

УДК 539.214;539.374

© 1992 г. А. М. ЖУКОВ

О СВОЙСТВАХ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ

Из многих вариантов теории пластичности наиболее практическое применение нашли два варианта: теория малых упругопластических деформаций и теория течения. Располагая экспериментальными данными, накопленными к сороковым годам текущего столетия, А. А. Ильющин показал, что эти варианты теории дают согласующиеся с опытом результаты в случае простого нагружения, т. е. тогда, когда нагрузки, создающие однородное или близкое к нему напряженное состояние в испытательном образце, изменяются пропорционально друг другу. Он также доказал теорему о простом нагружении применительно к телу, в котором возникает неоднородное напряженное состояние [1].

За прошедшие десятилетия получены новые экспериментальные данные о пластическом деформировании металлов. Наиболее существенные из них: ползучесть металлов при комнатной температуре за пределами упругости; изменяемость упругих свойств в результате пластического деформирования; нелинейный закон разгрузки пластически деформированного металла; эффект Баушингера сводится не только к уменьшению начального предела текучести, но к существенному изменению кривой деформирования при изменении знака нагрузки на обратный и некоторые другие [2].

В пространстве напряжений пластический потенциал, через который в теории течения выражаются компоненты приращения тензора пластических деформаций, изображается поверхностью, которая отделяет область упругого состояния материала от пластического. Эту поверхность чаще всего называют поверхностью текучести. Последнюю экспериментально следует определять методом разгрузок и последующих нагрузок по лучам, смежным с первоначальным лучом, нагружение вдоль которого вызывает заданную пластическую деформацию или напряжение. При этом начальное и последующие нагружения надлежит вести непрерывно, чтобы исключить ползучесть. Скорость нагружения может быть малой даже для малоуглеродистой стали, но больше некоторой критической [3].

Опытами на стали и сплаве Д16Т установлено, что малая частичная разгрузка приостанавливает ползучесть стали при комнатной температуре за пределами упругости, а сплава существенно уменьшает ее. Из этого следует важный вывод, что в статически неопределимых системах, работающих за пределами упругости, можно не считаться с ползучестью металлов. В наиболее напряженных элементах системы за счет ползучести возникнет частичная разгрузка, которая в свою очередь, приостановит дальнейшую ползучесть металла и тем самым мало изменит распределение напряжений, подсчитанных методами теории пластичности.

Подтверждением изложенного служат два известных опытных факта: прогиб балки и угол закручивания круглого стержня, нагруженных за пределы упругости,

с течением времени не увеличиваются. Здесь существуют неоднородные напряженные состояния и работают гипотезы плоских сечений.

В статически определимых системах частичная разгрузка возникнуть не может и потому при определении деформированного состояния системы ползучесть металлов должна учитываться [4].

Для отожженной стали-45 в условиях растяжения с кручением была определена кривая текучести после предварительной пластической вытяжки. Образец из этой стали подвергли сложному нагружению вдоль эллипса Мизеса, лежащего внутри области, ограниченной определенной по методу разгрузок кривой текучести. За период сложного нагружения осевая деформация ϵ_z возросла на 0,61% и составила почти 40% этой деформации при его начале. В процессе сложного нагружения осевое напряжение было уменьшено на 108,9 МПа. За счет этого по теории течения осевая деформация должна уменьшиться всего на 0,056%.

Нагружение вдоль поверхности текучести реально можно осуществить только во времени, в течение которого неизбежно проявится ползучесть. Изменение деформаций не будет следовать законам упругости и вектор приращения пластической деформации не будет ортогонален поверхности текучести. Это один из примеров несогласия теории течения с опытом.

При кручении трубчатого образца при фиксированном растягивающем напряжении $\sigma_z > \sigma_x$ имеется начальный линейный участок кривой догрузки, наклон которого много меньше упругого модуля сдвига G . Согласно же теории течения он должен быть равен G . Это второй пример расхождения теории течения с опытом. Впрочем и теория малых упругопластических деформаций отмеченный опытный факт не описывает.

Во всех теориях пластичности, кроме одной [5], принимается независимость упругих свойств металлов от пластической деформации. В действительности же, как показали опыты, пластическое деформирование металлов существенно изменяет их упругие свойства [2].

Разобранные и другие упомянутые выше новые особенности пластического деформирования металлов должны найти отражение в теории пластичности для описания процессов деформирования в общем случае сложного нагружения.

Для начально изотропного материала, подчиняющегося критерию текучести Мизеса и обладающего склерономными свойствами, А. А. Ильюшин сформулировал основы общей математической теории пластичности. Он ввел пятимерные пространства деформаций и напряжений [6].

Деформированное состояние в точке тела в первом пространстве определяется вектором \mathcal{E} с ортогональными компонентами:

$$\mathcal{E}_1 = \frac{2}{3} \left[\epsilon_x - \frac{1}{2} (\epsilon_y + \epsilon_z) \right], \quad \mathcal{E}_2 = \frac{\sqrt{3}}{3} (\epsilon_y - \epsilon_z), \quad \mathcal{E}_3 = \frac{\sqrt{3}}{3} \epsilon_{xy}, \dots, \quad \mathcal{E}_5 = \frac{\sqrt{3}}{3} \epsilon_{zx}$$

где $\epsilon_x, \epsilon_y, \dots, \epsilon_{zx}$ — компоненты тензора деформаций. При таких компонентах вектора его модуль \mathcal{E} равен интенсивности деформаций ϵ_r .

Напряженное состояние в точке тела во втором пространстве изображается вектором S с ортогональными компонентами

$$S_1 = \sigma_x - \frac{1}{2} (\sigma_y + \sigma_z), \quad S_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_y - \sigma_z), \quad S_3 = \sqrt{3} \tau_{xy}, \dots, \quad S_5 = \sqrt{3} \tau_{zx}$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \dots, \tau_{zx}$ — компоненты тензора напряжений. При таких компонентах вектора его модуль S равен интенсивности напряжений σ_i .

Предполагается, что объемная деформация подчиняется закону Гука. Он имеет опытное подтверждение [7] и [8].

Основные положения любой теории пластичности непосредственно проверяют опытами на тонкостенных трубчатых образцах, в стенках которых создается

однородное или близкое к однородному напряженное состояние за счет приложения осевой силы P , внутреннего давления p и крутящего момента M . Применительно к результатам испытаний на таких образцах введены понятия траектории деформирования $\mathcal{E}(t)$ и траектории нагружения $S(t)$.

Связь между вектором напряжений и вектором деформаций устанавливается постулатом изотропии. Согласно ему величина и направление вектора S относительно траектории деформирования $\mathcal{E}(t)$ в каждый момент времени t зависит только от внутренней геометрии этой траектории (длины дуги, кривизны и кручения) и не зависит от ориентации ее в пятимерном пространстве $(\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_5)$ [6].

Из постулата изотропии следует

$$S = \sum_{k=1}^5 S_k \mathcal{E}_k$$

где \mathcal{E}_k — единичные векторы естественного ортогонального репера траектории деформирования, а S_k зависит только от параметров внутренней геометрии этой траектории. В общем случае S_k являются функционалами этих параметров и подлежат экспериментальному определению.

Впервые постулат изотропии был подтвержден опытами в [9]. К настоящему времени этот постулат подтвердили многочисленные экспериментальные исследования, выполненные после [9]. Надобность в дальнейшей его проверке, по нашему мнению, отсутствует. Теперь необходимо сосредоточить усилия на определении зависимостей $S_k(\mathcal{E}_k)$ для разных режимов сложного нагружения и разных металлов.

В [6] сформулирован также принцип запаздывания, состоящий в том, что угол между S и \mathcal{E}_1 (единичный вектор касательной) в некоторой точке траектории деформирования зависит не от всей траектории, а от некоторой предшествующей ее части. В случае, когда криволинейная траектория переходит в прямолинейную, тогда по этому принципу вектор S должен лечь на прямую, пройдя некоторый путь λ , называемый следом запаздывания. Последний пример характеризует принцип запаздывания векторных свойств. Но существуют и скалярные свойства материала, характеризующиеся зависимостью $S(\mathcal{E})$. Рассматриваемый принцип предусматривает запаздывание и векторных и скалярных свойств материала.

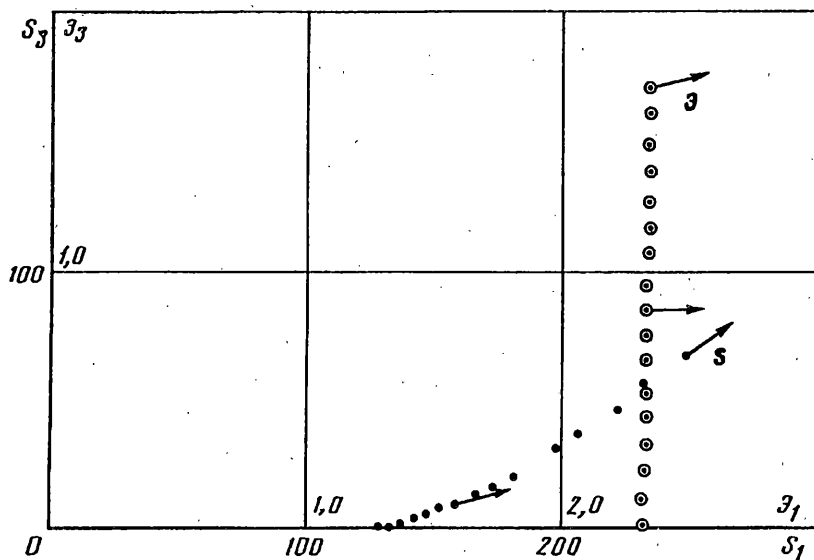
Статья [9] в основном подтверждает принцип запаздывания векторных свойств, а статья [10] — скалярных свойств для траекторий деформирования малой кривизны. Принципу запаздывания посвящено много экспериментальных исследований. Они, как правило, показывают его согласие с опытом.

Пространство \mathcal{E}_k и S_k обладают свойствами однородности. Между ними должно существовать взаимно однозначное соответствие. Из постулата изотропии и условия изоморфизма следует

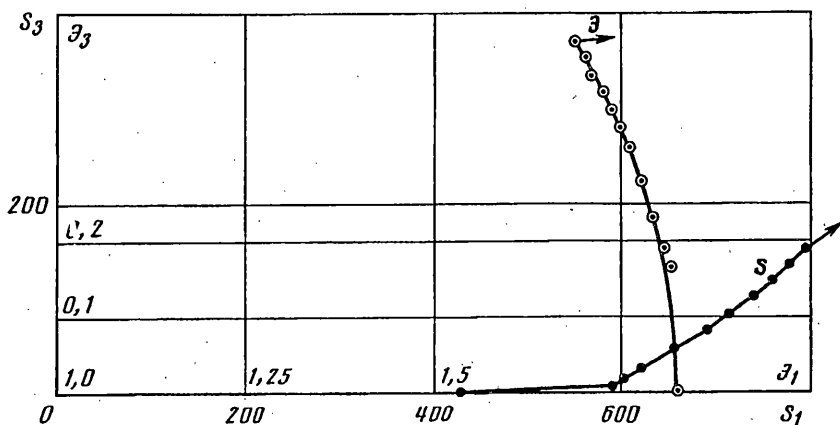
$$\mathcal{E} = \sum_{k=1}^5 \mathcal{E}_k S_k$$

где S_k — единичные векторы естественного ортогонального репера траектории нагружения, а \mathcal{E}_k зависят только от параметров внутренней геометрии этой траектории. В общем случае являются функционалами этих параметров и подлежат экспериментальному определению.

На фиг. 1 представлены результаты испытаний трубчатого образца из стали 20, который был нагружен до S_1 , около 232 МПа и при этом значении закручен. Траектория нагружения изображена кружками, а соответствующая ей траектория деформирования — точками. Там же показаны направления единичных векторов деформаций \mathcal{E} и напряжений s . Как видно из графиков \mathcal{E} не ложится на траекторию нагружения, в то время как s сравнительно быстро практически совпадает с касательной к траектории деформирования.



Фиг. 1



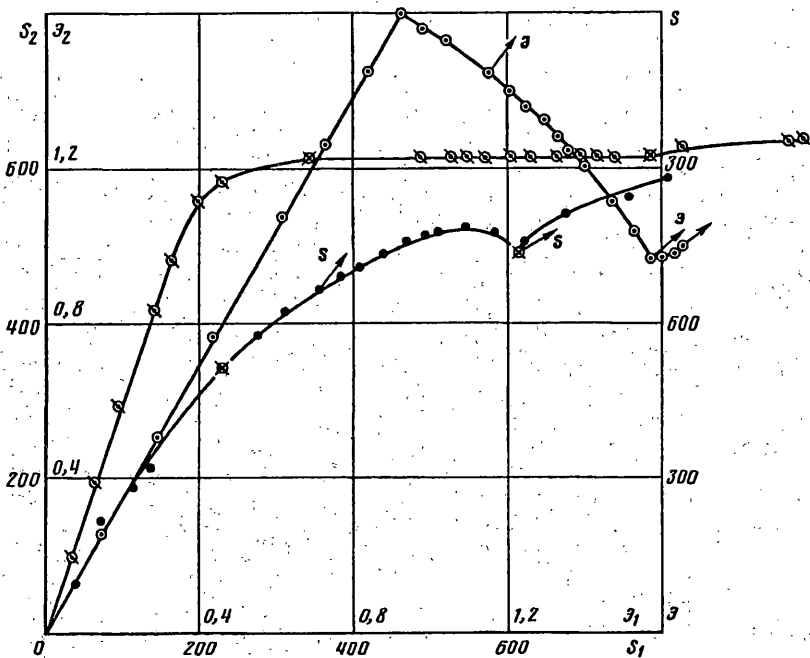
Фиг. 2

В разобранном опыте измеряли продольную и угловую деформации. S_1 и S_2 подсчитаны с учетом изменения поперечного сечения образца по условию нежимаемости материала. За счет этого S_1 несколько увеличилось за период сложного нагружения.

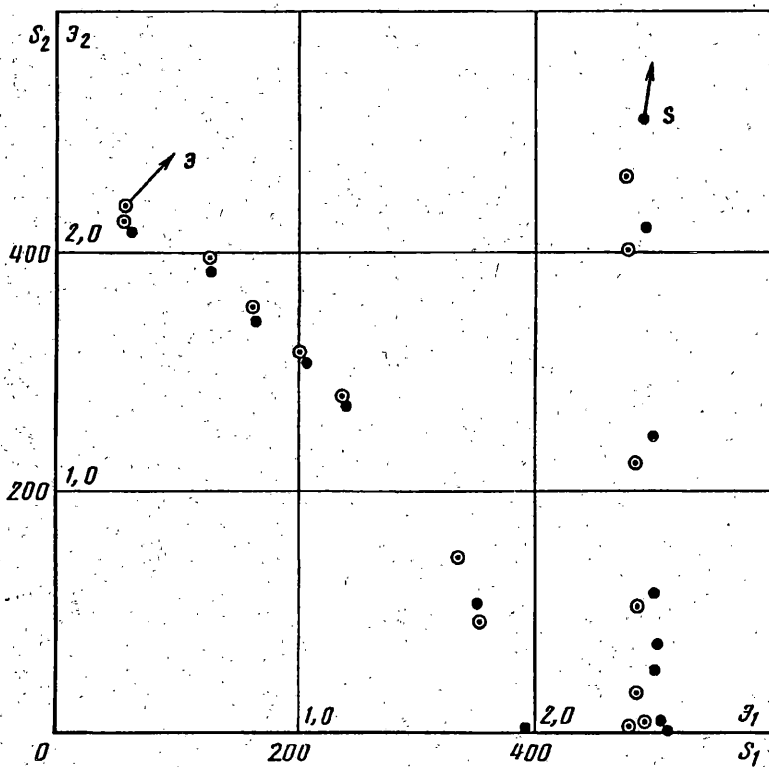
На фиг. 2 представлены результаты испытаний трубчатого образца из стали 30ХГСА на растяжение с кручением. Растянутый за предел текучести образец нагружали вдоль окружности в координатах S_1 — S_3 . Соответствующая этому пути нагружения траектория деформирования изображена точками. Вектор z даже не имеет тенденции лечь на траекторию нагружения. Такой тенденцией обладает лишь вектор s по отношению к траектории деформирования.

На фиг. 3 изображены результаты испытаний образца из стали 30ХНЗА в условиях двухосного растяжения. Траектория нагружения и соответствующая ей траектория деформирования имеют те же обозначения, что и на предыдущих фигурах. Модуль же вектора напряжений в зависимости от модуля вектора деформаций обозначен значком Q , а начала сложных нагружений — значком \otimes . Последних было осуществлено два.

В опыте измеряли осевую и окружную деформации, а радиальную вычисляли



Фиг. 3



Фиг. 4

по закону Гука для объемной деформации. Значения S_1 и S_2 подсчитаны с учетом изменения поперечных размеров образца.

На первом этапе сложного нагружения траектория нагружения в условных координатах представляла часть дуги окружности. За период прохождения ее \mathcal{E} увеличилось на 0,69%. На втором этапе сложного нагружения S возрастало и сравнительно быстро зависимость $S(\mathcal{E})$ стала такой, как если бы не было первого этапа сложного нагружения.

Легко убедиться, что направления векторов s и \mathcal{E} в соответствующих точках практически совпадают на всех участках траектории нагружения. Это означает пригодность теорий малых упругопластических деформаций для описания напряженного состояния σ_{ij} от деформированного состояния ϵ_{ij} .

Результаты непосредственной проверки теории приведены в [2]. За исходную кривую $S(\mathcal{E})$ была принята кривая деформирования, полученная в опыте на растяжение. Качественно теория правильно описывает опытные зависимости $\sigma_{ij}(\epsilon_{ij})$, количественно же получены некоторые расхождения, обусловленные не полным совпадением исходной кривой с кривой в рассматриваемом случае сложного напряженного состояния. После введения поправки на несовпадение количественное расхождение с опытом заметно уменьшилось.

В последнем опыте оси тензора напряжений σ_{ij} не меняли своего направления и при сложном нагружении. Направление векторов s и \mathcal{E} фактически одинаковы. Запаздывание же скалярных свойств приходится на участок сложного нагружения, на котором S практически оставалось постоянным.

На отожженной стали 45 в условиях двухосного растяжения были выполнены опыты, в которых была задана ортогональная траектория деформирования в координатах $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$ и определена соответствующая ей траектория нагружения. Второй образец нагружали вдоль полученной траектории нагружения и получили соответствующую ей траекторию деформирования [11].

В разбираемой статье за S_k и \mathcal{E}_k приняты координаты Ильюшина, которые дают $S = \sqrt{2/3} \sigma_1$ и $\mathcal{E} = \sqrt{3/2} \epsilon_1$.

На фиг. 4 по данным таблицы, приведенной в [11], построены заданная траектория деформирования, изображенная точками с направлением вектора напряжений s в конечной точке, и соответствующая ей траектория нагружения, также изображенная точками, но без вектора. Кружками с вектором \mathcal{E} построена заданная траектория нагружения, близкая к ранее определенной, и соответствующая ей траектория деформирования, также изображенная кружками без вектора.

Без большой погрешности графики на фиг. 4 позволяют принять, что между траекториями $S(t)$ и $\mathcal{E}(t)$ существует взаимно однозначное соответствие.

При задании траектории деформирования вектор напряжений по простейшей некоторого пути практически ложится на эту траекторию. При задании же траектории нагружения вектор деформаций не имеет даже тенденции лечь на эту траекторию. Из фиг. 4 можно также усмотреть, что вектора s и \mathcal{E} , в отличие от наших аналогичных опытов (фиг. 3), не имеют одинакового направления в соответствующих точках.

Согласно упомянутой таблицы и фиг. 4 последнее звено траектории деформировано перпендикулярно оси абсцисс, а вектор напряжений в конце траектории нагружений наклонен к оси абсцисс на угол $82,4^\circ$. Разница в наклонах составляет всего $7,6^\circ$, в то время как разница в наклонах последнего звена траектории нагружения и вектора деформаций составляет $46,2^\circ$.

Из разбираемых опытов и ранее рассмотренных следует, что запаздывание векторных свойств, если, конечно, оно проявляется, имеет место только по отношению к траектории деформирования независимо от того какая траектория задана.

Данные упомянутой таблицы использованы для вычислений S и \mathcal{E} . Последние представлены в табл. 1. Она показывает, что при задании $S(t)$ и $\mathcal{E}(t)$ сложное

Таблица 1

$\Xi(t)$		$S(t)$	
S	Ξ	S	Ξ
388,5	2,56	390,2	2,55
367,9	2,53	364,7	—
368,5	—	367,5	2,45
363,0	2,52	366,0	2,43
371,3	2,54	375,7	2,44
382,8	2,56	388,7	2,48
406,4	2,78	412,8	2,67
423,9	3,24	430,8	3,12
436,1	3,54	443,5	3,32

нагружение и сложное деформирование сопровождается начальным и одновременным убыванием S и Ξ . При задании $\Xi(t)$ максимально Ξ упало на 1,6%, а S — на 6,6%. При задании же $S(t)$ Ξ упало на 4,7% и S на 6,2%. (Падение исчислено по отношению к начальным значениям Ξ и S).

Если принять во внимание, что процесс нагружения $S(t)$ осуществляется во времени и скорость ползучести максимальна в начальный момент излома траектории, то Ξ должно сначала возрасть, а не убывать. При задании траектории деформирования падение S в начальные моменты можно объяснить релаксацией напряжений, а вот убывание Ξ в эти моменты объяснению не поддается.

В [11] сделана ссылка на [12] без какого-либо анализа достоверности результатов, содержащихся в этой публикации. Последняя посвящена запаздыванию векторных и скалярных свойств стали 10.

Образцами служили цельнотянутые трубки с наружным диаметром 10,00 мм и толщиной стенки 0,60 мм. Для них отношение среднего радиуса R к толщине стенки h равнялось 4,7. При таком R/h разница в касательных напряжениях на наружной и внутренней поверхностях в упругой области составляет почти 12% по отношению к наибольшему напряжению. В пластической области эта разница будет меньше, но степень неоднородности касательных напряжений по толщине стенки не будет пренебрежительно малой.

Указано, что предел текучести в окружном направлении σ_{θ} на 10% больше предела текучести в продольном направлении σ_{zs} . Ранее степень анизотропии одним из авторов определялась некорректно, а именно: трубку разрезали на кольца, которые затем разрезали по образующей и распрямляли, получившиеся полоски после отжига растягивали, получали диаграмму деформирования и по ней определяли σ_{θ} и сравнивали с σ_{zs} [13].

Надо думать, что описанный способ определения σ_{θ} сохранен. Тогда возникает вопрос: как можно получить достоверную диаграмму растяжения путем испытания полоски длиной не более 27 мм?

Образцы в [12] деформировали кручением до $\gamma = 4\%$ ($\epsilon_1 = 2,31\%$) и после часовой выдержки подвергали деформированию путем роста P и убывания M под разными углами излома траектории. За счет выдержки γ увеличивалось, а на какую величину не указано.

По данным, приведенным в рассматриваемой статье, для нескольких случаев мы построили траектории нагружения и соответствующие им траектории деформирования. Во всех случаях эти траектории оказались криволинейными и заметно различающимися между собой.

Для I-го пути деформирования угол θ между вектором $\bar{\epsilon}_1$ и $\bar{\epsilon}$ близок к нулю при $\Xi = 2,7\%$, а при $\Xi \cong 6,2\%$ $\theta = 25^\circ$. Для 5-го пути $\theta \cong 0$ при $\Xi = 0,65\%$, а

3-й путь		$\Delta_1 \mathcal{E}$	4-й путь		$\Delta_1 \mathcal{E}$	5-й путь		$\Delta_1 \mathcal{E}$
S	\mathcal{E}		S	\mathcal{E}		S	\mathcal{E}	
147,4	2,31		134,3	2,31				
128,9	2,29		113,9	2,31		132,6	2,27	
112,6	2,28	0,04	94,8	2,30	0,02	72,6	2,26	
105,8	2,28		76,4	2,29		53,7	2,25	
99,7	2,28		60,7	2,28		36,7	2,24	0,06
91,0	2,27		48,0	2,27		24,6	2,23	
88,8	2,26		43,6	2,26	0,07	24,0	2,24	0,09
88,1	2,25	0,08	45,2	2,25		33,8	2,24	
89,1	—		54,9	2,24		41,1	2,21	
91,5	2,24		69,8	2,23		51,9	2,19	
95,6	2,24		78,5	2,22		88,2	2,16	0,15
106,9	2,23		87,1	2,20		108,7	2,08	
114	2,22	0,14	97,0	2,21	0,13	128,5	2,08	0,25
122,1	2,21		106,9	2,17		149,4	1,67	0,65
130,9	2,21		117,0	2,16		189,4	0,67	2,57
140,0	2,19		126,5	2,14		199,4	0,78	2,70
149,2	2,24		137,2	2,09		210,5	1,63	3,67
158,8	2,12		147,2	2,09		215,5	2,03	4,06
169,2	2,12		157,2	1,95		220,6	2,53	4,55
179,1	2,05	0,37	168,1	1,57	0,98	225,7	2,92	4,94
190,0	2,00	0,61	179,2	1,15	1,58	231,7	3,31	5,34
200,3	1,91	1,09	191,3	1,24	2,16	236,7	3,76	5,81
209,2	2,01	1,65	202,5	1,46	2,82			
222,1	2,27	2,37	214,6	1,96	2,99			
233,2	2,75	3,14	226,9	2,83	4,45			
244,2	3,57	4,32	240,2	3,87	5,56			
249,7	4,29	5,15	247,3	4,49	6,21			
255,2	5,17	6,08	253,6	5,46	7,23			
262,2	6,37	7,36						

при $\mathcal{E} = 3,76\%$, $\theta \cong 15^\circ$. В остальных случаях картина аналогичная. Из того, что в какой-то точке траектории деформирования $\theta = 0$ делать вывод об экспериментальном подтверждении принципа запаздывания векторных свойств нельзя. А авторы разбираемой статьи его сделали и даже привели значения следов запаздывания λ_b .

Для путей деформирования 3, 4 и 5 подсчитаны S и \mathcal{E} они приведены в табл. 2. В момент излома траектории деформирования $\mathcal{E}_1 = 0$ и $\mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_0 = 2,31\%$. После излома траектории компонентами вектора деформаций служат $\mathcal{E}_1 = \Delta \mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_3 = 2,31 - |\Delta \mathcal{E}_3|$. Поэтому $\Delta \mathcal{E}$ следует подсчитывать по формуле $\Delta \mathcal{E} = [(\Delta \mathcal{E}_1)^2 + (2,31 - |\Delta \mathcal{E}_3|)^2]^{1/2}$, не по формуле $\Delta \mathcal{E} = [(\Delta \mathcal{E}_1)^2 + (\Delta \mathcal{E}_3)^2]^{1/2}$, которая использована в [12] при определении следа запаздывания скалярных свойств стали.

В табл. 2 $\Delta_1 \mathcal{E}$ вычислено по второй формуле. Как видно, после излома $\Delta_1 \mathcal{E}$ постоянно растет, а \mathcal{E} убывает не только на стадии убывания S , но и его роста. Для 5-го пути деформирования, например, это убывание достигает величины 1,64%.

Для случая чистого кручения табличных данных S и \mathcal{E} не приведено, но

зато помещен график исходной кривой $S(\mathcal{E})$ при кручении, по которому определены ординаты для $\mathcal{E} = 2,31, 3,4$ и 5% с округлением порядка 5 МПа. Сопоставление этих ординат с данными табл. 2 показывают, что кривые $S(\mathcal{E})$ располагаются выше кривой кручения. Разница в ординатах достигает 30% для 3-го пути, для которого длину следа запаздывания λ_c -авторы нашли равным $0,6\%$. В двух остальных случаях они считают $\lambda_c = \infty$.

Т. к. кривые $S(\mathcal{E})$ во всех рассмотренных случаях не совпадают с исходной кривой после излома, то о запаздывании скалярных свойств не может идти и речи. Таким образом выводы авторов о запаздывании векторных и скалярных свойств стали находятся в противоречии с их опытными данными.

В [12] приведены таблицы значений S_3 и $\Delta\mathcal{E}_3$ при полной разгрузке трубки, деформированной до $\mathcal{E}_3 = 2,31\%$, а затем вновь закрученной (6-й путь). Семь верхних точек лежат на прямой с наклоном 160 ГПа. Он на 32% меньше $3G = 235,4$ ГПа. (G — упругий модуль сдвига стали). Семь нижних точек при повторном кручении противоположного знака расположены вблизи прямой, имеющей наклон около 63 ГПа, который составляет $0,27$ от $3G$. Весьма большие изменения наклонов по отношению к $3G$ находятся в противоречии с опытами других исследователей.

В [11] отсутствуют таблицы данных, кроме одной, использованной ранее, по которым можно было бы построить траектории деформирования и соответствующие им траектории нагружения. По этой причине невозможно исследовать запаздывание скалярных свойств стали 45 в координатах $S-\mathcal{E}$, а не в $S-\Delta\mathcal{E}$, как это сделано авторами.

Зависимость $S(\mathcal{E})$ представляет собой закон упрочнения материала при сложном напряженном состоянии. Под следом запаздывания скалярных свойств следует понимать приращение \mathcal{E} после излома траектории, по исчерпанию которого опытные точки будут располагаться вблизи кривой $S(\mathcal{E})$, полученной в результате простого нагружения.

Вместо исследований разных эмпирических зависимостей типа $\varphi^*(\Delta S)$ и др. в [11] следовало бы рассмотреть конкретные зависимости между S и \mathcal{E} после исчерпания следа запаздывания векторных свойств, подсчитать по ним σ_y и ϵ_y и сопоставить с полученными опытными данными. Это сопоставление поможет уточнить и значение λ_b .

Таким образом, запаздывание векторных свойств наблюдается только в отношении траектории деформирования независимо от того она задана или траектории нагружения; след запаздывания скалярных свойств λ_c следует определять по зависимости $S(\mathcal{E})$, а не по зависимости $S(\Delta\mathcal{E})$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильющин А. А. Пластичность, ч. 1. Уругопластические деформации, 1948, 376 с.
2. Жуков А. М. Некоторые особенности поведения металлов при уругопластическом деформировании. Кн. «Вопросы теории пластичности», 1961, с. 30—57.
3. Жуков А. М. Поведение отожженной малоуглеродистой стали при растяжении с постоянными скоростями нагружения. Сб. тр. Мосстанкина «Расчеты на прочность и жесткость», 1977, с. 123—130.
4. Жуков А. М. Ползучесть металлов при комнатной температуре после малой частичной разгрузки. Кн. Прочность, пластичность и вязкоупругость материалов и констр. Свердловск, 1986, с. 64—68.
5. Ильющин А. А. О приращении пластической деформации и поверхности текучести. ПММ. 1960, т. 24, № 4, с. 663—666.
6. Ильющин А. А. О связи между напряжениями и малыми деформациями в механике сплошных сред, ПММ, 1954, т. 18, № 6, с. 641—666.
7. Жуков А. М. О коэффициенте Пуассона в пластической области. Изв. АН СССР. ОТН, 1954, № 2, с. 86—91.

8. *Shelton A., Ford H.* The contraction ratio for workhardning materials. J. Iron and Steel Inst., 1956, V. 182, part 2, pp. 160—168.
9. *Ленский В. С.* Экспериментальная проверка законов изотропии и запаздывания при сложном нагружении Изв. АН СССР. ОТН. 1958, № 11, с. 15—24.
10. *Ленский В. С.* Некоторые новые данные о пластичности металлов при сложном нагружении. Изв. АН. СССР. ОТН. Мех. и машиностр., 1960, № 5, с. 93—100.
11. *Лебедев А. А., Ковальчук Б. И., Кульчицкий Н. М., Хакимов А. Ф.* Экспериментальное исследование процессов деформирования стали по двухзвенным траекториям. Пробл. прочности, 1988, № 3, с. 7—10.
12. *Шишмарев О. А., Щербо А. Г.* Исследование некоторых сложных процессов нагружения стали с разгрузками. Прикл. мех., 1982, т. 18, № 3, с. 65—70.
13. *Шишмарев О. А.* Влияние вида девиатора напряжений на пластическое деформирование стали. Инж. ж. МГТ, 1966, № 5, стр. 112—118.

Москва

Поступила в редакцию
12.VI.1989