

УДК 539.374

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗА ПРОЦЕССА УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ АКТИВНОМ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ ПО ТРАЕКТОРИЯМ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ ИЗЛОМАМИ

А.Г. ЩЕРБО

Приведены результаты экспериментальных исследований образа процесса упругопластического деформирования по траекториям активного нагружения с множественными изломами. Исследована зависимость образа процесса от параметров траектории. Классифицированы траектории, в результате чего выделены те из них, для которых построение образа процесса возможно по теориям простого нагружения.

Напряженное состояние в точках элементов современных конструкций, воспринимающих внешние силовые воздействия, нередко оказывается таким, что напряжения превышают предел пропорциональности, т.е. деформации становятся упругопластическими. Достигается конечное напряженное состояние по траекториям различной геометрии, и нередко история процесса упругопластического деформирования оказывает существенное влияние на конечный результат. Указанные причины определяют актуальность исследования процессов упругопластического деформирования по траекториям сложного нагружения, т.к. для решения ряда прикладных задач данного класса становится весьма важной возможность построения образа процесса упругопластического деформирования с использованием теорий простого нагружения.

Таким образом, цель работы – исследование процессов упругопластического деформирования по траекториям полигональной геометрии с несколькими точками излома.

Нагружение осуществлялось на установке, выполненной по типу «мертвой нагрузки» [5], которая позволяет создавать в образцах плоское напряженное состояние путем их растяжения и реверсированного кручения. Образцы – цельнотянутые трубки из стали марки 1Х18Н10Т. Наружный диаметр 12 мм, толщина стенки 0,4 мм, рабочая длина образца 160 – 170 мм, наружная поверхность образцов подвергнута шлифованию. С целью снятия технологических напряжений перед нагружением образцы подвергались отжигу, в результате чего достигнут удовлетворительный уровень ортотропности материала, что было проверено в дополнительном эксперименте, суть которого состояла в следующем. Из трубчатого образца вырезалось кольцо, разрезалось по образующей, и полученный таким путем образец-полоса подвергался отжигу в тех же условиях, что и образец трубчатый. Затем оба образца подвергались растяжению и сравнивались их диаграммы $\sigma - \epsilon$. Сравнительный анализ функций отклика показал различие в пределах 3 – 5 %, что не превышает обычный разброс экспериментальных точек этих функций, т.е. материал образцов можно считать ортотропным.

Деформации измерялись зеркальными тензometрами Мартенса, базы которых выбирались так, что деформации растяжения и сдвига определялись с одинаковой точностью. Нагружение на каждом уровне напряжений осуществлялось статически, а регистрация показаний тензometров производилась по истечении некоторого промежутка времени, определяемого по методике, изложенной в работе [2]. Так как зеркальные тензometры Мартенса позволяют наблюдать процесс деформирования визуально, регистрация отчетов может быть проведена по допуску на скорость деформирования на каждом уровне нагружения, что позволяет получить адекватные результаты.

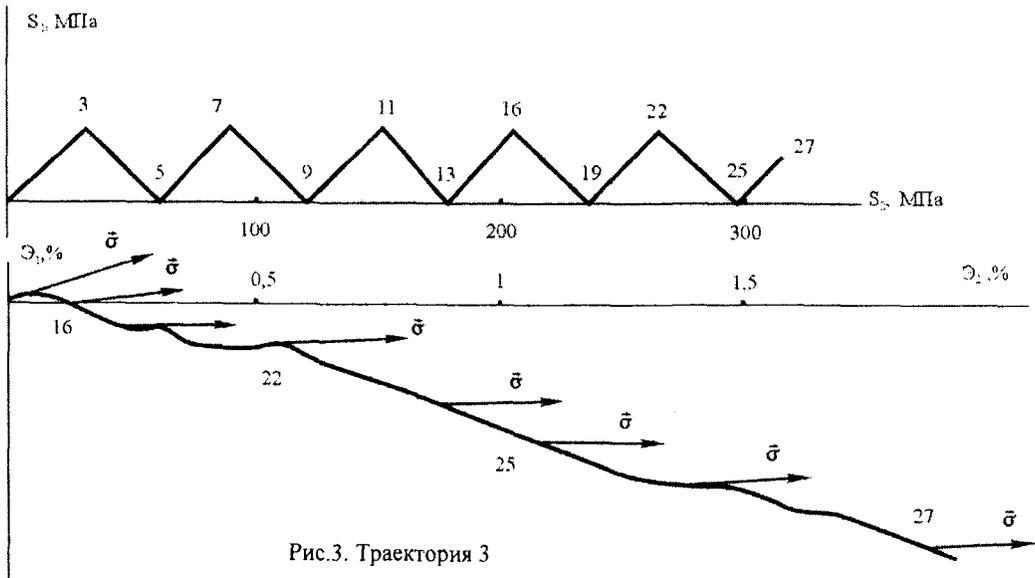
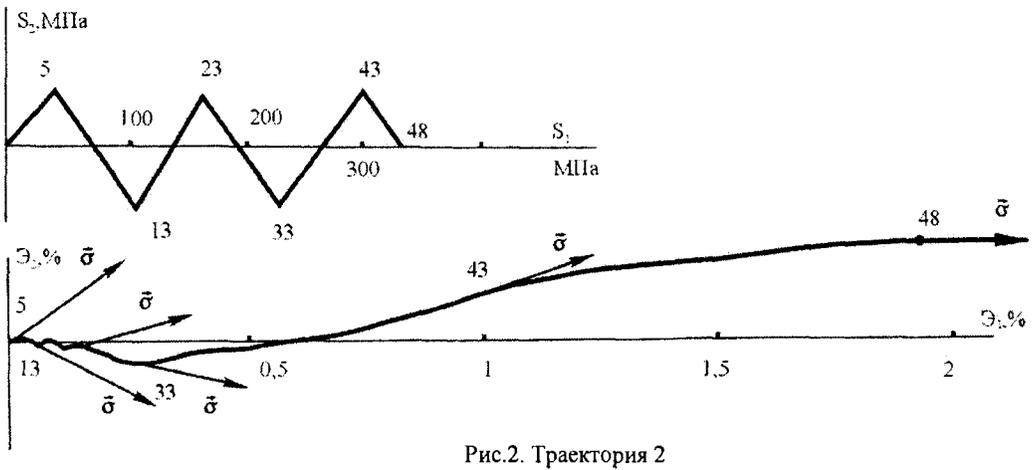
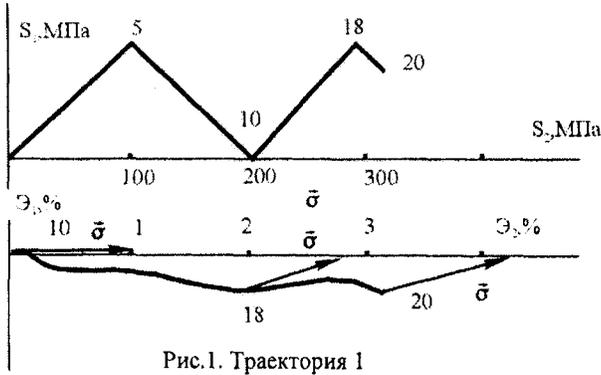
В работе осуществлены полигональные траектории нагружения, параметры которых представлены в таблице.

№ опыта	Направление оси нагружения	Начальное напряжение, МПа	Начальная деформация, %	A, МПа	n
1	Кручение	0	0	98,1	0,96
2	Растяжение	0	0	50,9	1,41
3	Кручение	0	0	29,4	0,96
4	Растяжение	245,3	0,2	79,6	3,0
5	Растяжение	268,1	0,44	79,6	1,5
6	Растяжение	258,3	0,39	79,6	6,1

Здесь A – амплитуда траектории, т.е. наибольшая величина приращения напряжения в направлении, перпендикулярном оси нагружения. Параметр сложности траектории n определяется углом излома, т.е. $n = A/H$, где $H = Actg\alpha$.

В таблице представлены программы двух типов нагружения в экспериментах. Излом траекторий 1–3 происходит в нулевой точке, излом траекторий 4 – 6 происходит после предварительного нагружения за предел текучести. Образ процесса деформирования представлен на рис. 1 – 4, где показаны траектории нагружения 1 – 4 и соответствующие им траектории деформирования.

На рис. 5 представлены результаты анализа скалярных свойств образа процесса деформирования по траекториям 1 – 6. Пространство напряжений и деформаций описывается координатами Ильюшина [1].



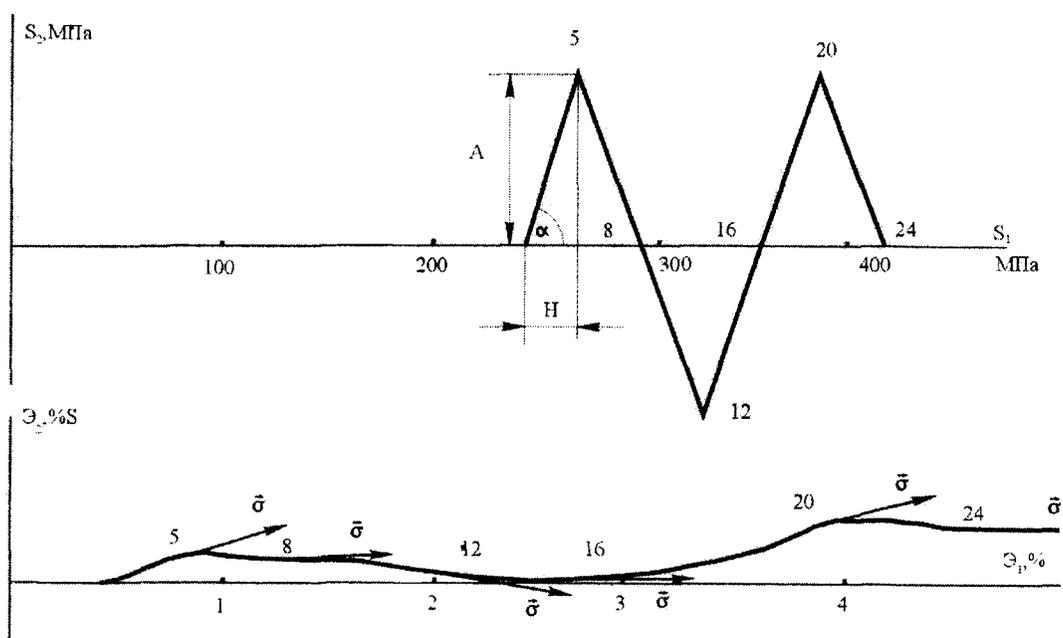


Рис.4. Траектория 4

Вектор напряжений S определяется выражением

$$\vec{S} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2,$$

где $S_1 = \sigma, S_2 = \tau\sqrt{3}$. Нормальные σ и касательные τ напряжения определяются соответственно при растяжении и кручении трубчатого образца. Так как изменение поперечных размеров образца в результате деформирования невелико, при построении образа процесса использовались условные напряжения и деформации. Вектор деформации \vec{E} определяется выражением

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2,$$

где $E_1 = \varepsilon; E_2 = \gamma/\sqrt{3}$, а ε и γ – соответственно относительная продольная деформация и деформация сдвига.

Проведем сравнительный анализ образа процесса упругопластического деформирования траекторий, представленных в таблице. Траектории 1 – 3 осуществлены без предварительного деформирования, т. е. первый излом этих траекторий происходит в нулевой точке пространства напряжений. Излом траекторий 4 – 6 осуществлен после предварительного деформирования за предел текучести. В этом случае начальная деформация (0,2; 0,44; 0,39 %) регистрировалась после выдержки 1 час с целью полного прекращения начального деформирования на соответствующем уровне начального напряжения.

Как следует из таблицы, траектории 1 и 3 имеют одинаковый параметр сложности и амплитуды, различающиеся более чем в 3 раза. Полупериод траектории 1, пользуясь терминологией колебательного процесса, составляет 210 МПа, а траектории 3 – 620 МПа. На начальных этапах нагружения траектория деформирования в том и другом случаях «следует» за траекторией нагружения, т.е. векторы напряжения $\vec{\sigma}$, построенные в соответствующих точках траектории деформации, совпадают с касательными к этой траектории. Искажение начального образа процесса происходит за пределом текучести в обоих случаях. Причем, если точки траектории деформирования 1, пусть и с некоторым запаздыванием, отвечают точкам излома траектории нагружения 1, то для траектории 3 такое соответствие наблюдается на более низких, в сравнении с траекторией 1, уровнях напряжения. Начиная с точки 2 (напряжение составляет 268 МПа), траектория деформирования 3 более не «следует» за траекторией нагружения, а отклонение от оси E_2 постоянно возрастает. Наибольшее отклонение траектории деформирования 1 от оси E_2 составило 0,31 % относительной деформации, а траектории 3 – 0,52 %. Эксперименты 1, 3 были прекращены на уровне напряжений $S_2 \approx 320$ МПа, так как образцы приблизились к порогу потери устойчивости при кручении. Сравнивая образы процесса 1 и 3, можно сделать заключение о влиянии амплитуды на векторные свойства процесса: с уменьшением амплитуды A запаздывание векторных свойств практически не исчерпывается на прямолинейных участках траекторий уровней напряжения за пределом текучести.

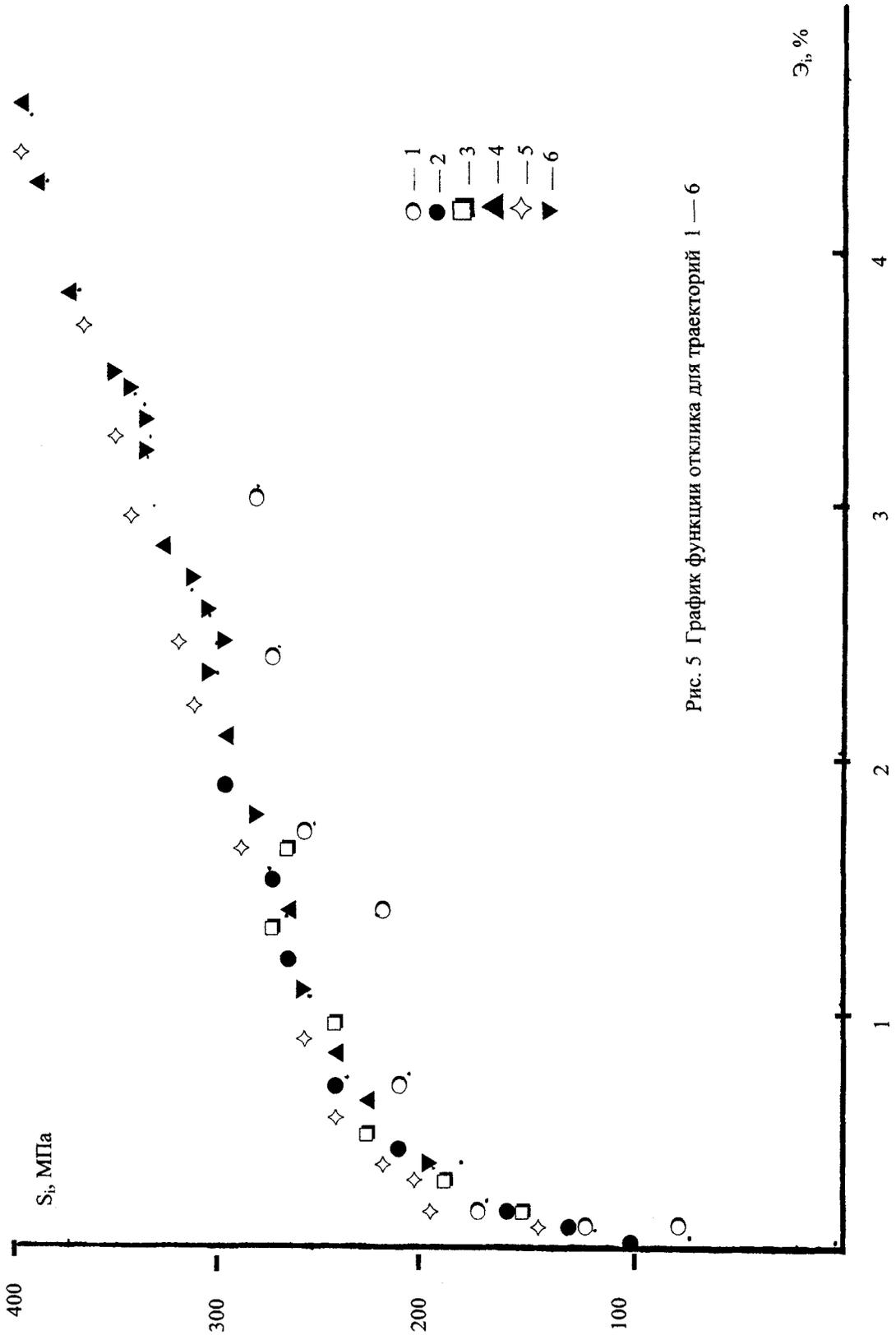


Рис. 5 График функции отклика для траекторий 1 — 6

Сравнивая скалярные свойства процессов 1 и 3, видим, что кривые $S_i \sim \varepsilon_i$, соответствующие этим процессам, разнятся между собой в напряжениях на величину около 10 %. Обе кривые $S_i \sim \varepsilon_i$ за пределом текучести отличаются от кривой простого нагружения, причем кривая 1 – в большей степени. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что с ростом амплитуды A кривые $S_i \sim \varepsilon_i$ имеют тенденцию смещения, т. е. отличаются от функции отклика простого нагружения.

Сравним траектории 2 и 4. Эти траектории отличаются от 1 и 3 тем, что составляющие вектора напряжения, перпендикулярные оси нагружения, изменяют знак. Векторы напряжений, построенные в узловых точках соответствующих траектории деформирования, совпадают с касательными, тогда как в промежуточных точках такого совпадения нет. Это обстоятельство указывает на то, что след запаздывания векторных свойств исчерпывается на каждом прямолинейном участке траектории. Причем скорость исчерпания следа запаздывания векторных свойств возрастает с ростом параметра сложности траектории нагружения. Траектории 2 и 4 различаются между собой по параметру сложности и по амплитуде, но скалярные свойства этих процессов имеют ту же тенденцию, что и в случаях 1 и 3, а именно: с ростом амплитуды кривая $S_i \sim \varepsilon_i$ больше отличается от кривой простого нагружения, хотя здесь это различие невелико и скорее носит принципиальный характер. Подтверждением данного замечания служит сравнение скалярных свойств траекторий 2 и 5, имеющих примерно одинаковый параметр сложности и разные амплитуды.

Сравнение по указанным ранее признакам траекторий 4 и 5, имеющих одинаковую амплитуду и различные параметры сложности, подтверждает сделанные выше выводы как в отношении векторных, так и скалярных свойств.

Исследуя влияние параметра сложности траектории нагружения, сравним траектории 5 и 6. Эти траектории почти идентичны по параметрам начального нагружения, идентичны по амплитуде и резко отличаются параметром сложности. Различие векторных свойств весьма незначительно, т. е. след запаздывания векторных свойств исчерпывается на прямолинейных участках. Интересно отметить, что длины прямолинейных участков траектории 6 короче тех же отрезков траектории 5, и все же след запаздывания векторных свойств исчерпывается в обоих случаях. Данное наблюдение хорошо согласуется с выводами, сделанными в работах [3, 4, 6], где указано, что след запаздывания векторных свойств уменьшается с ростом угла излома траектории (с увеличением параметра сложности). Такое же согласование наблюдается и по скалярным свойствам: вблизи точек излома траектории 6, т.е. на уровне напряжения S_i около 280, 310, 340, 370 МПа кривая $S_i \sim \varepsilon_i$ имеет местные впадины, что свидетельствует о наличии заметного следа запаздывания скалярных свойств. Таким образом, можно сделать вывод, что с увеличением параметра сложности вблизи точек излома наблюдается частичная разгрузка, т.е. уменьшение S_i . Такое согласование сделанных здесь выводов и результатов работ [3, 4, 6] представляется не случайным, тем более что работы [4, 6] выполнены по результатам испытаний образцов из той же стали, что и в настоящей работе.

Сравнительный анализ рассматриваемых траекторий позволяет сделать следующие выводы. Для некоторых из данных траекторий, относящихся к классу траекторий сложного нагружения, возможно построение образа процесса по теориям нагружения простого. Наибольшие погрешности при этом не превышают 10 – 12 %, а отличие по деформациям достигает 20 % на некоторых участках, расположенных вблизи точек излома. С некоторой осторожностью к приведенной выше рекомендации следует относиться в случае траекторий с большими параметрами сложности $n > 5$, т. к. на некоторых участках траекторий возникает частичная разгрузка, что приводит к отклонению скалярных свойств в большей степени, чем указано выше. Изменение амплитуды нагружения хотя и сказывается на отклонениях скалярных свойств, но в меньшей степени, чем изменение параметра сложности. В случаях траекторий с параметрами сложности $n > 5$ увеличение амплитуды усугубляет указанные различия, так как траектория переходит из класса активного нагружения в класс траекторий с разгрузками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильюшин А.А. Пластичность. – М., 1963.
2. Родионов В.К., Шишмарев О.А., Щербо А.Г. Экспериментальное исследование некоторых закономерностей пластического деформирования стали. В сб.: Прикладные проблемы прочности и пластичности. – Горький, 1982.
3. Шишмарев О.А., Щербо А.Г. Исследование некоторых сложных процессов нагружения стали с разгрузками. // Прикладная механика. – 1982. – № 3.
4. Шишмарев О.А., Щербо А.Г. Образ процесса нагружения для двухзвенных ломаных траекторий деформации с углом излома более 90°. // Изв. АН СССР. Сер. Механика твердого тела. – 1982. – № 5.
5. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. – М., 1984.
6. Щербо А.Г. Экспериментальная проверка постулата изотропии для траекторий нагружения с разгрузками. // Прикладная механика. – 1990. – № 1.