

УДК 539.0

## ВЛИЯНИЕ ОСЕВОГО СЖАТИЯ И КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА НА ЛОКАЛИЗАЦИЮ ДЕФОРМАЦИЙ И РАЗРУШЕНИЕ ПРИ СЛОЖНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ СТЕРЖНЕЙ ИЗ ОРГСТЕКЛА

Е. В. Карпов, А. Ю. Ларичкин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск  
E-mails: evkarpov@mail.ru, larichking@gmail.com

Проведены экспериментальные исследования деформирования и разрушения стержней из оргстекла (полиметилметакрилата) при сложном нагружении (квазистатическое и циклическое кручение при осевом сжатии). Установлено существование диапазона критических значений осевого напряжения, в котором происходит разрушение стержня крутящим моментом. Обнаружена локализация “замороженных” высокоэластических деформаций при стесненном циклическом кручении, определены условия ее возникновения. Показано влияние осевого напряжения на локализацию деформаций и разрушение, а также влияние циклического кручения на потерю устойчивости стержня, находящегося под действием осевого сжатия.

**Ключевые слова:** сложное нагружение, стесненное кручение, малоцикловая усталость, оргстекло, “замороженная” высокоэластическая деформация, разрушение, локализация деформаций.

**Введение.** При деформировании конструкций их элементы нередко подвергаются сложному нагружению, в результате чего первоначально изотропные материалы приобретают анизотропные свойства. При этом одна из компонент нагрузки может являться основной причиной разрушения, в то время как остальные оказывают влияние на процессы необратимого изменения, а следовательно, на прочность и усталостную долговечность конструкции. Таким образом, исследование особенностей поведения материалов при сложном нагружении является актуальной задачей [1–6].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния осевого сжатия и кручения на деформирование и разрушение цилиндрических стержней из оргстекла. Как известно, даже при комнатной температуре оргстекло способно выдерживать без образования трещин очень большие деформации сжатия. Разрушение длинного стержня при сжатии происходит вследствие потери устойчивости, когда в образующихся областях растяжения возникают трещины. Деформации сжатия, которых удастся достичь без потери устойчивости, невелики, поэтому в случае сжатия с кручением основной причиной разрушения являются деформации сдвига, возникающие под действием крутящего момента. При сжимающем напряжении, превышающем предел пропорциональности, оргстекло испытывает высокоэластические деформации. При нагреве до темпера-

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00481).

тур, близких к температуре формования (выше  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), эти деформации восстанавливаются как упругие. Однако при комнатной температуре высокоэластические деформации “замораживаются” и незначительно отличаются от пластических, поэтому далее они называются пластическими с учетом того, что при таком типе деформирования внутренняя энергия в материале накапливается, а не рассеивается, как при действительно пластическом. Вследствие этого при циклическом деформировании происходят изменения состояния материала двух типов: накопление внутренней энергии (остаточных напряжений) и накопление повреждений. Момент появления и местонахождение области накопления повреждений легко идентифицируются, поскольку в ней происходит помутнение поверхности прозрачного материала.

**Методика проведения экспериментов.** Эксперименты проводились на электро-механической универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100 с дополнительным устройством для кручения. Испытывались цилиндрические образцы с квадратными головками, имеющие диаметр 10 мм и длину рабочей части 42 мм. Сжатие осуществлялось путем перемещения траверсы со скоростью 1 мм/мин, кручение — путем поворота захвата со скоростью 25 град/с. Использовались следующие схемы нагружения: 1) сжатие до заданного напряжения  $\sigma^*$  с последующим квазистатическим кручением без изменения длины образца; 2) сжатие по схеме 1 с заменой квазистатического кручения циклическим с минимальным углом закручивания  $\varphi_{\min} = 0$  и различными максимальными значениями угла  $\varphi_{\max}$ ; 3) нагружение по схеме 2 при различных значениях  $\sigma^*$  и фиксированных  $\varphi_{\max}$ ; 4) нагружение по схеме 3, в которую добавлено сжатие после каждого цикла до достижения значения  $\sigma^*$ ; 5) нагружение по схеме 4, в которую добавлена выдержка по времени после каждого цикла нагружения. Кроме того, проведены испытания на одноосное квазистатическое сжатие, чистое кручение и эксперименты по определению релаксации сжимающего напряжения.

При циклическом кручении на этапе закручивания образуются остаточные крутильные деформации, поэтому при возврате к значению  $\varphi_{\min} = 0$  возникает реакция образца в виде отрицательного крутящего момента. Далее модуль этого момента обозначается через  $M_0$ , а момент при  $\varphi = \varphi_{\max}$  — через  $M_{\max}$ .

**Анализ закономерностей изменения осевого напряжения и крутящего момента при деформировании.** На рис. 1, 2 приведены зависимости момента от угла закручивания при чистом кручении и осевого напряжения от продольного относительного удлинения при одноосном сжатии. На рис. 1 отмечены использованные в циклических испытаниях значения угла  $\varphi = \varphi_{\max}$ . Первые два значения  $\varphi_{\max} = 60, 75^{\circ}$  соответствуют состояниям, когда в сечении стержня имеются внешняя пластическая и внутренняя упругая области, третье  $\varphi_{\max} = 90^{\circ}$  — распространению пластического состояния во всем сечении, четвертое  $\varphi_{\max} = 120^{\circ}$  — развитым пластическим деформациям во всем сечении стержня. Угол, при котором происходит разрушение после выхода момента на горизонтальный участок кривой, является условным, поскольку зависит от начального состояния поверхности и точности изготовления образца (области перехода между рабочей частью и головками). При сжатии ниспадающие участки кривых на рис. 1, 2 соответствуют не переходу в пластическое состояние, а потере устойчивости стержня. На этих кривых отмечены напряжения, соответствующие значениям  $\sigma^*$ , при которых проводились эксперименты. Поскольку осевое сжатие невелико и площадь поперечного сечения изменяется незначительно вплоть до момента появления развитой локализации деформаций, осевая нагрузка задается условными напряжениями, рассчитанными по начальной площади поперечного сечения.

На рис. 3 приведены типичные кривые сложного циклического нагружения. Максимумы и минимумы на кривой 1 соответствуют максимальному и минимальному значениям угла закрутки в цикле.

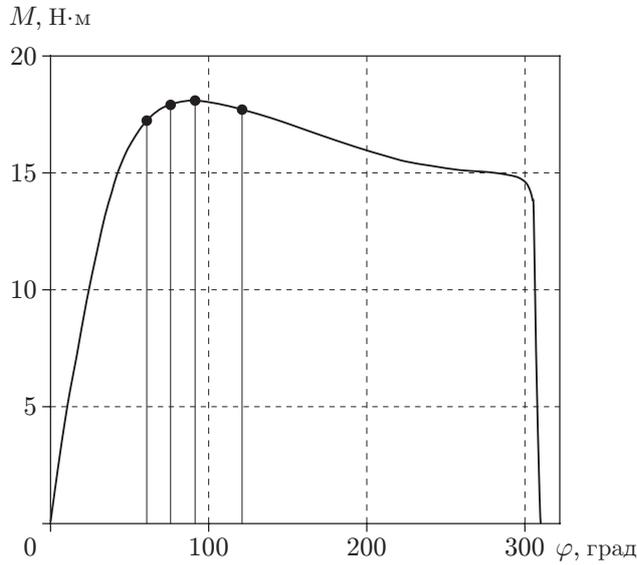


Рис. 1

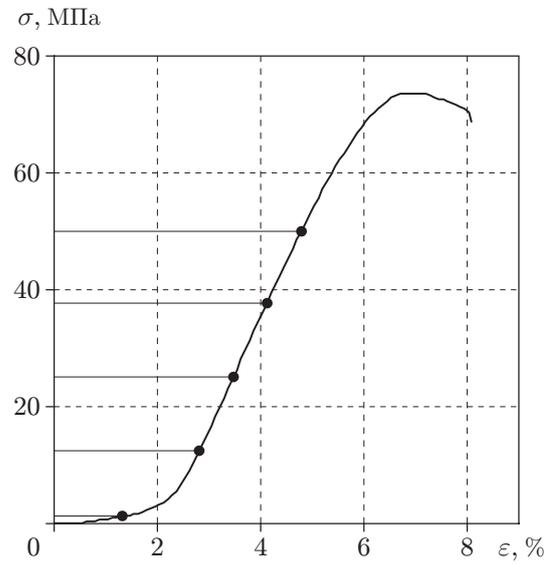


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость крутящего момента  $M$  от угла закрутки  $\varphi$  при чистом кручении

Рис. 2. Зависимость осевого сжимающего напряжения  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$

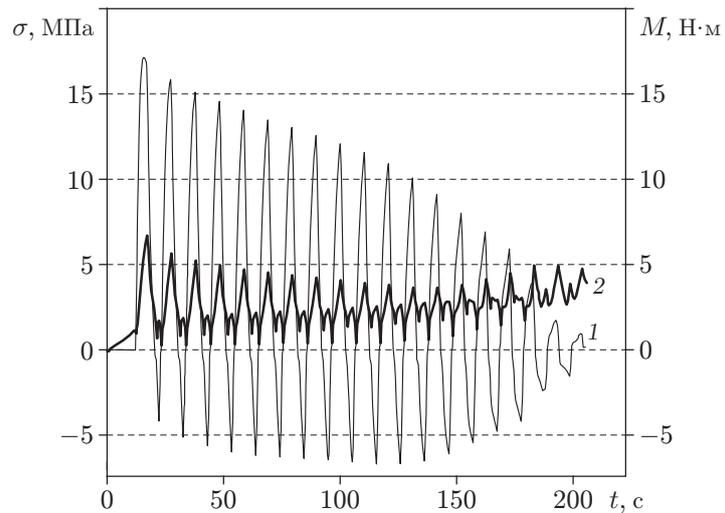


Рис. 3. Типичные кривые сложного циклического нагружения:  
 1 — зависимость момента от времени, 2 — зависимость осевой нагрузки от времени при постоянной продольной деформации

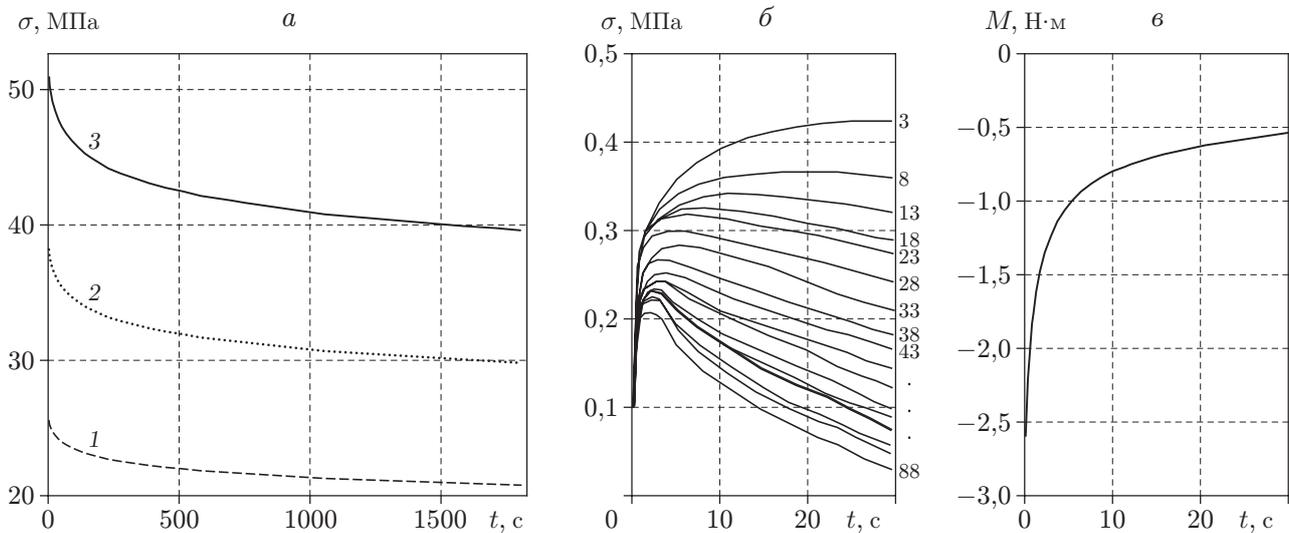


Рис. 4. Кривые релаксации:

*a* — релаксация напряжения после одноосного сжатия (1 —  $\sigma_0 = 25$  МПа, 2 —  $\sigma_0 = 38$  МПа, 3 —  $\sigma_0 = 52$  МПа), *б* — релаксация напряжения в процессе выдержки между циклами нагружения (цифры справа — номера циклов), *в* — релаксация крутящего момента в процессе выдержки между циклами нагружения

Поскольку большинство испытаний проводилось при постоянной продольной деформации, достигнутой после приложения осевого напряжения  $\sigma^*$ , релаксация осевого напряжения оказывает влияние на напряженное состояние. Поэтому были проведены эксперименты по определению релаксации осевого напряжения в случае одноосного сжатия, результаты которых представлены на рис. 4, *a*. Кривые релаксации достаточно точно описываются законом

$$\sigma(t) = \sigma_0(1 - at^{1/b}), \quad (1)$$

где  $a = 0,03$ ;  $b = 4$ ;  $\sigma_0$  — начальное напряжение. Этот закон позволяет оценить возможное уменьшение осевой нагрузки, обусловленное только длительностью эксперимента без учета влияния крутящего момента.

Изменения, происходящие в материале при сложном циклическом нагружении, оказывают влияние на релаксацию осевого напряжения. На рис. 4, *б, в* приведены кривые релаксации осевого напряжения и крутящего момента при выдержке в эксперименте по схеме 5 с выдержкой 30 с. Напряжение и момент приведены не во всем диапазоне их значений, а в некотором характерном интервале изменений, происходящих в процессе выдержки. Зависимость  $\sigma(t)$  эволюционирует от цикла к циклу по мере изменения напряженно-деформированного состояния и свойств материала. При этом зависимость  $M(t)$  остается практически неизменной.

На рис. 5 представлены фотографии разрушенных образцов, соответствующие различным схемам нагружения. На рис. 5, *a* приведена типичная система винтовых трещин, распространяющихся от очага в неповрежденную область. На рис. 5, *б* показаны два характерных типа повреждений, развивающихся в области локализации деформаций при циклическом кручении: ориентированные в поперечном направлении цепи разнонаправленных микротрещин и одиночные крестообразные трещины, раскрывающиеся при циклическом нагружении.

На рис. 6 приведены зависимости осевого напряжения и крутящего момента от времени при испытании по схеме 1, а также кривые релаксации  $\sigma(t)$ , полученные по формуле (1)

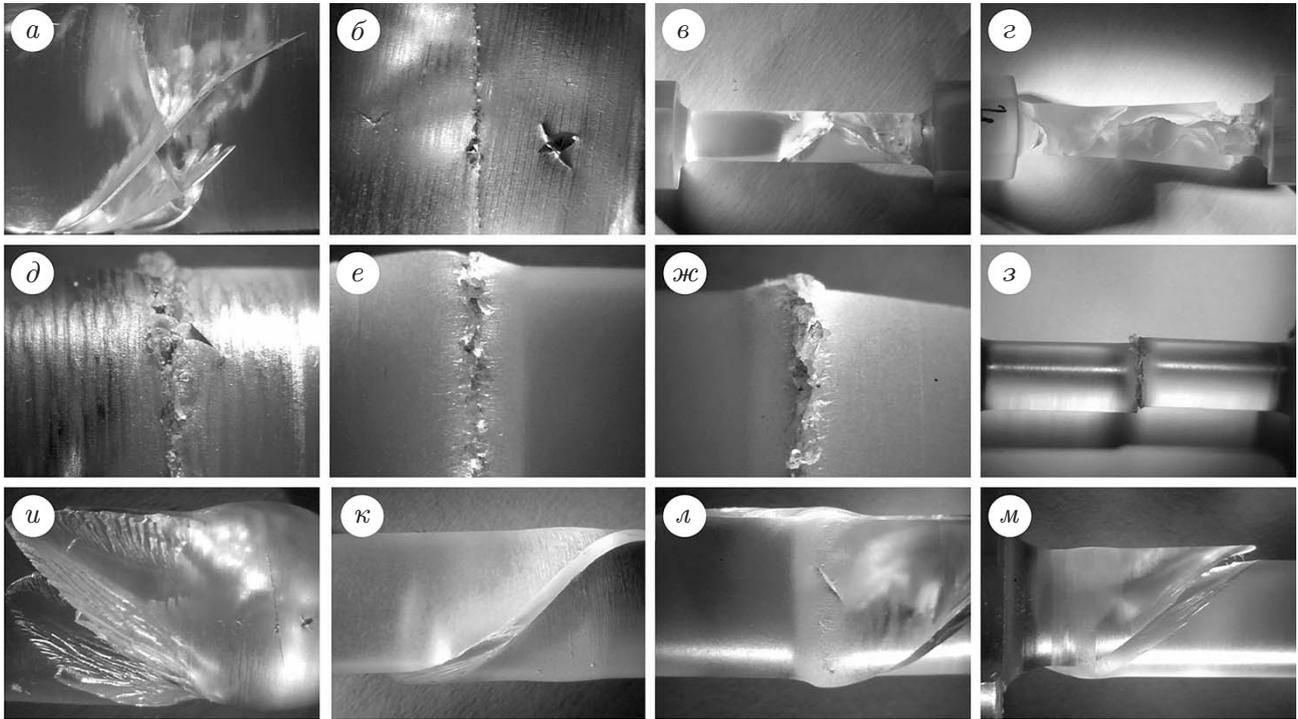


Рис. 5. Разрушение стержней из оргстекла при различных схемах нагружения

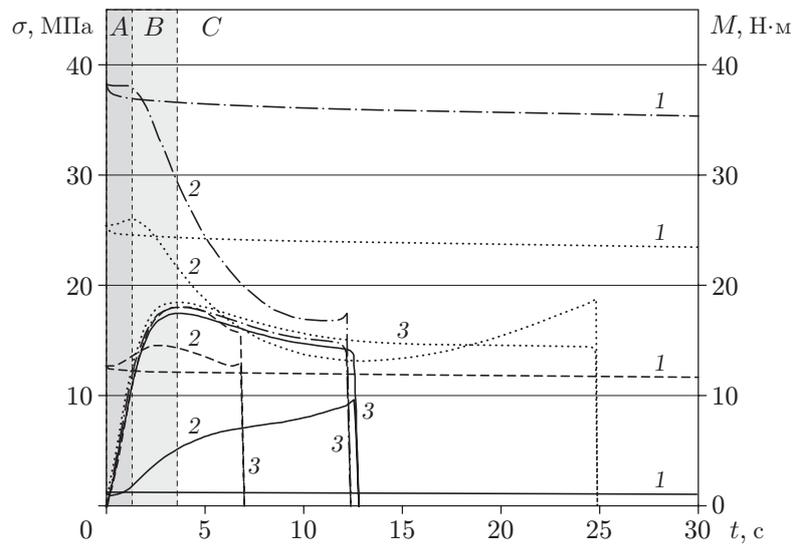


Рис. 6. Нагружение образцов по схеме 1:

сплошные линии —  $\sigma^* = 1,25$  МПа, штриховые —  $\sigma^* = 12,5$  МПа, пунктирные —  $\sigma^* = 25$  МПа, штрихпунктирные —  $\sigma^* = 38$  МПа; 1 — кривые релаксации  $\sigma(t)$  в отсутствие кручения, 2 — осевое напряжение  $\sigma(t)$  при стесненном кручении, 3 — момент  $M(t)$  при стесненном кручении; A — область упругого состояния стержня, B — область развития пластических деформаций в направлении от поверхности к оси стержня, C — пластическое деформирование всего сечения

при  $\sigma_0 = \sigma^*$ . Видно, что осевое напряжение (независимо от его начального значения) стремится к значению, принадлежащему некоторому диапазону, где происходит разрушение образца крутящим моментом. Далее этот диапазон будем называть критическим.

Как отмечено выше, разрушение может произойти в любой точке горизонтального участка кривой  $M(t)$  в зависимости от состояния поверхности образца. На рис. 6 на пунктирной кривой 3  $M(t)$  имеется горизонтальный участок большой протяженности, которому соответствует восходящий участок пунктирной кривой 2  $\sigma(t)$ . Результаты сравнения с другими образцами показывают, что точка, в которой начинается восходящий участок, соответствует моменту, предшествующему разрушению с образованием винтовой трещины. Это позволяет предположить, что вследствие более равномерного распределения микроповреждений поверхности участки пунктирных кривых 3, 2, соответствующие значениям  $t > 13$  с, имеют большую протяженность по сравнению с соответствующими участками кривых для других образцов. Данное предположение подтверждают результаты сравнения разрушенных образцов. На рис. 5, в, г показаны образцы, которым соответствуют штрихпунктирные и пунктирные кривые на рис. 6. Тип разрушения на рис. 5, в характерен и для других образцов с коротким горизонтальным участком кривой  $M(t)$ . При наличии длинного горизонтального участка трещина не развивается из одной конкретной точки, где оказался дефект, достаточный для инициации разрушения. Очаги разрушения распределены по образцу более однородно, что позволяет ему не разрушаться при больших углах закручивания. Таким образом, длина участка, на котором наблюдается рост осевой нагрузки, зависит лишь от состояния поверхности конкретного образца. Вероятно, проводя дополнительную обработку поверхности, можно уменьшить критический диапазон значений  $\sigma$ .

Участок кривой  $M(t)$ , предшествующий горизонтальному участку, при всех значениях  $\sigma^*$ , находящихся за пределами критического диапазона, имеет приблизительно одинаковую протяженность. Заметим, что при значении  $\sigma^* = 1,25$  МПа, находящемся в указанном диапазоне, разрушение происходит значительно быстрее.

Кроме того, на рис. 6 видно, что влияние релаксации, обусловленной постоянством продольной деформации образца, на осевое напряжение весьма незначительно.

На рис. 7 приведены результаты испытаний по схеме 2 при  $\sigma^* = 1,25$  МПа и различных значениях  $\varphi_{\max}$  ( $N$  — количество циклов нагружения).

При циклическом нагружении на определенном этапе появляется область локализации деформаций — опоясывающая стержень полоса помутнения поверхности материала, которая затем принимает бочкообразную форму. В этой области образуются повреждения, подобные показанным на рис. 5, б. Отношение длительности процесса локализации к общему времени нагружения зависит от значения  $\varphi_{\max}$ , т. е. от величины пластических деформаций стержня за один цикл. При  $\varphi_{\max} = 120^\circ$  это отношение близко к единице, при  $\varphi_{\max} = 90^\circ$  — к 1/2, при  $\varphi_{\max} = 75^\circ$  — к 1/3, при  $\varphi_{\max} = 60^\circ$  локализации деформаций не происходит, что приводит к существенному увеличению допустимого числа циклов нагружения. До момента начала локализации деформаций наблюдается трансляционное упрочнение материала — кривые 1, 2 на рис. 7 параллельны. Моменту начала локализации соответствуют перегибы этих кривых, причем кривая 2 на участке локализации имеет четко выраженный минимум. Во всех случаях локализация начинается при  $M_0 \approx 5$  Н·м. На рис. 5, з показан образец после нагружения при  $\varphi_{\max} = 120^\circ$  с областью локализации, имеющей минимальную ширину. При дальнейшем циклическом нагружении эта область превращается в опоясывающую образец цепь разнонаправленных микротрещин, продвигающихся от поверхности внутрь стержня.

Следует отметить, что по мере накопления внутренних напряжений при циклическом кручении амплитуда сопутствующих колебаний осевого напряжения уменьшается.

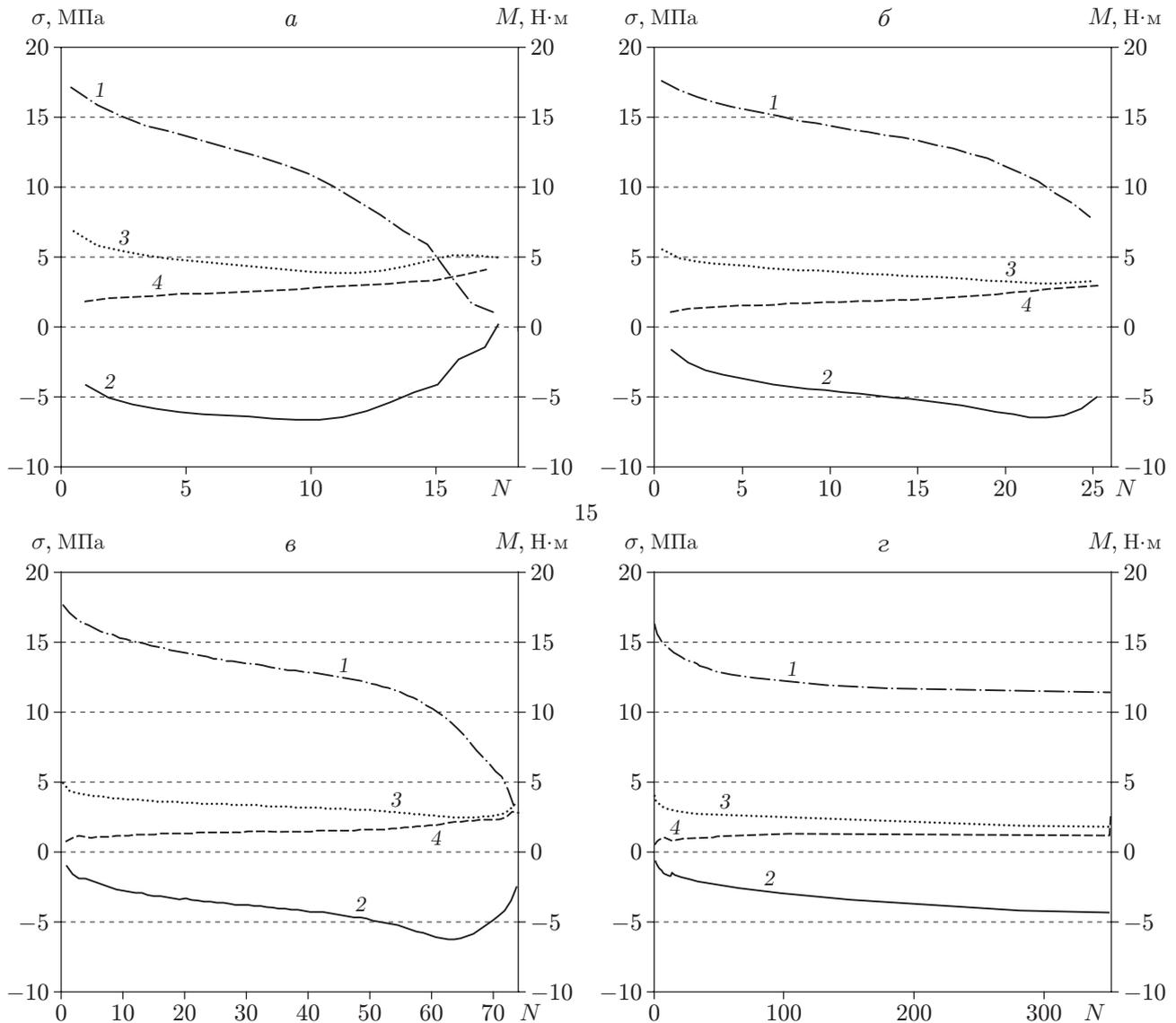


Рис. 7. Нагружение образцов по схеме 2:

$a - \varphi_{\max} = 120^\circ$ ,  $б - \varphi_{\max} = 90^\circ$ ,  $в - \varphi_{\max} = 75^\circ$ ,  $г - \varphi_{\max} = 60^\circ$ ; 1, 2 — момент  $M(N)$  (1 —  $\varphi = \varphi_{\max}$ , 2 —  $\varphi = \varphi_{\min}$ ), 3, 4 — осевое сжимающее напряжение  $\sigma(N)$  (3 —  $\varphi = \varphi_{\max}$ , 4 —  $\varphi = \varphi_{\min}$ )

На рис. 8 приведены результаты испытаний по схеме 3 при  $\varphi_{\max} = 75^\circ$  и различных значениях  $\sigma^*$ . В случае, когда  $\sigma^*$  существенно больше значений, принадлежащих критическому диапазону, наблюдается рассогласование фаз колебаний момента и сопутствующих колебаний осевого напряжения: максимальное и минимальное значения напряжения в цикле достигаются раньше, чем максимальное и минимальное значения момента. По мере приближения значения  $\sigma_{\max}$  к критическому диапазону рассогласование уменьшается и исчезает. При  $\varphi = \varphi_{\max}$  и  $\varphi = \varphi_{\min}$  кривые напряжения практически совпадают. Если значение  $\sigma^*$  меньше значений, принадлежащих критическому диапазону, или равно им, рассогласования фаз не наблюдается.

Чем больше отклонение  $\sigma^*$  от критического диапазона, тем большее количество циклов может выдержать образец до разрушения.

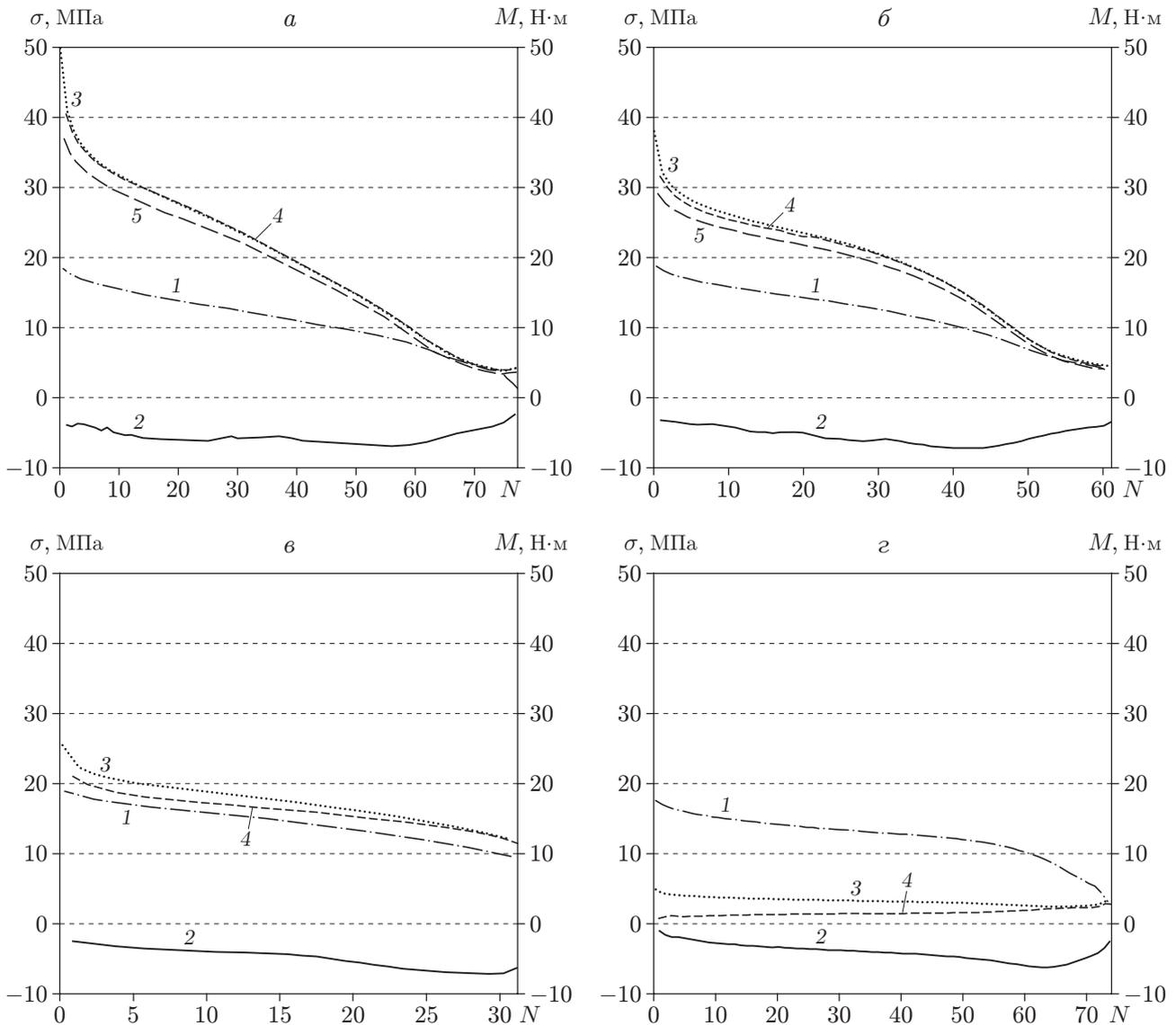


Рис. 8. Нагружение образцов по схеме 3:

$a$  —  $\sigma^* = 50$  МПа,  $b$  —  $\sigma^* = 38$  МПа,  $v$  —  $\sigma^* = 25$  МПа,  $z$  —  $\sigma^* = 1,25$  МПа; 1 — момент  $M(N)$  при  $\varphi = \varphi_{\max}$ , 2 — момент  $M(N)$  при  $\varphi = \varphi_{\min}$ , 3 — сжимающее осевое напряжение  $\sigma_{\max}(N)$ , 4 — сжимающее осевое напряжение при  $\varphi = \varphi_{\max}$  и  $\varphi = \varphi_{\min}$ , 5 — сжимающее осевое напряжение  $\sigma_{\min}(N)$

Кроме того, увеличение  $\sigma^*$  приводит к увеличению области локализации деформаций. На рис. 5,  $d, e, ж$  показаны области локализации с опоясывающей зоной разрушения при  $\sigma^* = 1,25; 38,00; 50,00$  МПа соответственно. При увеличении области локализации происходит более равномерное распределение образующихся дефектов, что обуславливает увеличение усталостной долговечности.

На рис. 9 приведены результаты испытаний по схеме 4 при  $\varphi_{\max} = 75^\circ$  и различных значениях  $\sigma^*$ . В этом случае при значениях  $\sigma^*$ , превышающих значения, принадлежащие критическому диапазону,  $\sigma^* = \sigma_{\max}$  и главной причиной разрушения становится не крутящий момент, а осевое напряжение, сопровождаемое кручением, поскольку при напряжении, существенно меньшем, чем при простом сжатии, происходит потеря устойчивости

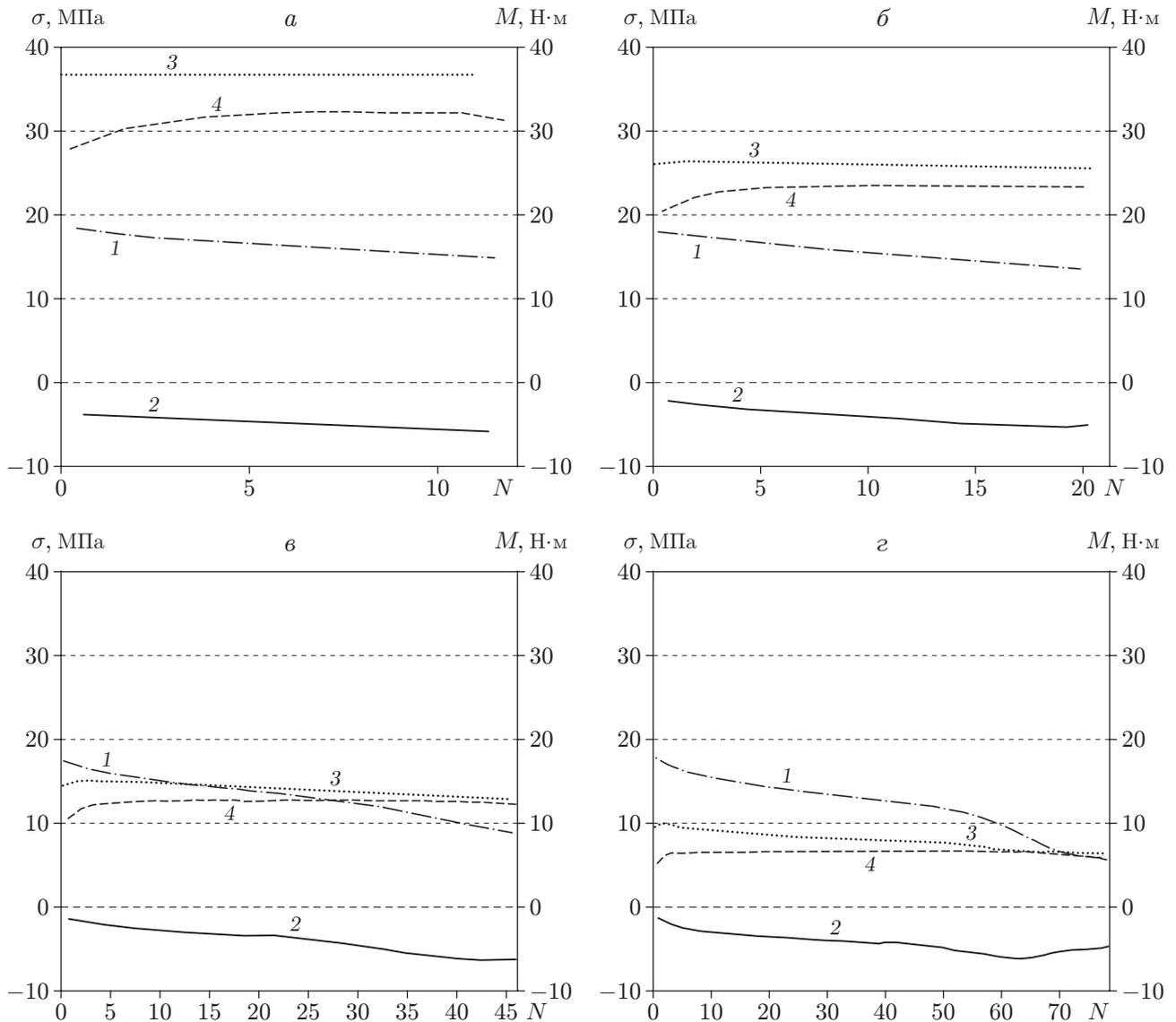


Рис. 9. Нагружение образцов по схеме 4 при различных значениях заданного напряжения:  
*a* —  $\sigma^* = 38$  МПа, *б* —  $\sigma^* = 25$  МПа, *в* —  $\sigma^* = 12,5$  МПа, *г* —  $\sigma^* = 6,25$  МПа; 1, 2 — момент  $M(N)$  (1 —  $\varphi = \varphi_{\max}$ , 2 —  $\varphi = \varphi_{\min}$ ), 3, 4 — напряжение  $\sigma(N)$  (3 —  $\varphi = \varphi_{\max}$ , 4 —  $\varphi = \varphi_{\min}$ )

стержня. Чем больше значение  $\sigma^*$  по сравнению со значениями, принадлежащими критическому диапазону, тем меньше число циклов кручения, при котором происходит потеря устойчивости. При  $\sigma^* = 6,25$  МПа образуется четко выраженная область локализации деформаций, в которой появляются отдельные трещины (см. рис. 5, *л*), при  $\sigma^* = 12,5$  МПа область локализации деформаций более размыта (см. рис. 5, *м*, а также рис. 9).

На рис. 10 приведены результаты испытаний по схеме 5. В этих испытаниях вследствие выдержки между циклами происходит релаксация момента  $M_0$  и напряжения  $\sigma_{\min} = \sigma(\varphi_{\min})$ . Увеличение времени выдержки, т. е. времени релаксации, приводит к уменьшению и исчезновению области локализации. На рис. 5, *и, к* показаны соответственно образцы, деформируемые с выдержкой между циклами 5 и 15 с. При выдержке 5 с об-

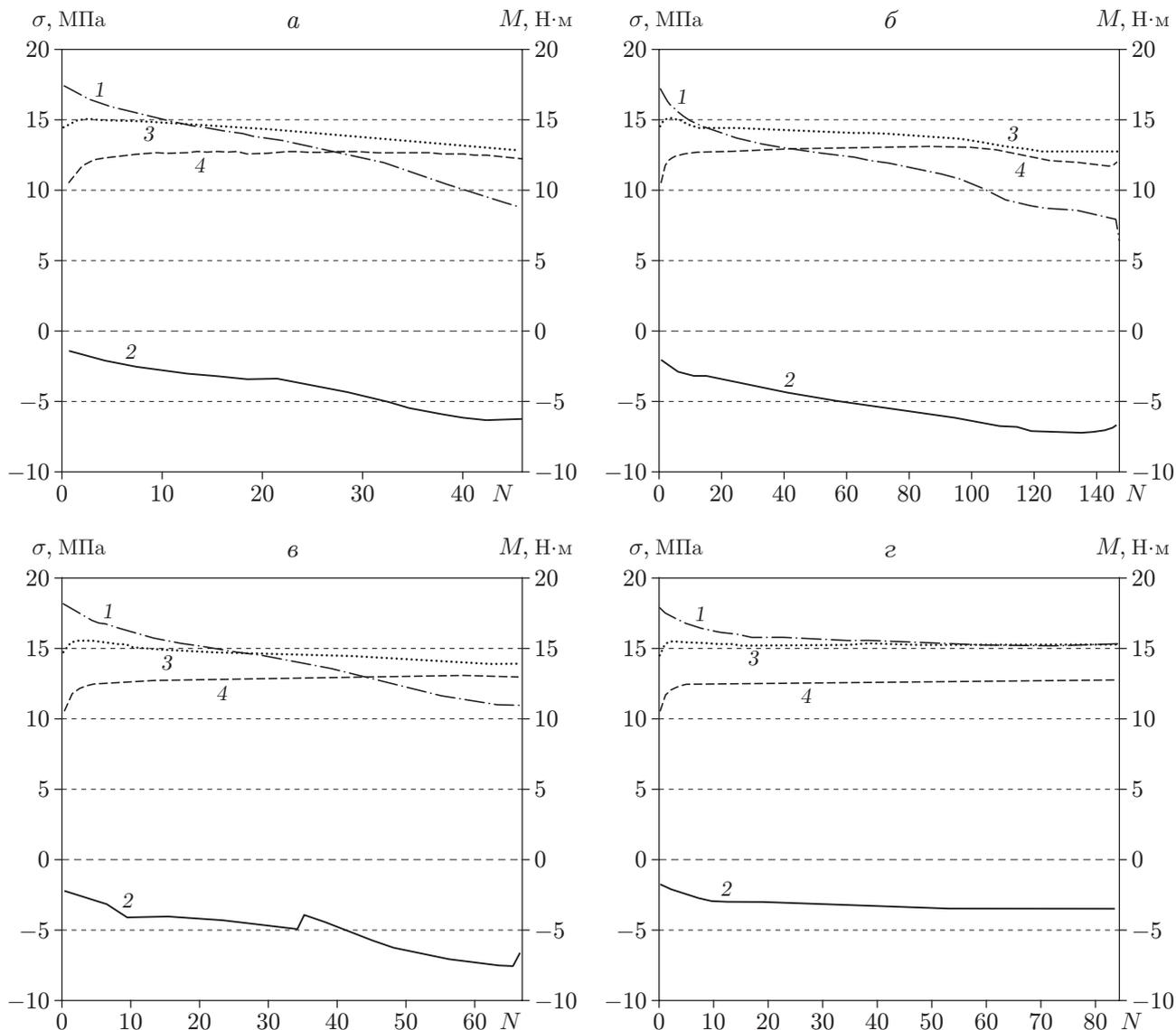


Рис. 10. Нагружение образцов по схеме 5 при различном времени выдержки между циклами:

$a - t = 0$ ,  $б - t = 5$  с,  $в - t = 15$  с,  $г - t = 30$  с; 1, 2 — момент  $M(N)$  (1 —  $\varphi = \varphi_{\max}$ , 2 —  $\varphi = 0$ ), 3, 4 — напряжение  $\sigma(N)$  (3 —  $\varphi = \varphi_{\max}$ , 4 —  $\varphi = 0$ )

ласть локализации выражена более четко, чем при выдержке 15 с. При выдержке 30 с эта область отсутствует. На рис. 10 видно, что в этом случае колебания как осевого напряжения, так и момента быстро стабилизируются.

Для релаксации осевого напряжения имелись условия и в ранее описанных экспериментах, поскольку в ходе циклического нагружения продольная деформация не меняется. Следовательно, локализация отсутствует вследствие релаксации момента  $M_0$ . Таким образом, при циклическом кручении локализация деформаций происходит при определенных значениях момента  $M_0$ . Этот вывод подтверждается также тем, что процесс локализации всегда начинается при  $M_0 \approx 5$  Н·м, но при различных значениях осевого напряжения. В случае релаксации в течение 30 с в каждом цикле это значение  $M_0$  не достигается.

Результаты сравнения образцов, осевое напряжение в которых задавалось в начале эксперимента (см. рис. 5,  $d-z$ ), и образцов, в которых осевое напряжение восстанавливалось в конце каждого цикла (рис. 5,  $u-m$ ), показывают, что в первом случае в области локализации образуется пояс мелких разрушений, увеличивающийся по мере нагружения, тогда как во втором случае в области локализации успевают образоваться лишь разрозненные мелкие трещины, а разрушение образца происходит скачкообразно с появлением винтовой трещины. Это свидетельствует о том, что к моменту времени, в который в области локализации начинаются микроразрушения, при нагружении второго типа в образце накапливается большая внутренняя энергия, чем при нагружении первого типа. Данное явление имеет место как при больших, так и при малых значениях  $\sigma^*$ , т. е. зависит не от величины приложенной осевой нагрузки, а от наличия или отсутствия возможности перераспределения при циклическом кручении создаваемых ею внутренних напряжений.

**Заключение.** Проведена серия экспериментов по циклическому кручению стержней из оргстекла при различных схемах продольного сжатия. Установлено существование критического диапазона осевого сжимающего напряжения, в котором происходит разрушение стержня крутящим моментом. Если в момент начала кручения значение осевой нагрузки находится за пределами этого диапазона, то оно приближается к указанному диапазону по мере увеличения угла закручивания. Попадание начальной осевой нагрузки в критический диапазон приводит к значительному уменьшению угла, при котором происходит разрушение.

Показано, что процесс циклического деформирования включает три этапа. На первом этапе накапливается внутренняя энергия, происходит уменьшение максимального крутящего момента  $M_{\max}$  и увеличение модуля минимального момента  $M_0$ , при этом их сумма не меняется (трансляционное упрочнение). Амплитуда сопутствующих колебаний осевого напряжения уменьшается. На втором этапе при достижении некоторого значения  $M_0$  (для выбранных в данной работе размеров образца  $M_0 \approx 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ) на поверхности образца формируется выпуклая область локализации деформаций, помутнение которой свидетельствует о наличии большого количества микрповреждений. Затем (после достижения минимума зависимости  $M_0(N)$ ) в области локализации деформаций появляются поверхностные повреждения, что приводит либо к постепенному разрушению образца с образованием опоясывающей цепи разнонаправленных мелких трещин, либо к катастрофическому разрушению с образованием винтовой трещины. Первый сценарий разрушения реализуется при начальном сжатии с последующим сохранением длины стержня, второй — при дополнительном сжатии в каждом цикле для восстановления начального напряжения. Выбор сценария не зависит от начального значения осевого напряжения  $\sigma^*$ . Для образования области локализации деформаций необходим определенный прирост “замороженной” высокоэластической деформации в каждом цикле, иначе разрушение будет происходить скачкообразно при достижении критического значения внутренней энергии, достаточного для развития имеющихся дефектов поверхности.

При дополнительном сжатии и циклическом кручении потеря устойчивости стержня происходит при значениях начального напряжения, превышающих значения, принадлежащие критическому диапазону.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аннин Б. Д., Данилов Н. С., Работнов Ю. Н. Машина на сложное нагружение с автоматическим программированием напряженного состояния // Инж. журн. Механика твердого тела. 1966. № 6. С. 161–162.
2. Аннин Б. Д. Поведение материалов в условиях сложного нагружения / Б. Д. Аннин, В. М. Жигалкин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.

3. **Аннин Б. Д.** Экспериментальное исследование пластических свойств материалов при сложном нагружении // Механика твердого тела. Варшава: Гос. науч. изд-во, 1978. С. 347–351.
4. **Аннин Б. Д.** Циклическое деформирование в условиях сложного нагружения // Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии: Тр. Всесоюз. совещ., Киев, 1977. Киев: Наук. думка, 1978. С. 113–116.
5. **Баев Л. В., Малинин Н. И.** Исследование ползучести оргстекла при совместном действии растяжения с кручением // Механика полимеров. Рига: Зинатне, 1966. № 5. С. 671–677.
6. **Баев Л. В.** О некоторых характеристиках ориентированного оргстекла // Динамика сплошной среды / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 1978. Вып. 34. С. 101–105.

*Поступила в редакцию 21/VI 2013 г.*

---