

7. Гуревич М. И. Теория струй идеальной жидкости. М.: Наука, 1979. 536 с.
8. Батчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973. 758 с.

Москва

Поступила в редакцию
9.VI.1980

УДК 539.374

ОБРАЗ ПРОЦЕССА НАГРУЖЕНИЯ ДЛЯ ДВУХЗВЕННЫХ ЛОМАНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДЕФОРМАЦИИ С УГЛОМ ИЗЛОМА БОЛЕЕ 90°

ПИШМАРЕВ О. А., ЩЕРБО А. Г.

Как известно, целый ряд практически важных инженерных задач, связанных с пластическим деформированием металла, успешно решается методами теории упруго-пластических процессов [1], в частности применением теории двухзвенных процессов, которая неоднократно подвергалась экспериментальной проверке [2-4] и подтвердила удовлетворительное совпадение с опытом. Почти все испытания по проверке этой теории проводились в условиях, когда угол излома траектории деформации не превышал 90°. Между тем весьма существенное значение имеют случаи, когда излом происходит на больший угол, т. е. после излома траектории возникают разрывки. Однако результатов таких испытаний опубликовано мало.

Цель данной работы — экспериментальное исследование процесса нагружения для траекторий деформации в виде двухзвенных ломаных с изменением угла в точке излома от 90 до 180°. На трубчатых образцах нержавеющей стали исследовалось запаздывание векторных и скалярных свойств. Получены графики зависимости углов сближения от приращения длины траектории, отсчитываемого от точки излома. Установлено, что с ростом угла излома длина следа запаздывания векторных свойств уменьшается, а длина следа запаздывания скалярных свойств увеличивается и для углов излома, превышающих 140°, становится равной бесконечности.

1. Все испытания проводились в условиях плоского напряженного состояния, создававшегося растяжением и закручиванием тонкостенных трубчатых образцов на специальной установке, аналогичной описанной в [5]; в которой нагружение осуществлялось гириями точного веса. Деформации измерялись при помощи зеркальных тензометров Мартенса, что давало возможность регистрировать абсолютные продольные деформации 1 мк, а это при примененных базах приборов составляло относительную деформацию 0,005%. Минимальные относительные деформации сдвига, измеряемые при помощи тензометров Мартенса, составляли 0,003%. Каждая из гирь, которыми производилось нагружение прикладывалась так, что ее вес передавался на образец не сразу, а постепенно. В большинстве испытаний скорость нагружения составляла примерно 2-3 Мпа/с. Деформации регистрировались лишь после того, как их скорость снижалась до $0,17 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. Необходимые для этого выдержки во времени были достаточно длительными (и не одинаковыми на разных этапах нагружения). Следующая порция нагрузки (гири) прикладывалась только по истечении указанной выдержки.

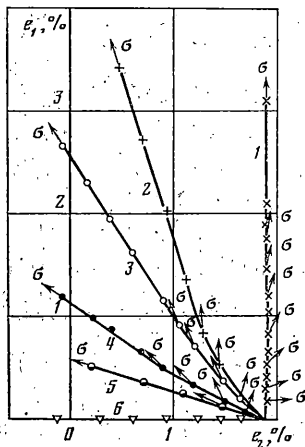
Образцы — цельнотянутые трубки из нержавеющей стали 1X18H10T с наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 0,4 мм — предварительно подвергались рекристаллизационному отжигу и испытаниям на отсутствие начальной анизотропии. Для этого из образцов перпендикулярно их оси вырезались кольца, которые после разреза по образующей выпрямлялись и вместе с другими трубчатыми образцами отжигались. После отжига трубки и пластины, полученные из колец, подвергались на установке простому растяжению, затем строились диаграммы $\sigma - \epsilon$. Сравнение этих диаграмм показало, что анизотропия образцов в продольном и поперечном направлениях не превосходила 2%, что было меньше разброса экспериментально полученных точек для образцов, испытывавшихся в каждом направлении (последний составлял 3%). Кроме того, наличие начальной изотропии подтвердил и микроскопический анализ отожженных образцов.

Методика испытаний состояла в следующем. В образцах, путем их закручивания, создавалась примерно одинаковая (отклонения не превосходили $\pm 0,05\%$) начальная деформация с интенсивностью $\epsilon_1 = 1,9\%$. Затем после часовой выдержки под нагрузкой, необходимой для полного прекращения ползучести, осуществлялись под различными углами к начальным стадиям деформирования вторичные, близкие к прямолинейным траектории деформации. Установка позволяла задавать пути нагружения лишь в напряжениях, поэтому траектории деформации являлись не прямыми, а кривыми малой кривизны. Углы между направлениями начальной деформации, одинаковой для всех образцов, и вторичными стадиями деформирования составляли примерно: 90, 110, 125, 145, 160, 180°. При определении деформаций, по которым строились вторичные траектории (после излома), вычислялись и напряжения, соответствующие различным точкам этих траекторий, что позволило строить в этих точках векторы напряжений (точнее, показать их направление).

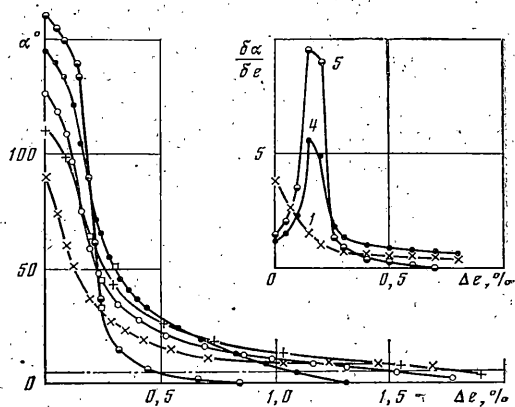
Графическое изображение результатов испытаний проводилось в координатах: $s_1 = \sigma^0$, $s_2 = \tau^0 \sqrt{3}$, $e_1 = \varepsilon$, $e_2 = \gamma \sqrt{3}$, где σ^0 и τ^0 — истинные нормальное и касательное напряжения; ε и γ — условные деформации.

В работе использовались обозначения: σ — вектор напряжений, σ_i — интенсивность напряжений, e_i — интенсивность деформаций, e — длина траектории деформации, Δe — длина траектории деформации, отсчитываемая от точки излома, α_0 — угол излома траектории деформации (начальный угол сближения).

На графике фиг. 1 в плоскости девиатора деформаций изображены упомянутые выше траектории деформации с указанными в некоторых точках вторых звеньев этих траекторий направлениями векторов напряжений σ (показать все полученные авторами направления σ не представляется возможным из-за значительного усложнения чертежа). Представленные графики дают достаточно четкое представление об образе процесса нагружения для вторых звеньев ломаной траектории с углом от 90 до 180°. Траектории деформации после излома обозначены цифрами 1–6 в порядке возвра-



Фиг. 1



Фиг. 2

стания углов излома. Фигура дает лишь качественную картину изменения углов между векторами напряжений σ и соответствующими касательными, называемых углами сближения, в зависимости от Δe для различных путей деформирования.

Данные о количественном изменении этих углов содержатся в графиках фиг. 2. Здесь изображены кривые зависимости текущих углов сближения α от длины траектории деформации Δe , отсчитываемой от точки излома для различных путей деформирования. Нумерация путей деформирования и условные обозначения экспериментальных точек — прежние. На кривых светлыми квадратами обозначены точки, начиная от которых, на указанных путях деформирования возникали пластические деформации, превышающие заданный допуск. Этот допуск был принят как 0,05% модуля вектора приращения пластической деформации, возникавшего на пути деформирования от точки излома. Для рассматриваемых случаев нагружения (прямолинейные траектории напряжений) этот допуск совпадает с допуском на величину остаточной части приращения длины траектории деформации от точки излома¹.

Как видно на фигуре, точки, разделяющие только упругие и упругопластические деформации (полученные по упомянутому допуску), на каждом пути деформирования располагаются несколько ниже точек перегиба соответствующих кривых $\alpha - \Delta e$. Штрихпунктиром обозначена прямая, соответствующая углам сближения, равным 5°. После пересечения какой-либо из изображенных кривых $\alpha - \Delta e$ с штрихпунктирной линией след запаздывания векторных свойств λ_0 считается исчерпанным.

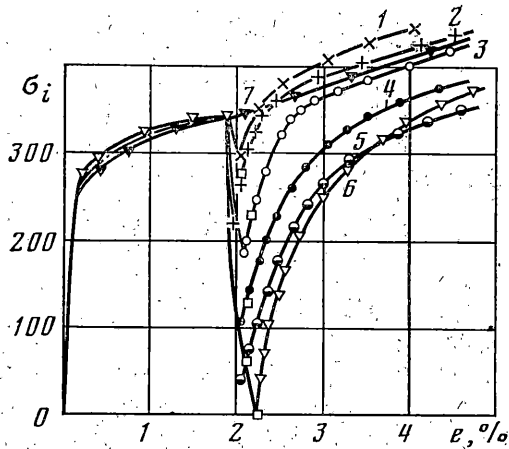
Из результатов, представленных на этой фигуре, следует, что кривые $\alpha - \Delta e$ не являются конгруэнтными, как получалось по данным ряда экспериментаторов, исследовавших двухзвенные процессы с углом излома $\alpha_0 \leq 90^\circ$ [2, 4]. В данном случае кривые пересекаются. Видно, что длина следа запаздывания векторных свойств с ростом начального угла сближения (угол излома траектории) уменьшается. Так, для $\alpha_0 = 90, 110, 125, 145, 160^\circ$ она составляла 1,8; 1,6; 1,3; 1,0; 0,45%.

Для траектории деформации 6 ($\alpha_0 = 180^\circ$) длина следа запаздывания векторных свойств должна быть равной упругой деформации, отвечающейначальному пути нагружения.

Установленная в работе зависимость длины следа запаздывания векторных свойств от начального угла сближения α_0 хорошо согласуется с результатами [6].

¹ Остаточная часть приращения длины траектории деформации определялась вычитанием из всей длины приращения деформации Δe ее упругой части.

где экспериментально показано, что при сложном нагружении с разгрузками нарастание пластических деформаций на путях нагружения (траекториях напряжений), пересекающих «тыльную» часть поверхности нагружения, происходит значительно медленнее (в 15–20 раз), чем тогда, когда пути нагружения пересекают «фронтальную» часть поверхности нагружения. При этом степень нарастания пластических деформаций уменьшается с ростом угла между направлениями начальной и второй стадий нагружения. Таким образом, результаты [6] подтверждают, что длина λ_b с ростом α_0 должна уменьшаться.



Фиг. 3

На фиг. 2 показаны кривые зависимости $\delta\alpha/\delta\epsilon$ от $\Delta\epsilon$ для трех путей деформирования: $\alpha_0=90^\circ, 145^\circ, 160^\circ$ (нумерация кривых соответствует нумерации путей деформирования, указанных на графике фиг. 1).

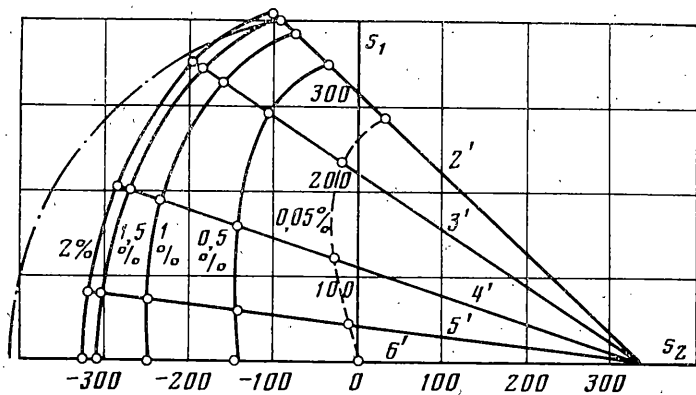
Изменение текущего угла сближения $\delta\alpha$ берется на отношению к приращению длины участка траектории деформации $\delta(\Delta\epsilon)=0,1\%$. Зависимость $\delta\alpha/\delta\epsilon-\Delta\epsilon$ для пути деформирования 1 ($\alpha_0=90^\circ$) графически изображается монотонной кривой, асимптотически приближающейся к оси $\Delta\epsilon$. Кривые 4, 5 вскоре после излома траектории имеют резко выраженные пики, причем для пути 5 высота пика превосходит высоту аналогичного пика на пути 4. Наличие аналогичных пиков было обнаружено для всех путей деформирования, сопровождающихся разгрузками (за исключением, естественно, пути 6). При этом оказалось, что с ростом начального угла сближения α_0 высота пиков увеличивается.

2. Для исследования принципа запаздывания скалярных свойств [2] в основном были использованы результаты испытаний тех же образцов, которые применялись для изучения векторных свойств материала.

На графике фиг. 3 изображены кривые зависимости $\sigma_i-\epsilon$ как при простом закручивании (кривая 7), так и для ломаных траекторий — путей 1–6. Обозначение траекторий деформирования прежние. Кривые 1–5 до точки излома своих траекторий близки и на этом участке изображены одной линией. Кривая 6 (излом траектории деформации на 180°) на начальном участке располагается несколько выше кривых, соответствующих другим путям. На фигуре видно, что кривые 2 и 3 после излома, на которых они претерпели существенное снижение (σ_i для пути 2 снизилась на 30%, а для пути 3 — почти на 50%), в дальнейшем, после исчерпания отрезка траектории деформации определенной длины — следа запаздывания скалярных свойств λ_c , практически совпадают с кривой $\sigma_i-\epsilon$ для простого закручивания. При этом оказалось, что кривая 2 после снижения, вызванного изломом траектории, располагалась даже выше кривой $\sigma_i-\epsilon$ для простого нагружения. Еще выше располагалась кривая, соответствующая второму звену пути 1 ($\alpha_0=90^\circ$), для которого траектория также обнаруживает четкий «нырок» сразу после излома. Кривые 4–6 после снижения, вызванного изломом траектории и частичного подъема, оказались расположенными ниже соответствующего участка кривой $\sigma_i-\epsilon$ для пути 7 и не имели тенденции к сближению с ней; след запаздывания скалярных свойств для этих путей $\lambda_c=\infty$, т. е. не исчерпывается вообще.

Светлыми квадратами на кривых $\sigma_i-\epsilon$ отмечены точки, начиная от которых возникают пластические деформации. Допуск, по которому констатировалось появление пластических деформаций, прежний, т. е. равен 0,05%. Заслуживает внимания характер расположения вторичных участков кривых 1 и 2. Как уже отмечалось, участки этих кривых после исчерпания следа запаздывания λ_c располагались выше соответствующего участка кривой для простого нагружения. Объяснить это явление старением материала в процессе часовой выдержки образцов после сообщения им начальной деформации нельзя, так как и кривая $\sigma_i-\epsilon$ для простого нагружения (кривая 7) получена также при наличии такой же по времени выдержки после сообщения начальной деформации.

Для выяснения природы отмеченного явления были поставлены два дополнительных эксперимента. Вначале образцам сообщалась деформация растяжения $\epsilon_1=1,9\%$, далее проводилась часовая выдержка и после этого при фиксированной деформации растяжения сообщалась путем закручивания деформации $\epsilon_2=1,3\%$. В этом случае оказалось, что участки кривых после исчерпания λ_c (длина которого в этом случае принята такой же, как и для пути 1) располагались на 5–7% ниже кривой $\sigma_i-\epsilon$, отвечающей простому нагружению. Эти результаты, а также данные [7] дают основания предполагать, что отмеченное явление — расположение



Фиг. 4

участков кривых 1 и 2 после точки излома выше соответствующего участка кривой для простого закручивания — обусловлено влиянием третьего инварианта девиатора напряжений.

Длины следов запаздывания как скалярных, так и векторных свойств для всех применявшихся в работе шести путей приведены ниже

α_0	$\lambda_b, \%$	$\lambda_c, \%$
90°	1,8	0,2
110°	1,6	0,4
125°	1,3	0,8
145°	1,0	∞
160°	0,45	∞
180°	—	∞

На фиг. 4 сплошными линиями изображены кривые, отвечающие одинаковым приращениям (от точки излома) длин траекторий деформаций $\Delta \epsilon$ для путей² нагружения 2'—6'; кривые далее именуется кривыми равных приращений длин траекторий. Величины приращений длин траекторий $\Delta \epsilon$, которым отвечает та или иная кривая равных приращений, указаны непосредственно на графике фиг. 4. Очертания этих кривых существенно отклоняются от дуг окружностей, с которыми эти кривые должны были бы совпадать после прекращения запаздывания скалярных свойств.

Между тем даже кривая, отвечающая $\Delta \epsilon = 2\%$, лишь в своей верхней части близка к соответствующей дуге окружности (штрих пунктирная линия), а на остальном протяжении она отходит от дуги окружности внутрь. Это означает, что след запаздывания скалярных свойств для путей 4'—6' не исчерпывается. Хотя этот вывод уже был сделан на основании рассмотрения кривых фиг. 3, здесь на фиг. 4 приводятся для иллюстрации явления запаздывания скалярных свойств в плоскости девиатора напряжений. Кроме того, на фиг. 4 штрихами показана кривая, отделяющая область напряженных состояний, отвечающих возникновению упругих деформаций, от геометрического места напряженных состояний, при которых возникают пластические деформации (величина их превосходит принятый для остаточных деформаций допуск). Этот допуск, как отмечалось выше, был взят равным 0,05% модуля вектора приращения деформации, возникавшего на пути $\Delta \epsilon$.

Заслуживает внимания очертание «тыльной» части этой кривой. Как видно из фиг. 4, граница текучести на этом участке является вогнутой. Авторы неоднократно получали такое очертание тыльной части границы, но считали его следствием разброса экспериментальных точек. Однако повторяемость именно такого расположения точек дает основание считать, что показанная на фиг. 4 конфигурация тыльной части границы текучести близка к действительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильюшин А. А. Пластичность. Основы общей математической теории. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 271 с.
2. Ленский В. С. Экспериментальная проверка основных постулатов общей теории упругопластических деформаций.— В кн.: Вопросы теории пластичности. М.: Изд-во АН СССР, 1961, с. 58—82.
3. Коровин И. М. Экспериментальное определение зависимости напряжение — деформация при сложном нагружении по траектории с одной точкой излома.— Инж. ж., т. 4, 1964, № 3, с. 592—600.

² Пути 2'—6' представляют собой траектории напряжений, соответствующие траекториям деформации 2—6.

4. *Васин Р. А.* Некоторые вопросы связи напряжений и деформаций при сложном нагружении.— В кн.: Упругость и неупругость. М.: Изд-во МГУ, 1971, с. 59—126.
5. *Ягн Ю. И., Шиммарев О. А.* Исследование пластического деформирования при одновременном растяжении и кручении тонкостенных трубчатых образцов металла.— Заводск. лаборатория, 1958, № 10, с. 1243—1245.
6. *Shishmarev O. A.* Experimental study on one type of plastic anisotropy not considered in simplified flow theories.— In: Mech. Plast. Solids., v. 1. Leyden: Noordhoff Publ., 1973, p. 491—505.
7. *Шиммарев О. А.* Влияние вида девиатора напряжений на пластическое деформирование стали.— Инж. ж., МТТ, 1966, № 5, с. 112—118.

Калининград, Новополец

Поступила в редакцию
10.X.1980