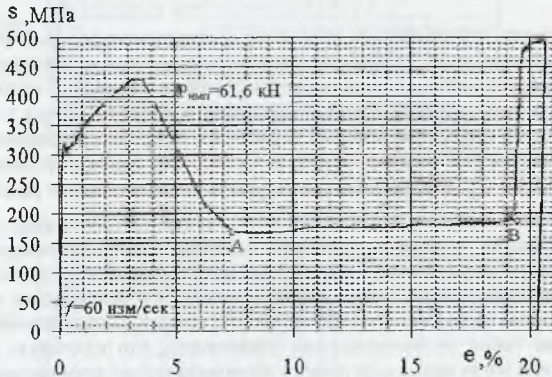


Рис. 3. Фрагмент диаграммы деформации малоуглеродистой стали 3 с учетом влияния резких смен в режиме нагружения

На макроscopicком уровне процессы «аномального» разупрочнения связаны с изменением плотности материала. Так, весьма полезным оказалось использование феноменологической модели накопления повреждений металлов, в соответствии с которой поврежденность (разрыхление)  $\epsilon_p$  связана с деформацией  $\epsilon$  соотношением [4]:

$$\epsilon_p = [1 - 2\mu(\epsilon)] \cdot \epsilon, \quad (1)$$

здесь  $\mu(\epsilon)$  текущее значение коэффициента поперечной деформации.

На рис. 4 для иллюстрации приведены диаграммы деформаций исследуемых материалов с наложением кривых, которые в соответствии с (1) характеризуют накопление повреждений в процессе сложного режима нагружения (статическое растяжение – резкое повышение скорости деформации).



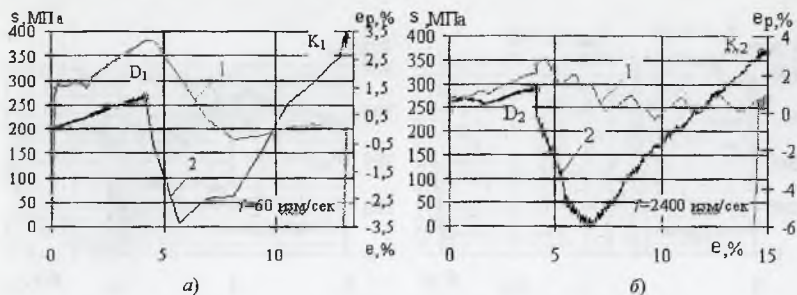


Рис. 4. Фрагменты диаграмм деформаций испытанных материалов (1) при сложном режиме нагружения с наложением кривых (2), которые характеризуют процесс накопления повреждений: а – малоуглеродистая сталь 10 (поз. 4 рис. 2, а); б – армо-железо (поз. 3 рис. 2, б)

Очень важно, что описанным процессом кратковременного разупрочнения можно управлять. Действительно, увеличивая импульс воздействия на исследуемый материал (за счет увеличения минимального диаметра образцов-спутников) можно добиться заданного увеличения глубины скачка напряжений и ширины скачка деформаций (см. рис. 3). В качестве параметра, который характеризует процесс деформирования в процессе резких смен в режиме нагружения, целесообразно принять среднее значение скорости деформации  $\dot{\epsilon}_{cp}$ . Введение же процедуры последовательного резкого повышения среднего значения скорости деформации пластичного материала при одном и том же уровне деформации материала позволяет установить количественные зависимости кратковременного разупрочнения пластичных материалов разных классов в зависимости от соотношения средних скоростей деформации, что реализуются в процессе резких смен в режиме нагружения, по сравнению с статическим растяжением.

Авторами также экспериментально установлено, что ключевую роль при этом сложном режиме нагружения пластичного материала играет время процесса, а именно, скорость нарастания процесса перехода от одной скорости деформации материала к другой. Время процесса резких смен в режиме нагружения зафиксировано в проведенных опытах в диапазоне  $\tau = 0,1 \dots 1,1$  сек, а средние скорости деформации при таких сменах в диапазоне  $\dot{\epsilon}_{cp}^{смен} = 1 \dots 100\%$ .

Проведенные эксперименты на разных материалах: стали Ст 3, 10, 20, ВНС-25, 12Х2МФА, нержавеющая, армо-железо, техническая медь, алюминиевый сплав Д16, титановый сплав ВТ12 показали, что при скоростях деформаций  $\dot{\epsilon}_{cp}^{смен} < 1\%/сек$  исследуемые эффекты кратковременного разупрочнения пластических материалов незначительны или совсем не проявляются, а при увеличении скорости деформации  $\dot{\epsilon}_{cp}^{смен}$  выше 100% приводит к практически полному разделению образцов из пластичных материалов на части при всех заданных уровнях деформаций.

На рис. 5 представлены результаты испытания алюминиевого сплава Д16 и технической меди.

Экспериментально установлено, что для каждого пластичного материала действительно существует критическая скорость деформации  $\dot{\epsilon}_{cp, крит}^{смен}$ , при которой образец материала в процессе резких смен в режиме нагружения практически разделяется на две

части, т.е.  $\Delta\sigma/\sigma_i = 1$  (здесь  $\Delta\sigma$  – уровень падения сопротивления материала деформированию в напряжениях,  $\sigma_i$  – текущее значение напряжения, при котором осуществляется резкая смена в режиме нагружения) и уровень падения напряжений достигает 100%. Средняя критическая скорость деформации  $\dot{\epsilon}_{кр, крит}^{смин}$  для каждого материала и каждого заданного уровня деформаций имеет свое значение, в проведенных опытах для сплава Д16 –  $\dot{\epsilon}_{кр, крит}^{смин}$  достигает значения 36,6 %/сек, а для технической меди – 50,3 %/сек.

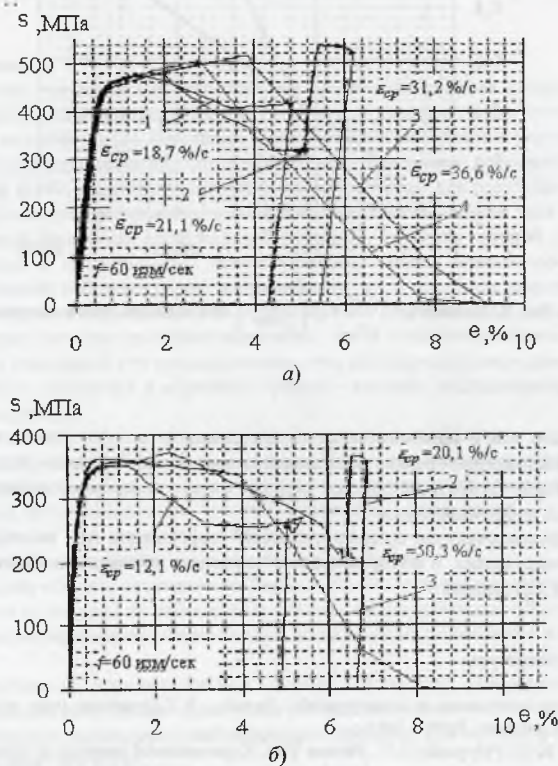


Рис. 5. Результаты испытаний алюминиевого сплава Д16 (а) и технической меди (б)

На рис. 6 представлены зависимости  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_i} = f\left(\frac{\dot{\epsilon}_{ср}^{смин}}{\dot{\epsilon}_{ср}}\right)$  для исследованных материа-

лов.

Интересно отметить, что по наклонам этих кривых можно по оси абсцисс установить соотношение скоростей деформаций  $\frac{\dot{\epsilon}_{\text{смен}}}{\dot{\epsilon}_{\text{ср}}} = \frac{\dot{\epsilon}_{\text{смен}}}{\dot{\epsilon}_{\text{ср}}}$  для каждого материала, при котором эффекты кратковременного разупрочнения пластичного материала при резких сменах в режиме нагружения существенны.

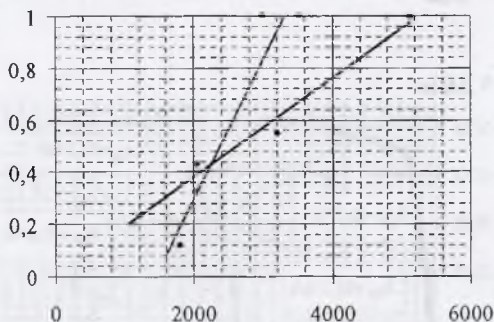


Рис. 6. Зависимости  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_i} = f\left(\frac{\dot{\epsilon}_{\text{смен}}}{\dot{\epsilon}_{\text{ср}}}\right)$  для исследованных материалов

### Выводы

1. Показано, как в зависимости от установленного сложного режима нагружения (статическое растяжение – резкое повышение скорости деформации – статическое растяжение) реализуется кратковременное разупрочнение пластичных материалов на заданных стадиях деформирования.

2. Установлен диапазон средних скоростей деформации при исследуемом сложном режиме нагружения, в котором можно управлять процессами кратковременного разупрочнения материалов.

### Список литературы

1. Прочность материалов и конструкций / Редкол.: В.Т.Трошенко (отв. ред.) и др. – К.: Академперіодика, 2005. – 1088 с.
2. Chausov M.G., Pylypenko A.P., Paratsa V.M. Experimental research of plastic steels deformation from the point of view of suddenly changes in the loading mode / Mechanical Fatigue of Metals: Proceeding of the 13-th International Colloquium (MFM). Ternopil (Ukraine) September 25 – 28, 2006 /Ed. V.T.Troshechenko. - Ternopil: TSTU, 2006 – p. 407 – 410.
3. Чаусов Н.Г., Недосека С.А., Пилипенко А.П. Комплексная оценка поврежденности пластичных материалов при различных режимах нагружения // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. - 3. С. 16 – 21.
4. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки / Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., - Киев, 2004. – 133 с.