

## Влияние предварительного пластического деформирования на механические характеристики стали 45 и сплава Д16Т при статическом и циклическом нагружении

В. А. Дегтярев

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Приведены результаты экспериментального исследования закономерностей изменения пределов текучести и релаксации напряжений образцов из стали 45 и сплава Д16Т в зависимости от амплитуды напряжений и пластической деформации в условиях предварительного статического и циклического растяжения с учетом процесса деформационного старения. Показано, что с увеличением пластической деформации независимо от вида нагружения повышаются механические характеристики материалов, в то время как рост амплитуды напряжений приводит к их снижению. Установлено значение пластической деформации, по достижении которого независимо от вида предварительного нагружения пределы релаксации напряжений материалов становятся одинаковыми.*

**Ключевые слова:** статическое растяжение, асимметричный и симметричный циклы нагружения, пределы текучести и релаксации напряжений, амплитуда напряжений, пластическая деформация, деформационное старение.

**Введение.** Результаты исследования влияния предварительного статического и циклического нагружения на изменение механических свойств материалов (пределы упругости и текучести, длина площадки текучести) приведены в работах [1, 2]. Показано [3], что с увеличением предварительно накопленной пластической деформации предел текучести материалов повышается. О влиянии циклической нагрузки на механические свойства в литературных источниках имеются противоречивые сведения. В [2, 4] экспериментально доказано, что предварительная циклическая нагрузка при комнатной температуре приводит к снижению предела текучести, что связано с созданием упорядоченной дислокационной структуры, в то время как в [5] установлено повышение пределов текучести и прочности. Из практики известно [3], что указанные характеристики недостаточно определять после кратковременного нагружения без учета процесса деформационного старения. Комплексное влияние предварительной пластической деформации при статическом нагружении и деформационного старения приводит к повышению предела текучести [3]. В [3] также установлено, что при деформационном старении происходит рост пределов упругости и прочности, а также коэффициента упрочнения. Поэтому в качестве характеристики стабильности свойств материала предлагается использовать напряжение, зависящее от времени: либо предел ползучести  $\sigma_{\varepsilon/t}^T$ , либо предел релаксации напряжений  $\sigma_p$ , т.е. напряжение, при котором не происходит самопроизвольного деформирования материала конструкции. Информация о пределе релаксации напряжений имеет важное значение для эксплуатации сварных конструкций с высокими остаточными напряжениями (ОН). В случае если сумма

исходных сварочных ОН и напряжений от внешней нагрузки не превышает предел релаксации напряжений, то в процессе эксплуатации геометрические размеры конструкции изменяться не будут, так как не происходит релаксации ОН. Однако в литературных источниках отсутствуют сведения о комплексном влиянии предварительного циклического нагружения, пластической деформации и деформационного старения на механические свойства материалов.

Цель настоящего исследования заключалась в установлении закономерностей изменения пределов текучести и релаксации напряжений после предварительного статического и циклического нагружения при варьировании величиной накопленной пластической деформации и амплитудой напряжений с учетом деформационного старения.

**Испытательное оборудование и материалы.** Исследования по определению предела релаксации напряжений и предела текучести проводили после предварительного нагружения образцов в условиях статического или циклического растяжения при комнатной температуре на установке МИР-СТ [6]. Частота циклического нагружения составляла 35 Гц. Статическую и циклическую нагрузку измеряли динамометром, включенным в силовую цепь последовательно с образцом. При статическом нагружении удлинение образца определяли с помощью деформометра, установленного на образце. Применяли еще один способ измерения накопленной в образце пластической деформации. Это позволяло, располагая двумя независимыми способами, избежать случайной ошибки. Согласно второму способу длину образца измеряли до начала испытаний и после их окончания в специальном приспособлении.

Для повышения точности и достоверности измерения возникающих в процессе циклического нагружения в образце усилий и деформаций использовали специально изготовленную скобу с наклеенным на ее поверхности отградуированным тензорезистором, которую устанавливали на рабочую часть испытуемого образца.

Объектом исследования служили материалы с различными циклическими свойствами: циклически разупрочняющаяся сталь 45 и циклически стабильный сплав Д16Т. Из стали 45 изготавливали плоские образцы с рабочим сечением  $10 \times 3$  мм и длиной рабочей части 50 мм. При испытании на растяжение образцов из стали 45 установлены следующие механические свойства:  $\sigma_{\text{в}} = 664$  МПа,  $\sigma_{\text{т}} = 375$  МПа. Из сплава Д16Т изготавливали цилиндрические образцы диаметром рабочей части 7 мм и длиной 53 мм. Механические свойства данного сплава согласно справочным данным таковы [7]:  $\sigma_{\text{в}} = 538$  МПа,  $\sigma_{\text{т}} = 390$  МПа.

Для установления закономерностей изменения механических свойств образцов как от предварительно накопленной в них пластической деформации в условиях статического или циклического нагружения, так и от амплитуды предварительного циклического нагружения были разработаны соответствующие методики испытаний.

**Методика испытаний при статическом нагружении.** Для испытаний использовали несколько серий образцов, состоящих из 4–6 шт. Образцы вначале подвергали статическому нагружению, создавая в каждом одинаково-

вую величину пластической деформации  $\varepsilon_{пл}$ , которая варьировалась от серии к серии в пределах 0...3,5%. После предварительного нагружения их оставляли на два месяца для процесса естественного деформационного старения. Затем образцы подвергали статическому растяжению с целью определения предела релаксации напряжений согласно ГОСТ 26007-83 [8] в режиме поддержания постоянства максимальной деформации в процессе испытаний. Для этого в образцах создавали статическое напряжение  $\sigma_{ст}$  и следили за его уменьшением с течением времени, поддерживая суммарную деформацию постоянной. В каждом последующем образце создавали напряжение, которое несколько меньше исходного значения. Максимальное исходное напряжение составляло 0,8 предела текучести  $\sigma_T$ .

Обработка результатов испытаний на релаксацию напряжений во времени позволила установить предел релаксации. Время испытаний составляло не более 60 мин. Наблюдения автора, а также данные литературных источников [9] подтверждают тот факт, что при нормальной температуре процесс релаксации напряжений в сталях и сплавах протекает в течение нескольких десятков минут. Испытания показали, что чем выше исходное статическое напряжение, тем на большую величину оно снижается. Время затухания процесса релаксации также зависит от величины напряжения, но не превышает 40 мин. Особенно интенсивно процесс релаксации протекает в течение первых 3–6 мин. Предел текучести определяли согласно ГОСТ 1497-84 [10] по результатам испытаний на растяжение образцов каждой серии. Испытания образцов первой серии позволили определить предел релаксации напряжений и предел текучести в исходном состоянии, испытания образцов последующих серий – зависимость механических характеристик от величины предварительно накопленной пластической деформации.

**Методика испытаний при циклическом нагружении в условиях релаксации напряжений.** В выбранных сериях образцы предварительно нагружали в условиях симметричного или асимметричного цикла напряжений. Значение коэффициента асимметрии цикла  $R_\sigma$  варьировалось от серии к серии с целью оценки влияния предварительно накопленной пластической деформации при циклическом нагружении в условиях, когда поддерживалась максимальная деформация образца постоянной, на механические свойства материала.

При асимметричном цикле напряжений прежде, чем приложить к образцу симметричную нагрузку, прикладывали напряжение от статической нагрузки. Во всех сериях статическое напряжение было одинаковым – 300 МПа и составляло 0,8 предела текучести. Как показал эксперимент, при таком максимальном напряжении образец не деформировался с течением времени (находился под нагрузкой в течение 60 ч). Затем к образцу прикладывали симметричную циклическую нагрузку, которая также изменялась от серии к серии. Амплитуда напряжений цикла образцов из стали 45  $\sigma_a$  соответствовала 70, 150 и 250 МПа. В процессе испытаний фиксировали релаксацию статических напряжений, поддерживая максимальную деформацию образца постоянной. Как только процесс релаксации завершался, испытания останавливали. Следовательно, коэффициент асимметрии цикла  $R_\sigma$  изменялся не

только от серии к серии, но и в процессе испытания индивидуального образца и находился в пределах 0,3...0,65. Эксперимент показал, что время релаксации напряжений не превышало 20 мин, что соответствовало 42000 циклам нагружения. После предварительного циклического нагружения образцы оставляли на два месяца для процесса естественного старения. По истечении указанного срока их подвергали статическому растяжению с целью определения предела текучести и предела релаксации напряжений.

Перед проведением испытаний в условиях симметричного цикла для образцов каждой серии подбирались амплитуда напряжений  $\sigma_a$ , которая изменялась от серии к серии. Для образцов из стали 45  $\sigma_a = 70, 150$  и  $300$  МПа, для образцов из сплава Д16Т  $\sigma_a = 150$  и  $225$  МПа. При испытаниях с более высокой амплитудой напряжений цикла  $\sigma_a$  в образцах из сплава Д16Т развивались трещины усталости. После предварительного нагружения в течение 20 мин образцы оставляли на два месяца для процесса естественного старения. Затем определяли пределы текучести и релаксации напряжений.

Однако проведение испытаний в условиях релаксации напряжений, когда максимальная деформация образца поддерживалась постоянной, не позволило получить значительных пластических деформаций. Накопленная пластическая деформация образцов при максимальной амплитуде напряжений (250 МПа) в условиях асимметричного нагружения не превышала 0,12%. Поэтому методика проведения испытаний с целью установления закономерностей изменения пределов текучести и релаксации напряжений от предварительно накопленной в образце пластической деформации в условиях циклического нагружения была несколько изменена.

**Методика испытаний при совместном действии статического растяжения и разной амплитуды напряжений.** Испытывали образцы нескольких серий. Предварительное нагружение образцов одной серии проводили с заданной амплитудой напряжения, которая изменялась от серии к серии. В отличие от вышеизложенной методики испытаний, к образцу прикладывали заранее выбранную амплитуду симметричного цикла напряжений и, не останавливая нагружение, подвергали статическому растяжению, создавая тем самым пластическую деформацию. Изменяя продолжительность действия статической нагрузки, получали разную величину пластической деформации. К образцам из стали 45 прикладывали амплитуду напряжений 150 и 250 МПа, из сплава Д16Т – 225 МПа. В нашем случае коэффициент  $R_\sigma$  изменялся в процессе испытаний индивидуального образца. Значение полной деформации образца определяли компенсационным способом по прогибу балочки тарировочного устройства. По полученным данным, зная упругую составляющую, нетрудно рассчитать пластическую деформацию, по достижении которой испытания останавливали. Достоверность того, что в образце была достигнута наперед заданная пластическая деформация, проверяли прямым измерением длины образца в специальном устройстве до и после предварительного нагружения. Проведение предварительного нагружения подобным образом позволило создавать в образцах пластические деформации, во много раз превышающие деформацию, равную пределу текучести, вплоть до разрушения. При испытаниях ограничились максималь-

ным значением пластической деформации, не превышающим 3,5%. После деформационного старения образцы всех серий подвергали статическому растяжению с целью определения предела текучести и предела релаксации напряжений.

**Анализ результатов испытаний. Статическое растяжение.** На рис. 1 в качестве примера представлены диаграммы статического растяжения образцов из стали 45 и сплава Д16Т в исходном состоянии и после предварительного пластического деформирования. Если образец из стали 45 имеет площадку текучести и можно определить его физический предел текучести, то в образце из сплава Д16Т площадка текучести отсутствует.

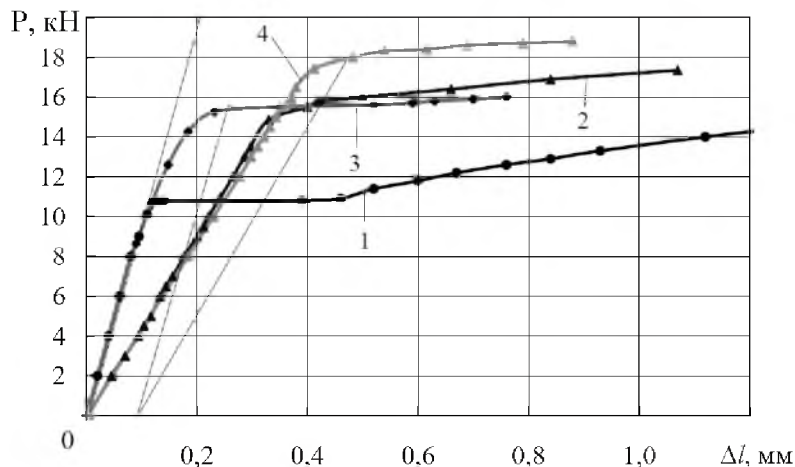


Рис. 1. Диаграммы статического растяжения образцов из стали 45 (1, 3) и сплава Д16Т (2, 4): 1, 2 – исходное состояние; 3 и 4 – после предварительного пластического деформирования  $\varepsilon_{пл} = 2,82$  и 1,9% соответственно.

Испытания показали, что в образцах из стали 45 по мере повышения предварительно созданной пластической деформации площадка текучести будет уменьшаться (на рис. 2 кривая 1). Из рис. 2 видно, что до величины  $\varepsilon_{пл} = 0,28\%$  длина площадки текучести уменьшается незначительно, с дальнейшим увеличением  $\varepsilon_{пл}$  уменьшение становится заметным и после  $\varepsilon_{пл} = 2,82\%$  площадка текучести уже отсутствует.

На рис. 1 (кривая 3) приведена диаграмма растяжения образца из стали 45, предварительно деформированного до  $\varepsilon_{пл} = 2,82\%$ . Обращает на себя внимание тот факт, что не только исчезает площадка текучести, но и повышаются напряжения, при которых достигается условный предел текучести. Аналогичная картина увеличения предела текучести  $\sigma_T$  наблюдается при испытаниях образцов из сплава Д16Т (кривая 4).

На рис. 3 показаны зависимости пределов текучести  $\sigma_T$  и пределов релаксации напряжений  $\sigma_p$  образцов из стали 45 и сплава Д16Т от величины предварительно накопленной пластической деформации при статическом растяжении. Видно, что по мере увеличения  $\varepsilon_{пл}$  значения  $\sigma_T$  и  $\sigma_p$  повышаются. Для образцов из стали 45 максимальное повышение  $\sigma_T$  составило 55%, для образцов из сплава Д16Т – 17%. При дальнейшем

увеличении  $\varepsilon_{пл}$  предел текучести исследуемых материалов несколько понижился, хотя и незначительно: для стали 45 это составило 4,5%, для сплава Д16Т – 2%.

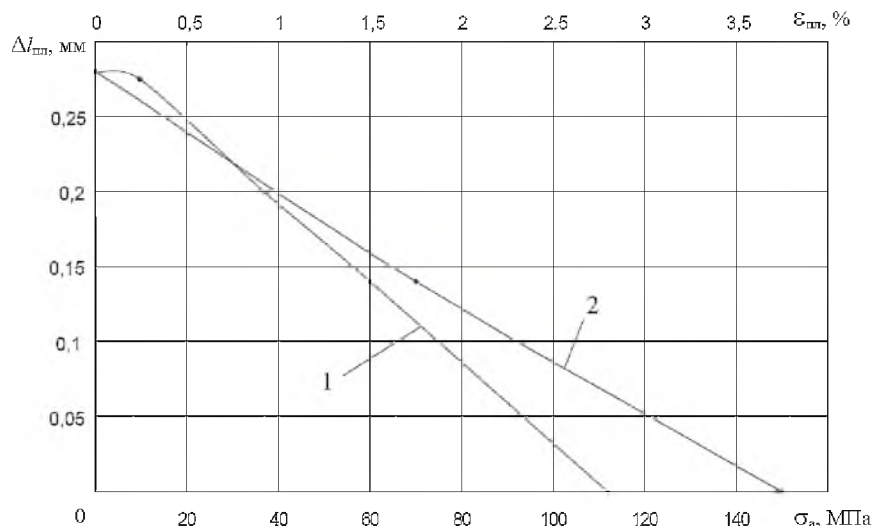


Рис. 2. Зависимость длины площадки текучести образцов из стали 45 от предварительно накопленной пластической деформации при статическом растяжении (1) и амплитуды предварительного циклического нагружения (2).

Настоящие исследования показали, что для максимального повышения  $\sigma_T$  существуют оптимальные значения пластической деформации  $\varepsilon_{пл}$ , дальнейшее увеличение которых не будет приводить к росту предела текучести. Из рис. 3 также видно, что увеличение предела релаксации напряжений  $\sigma_p$  образцов из стали 45 до значения  $\varepsilon_{пл} = 1,5\%$  происходит не так интенсивно, как после этого значения. Для образцов из сплава Д16Т после  $\varepsilon_{пл} = 1,9\%$  интенсивность повышения  $\sigma_p$  замедляется. Испытания свидетельствуют, что после создания предварительной пластической деформации, равной 3%, повышение предела релаксации напряжений  $\sigma_p$  образцов из стали 45 составило 21%, образцов из сплава Д16Т – 31%. Анализ полученных результатов показал, что для образцов из стали 45 в процентном отношении рост  $\sigma_T$  более чем в два раза выше, чем рост  $\sigma_p$ . Для образцов из сплава, наоборот, повышение  $\sigma_p$  почти в два раза превышает повышение  $\sigma_T$ . Оказалось, что для стали 45 более чувствительной характеристикой к изменению механических свойств является предел текучести, для сплава Д16Т – предел релаксации напряжений при испытаниях в условиях статического растяжения. Если для повышения предела текучести существует оптимальное значение пластической деформации, по достижении которого происходит даже некоторое его снижение, то повышение предела релаксации напряжений происходит во всем диапазоне изменения пластической деформации. Отношение предела текучести образцов из стали 45 к пределу текучести образцов из сплава Д16Т в исходном состоянии обозначим  $K_1$ , отношение пределов релаксации исследуемых материалов, полученных также в исходном состоянии, –  $K_2$ . Аналогично отношение пределов текучести и пре-

делов релаксации напряжений образцов, подвергнутых предварительному пластическому деформированию, – соответственно  $K_3$  и  $K_4$ . Получено, что численные значения коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  близки между собой:  $K_1 = 0,915$ ,  $K_2 = 0,93$ ,  $K_3 = 1,21$ ,  $K_4 = 0,87$ . В образцах из стали 45, подвергнутых предварительному деформированию, в результате значительного повышения предела текучести коэффициент  $K_3$  становится больше единицы. Отношение предела релаксации напряжений образцов из стали 45 к такому образцов из сплава Д16Т после предварительного нагружения практически такое же, как и в исходном состоянии.

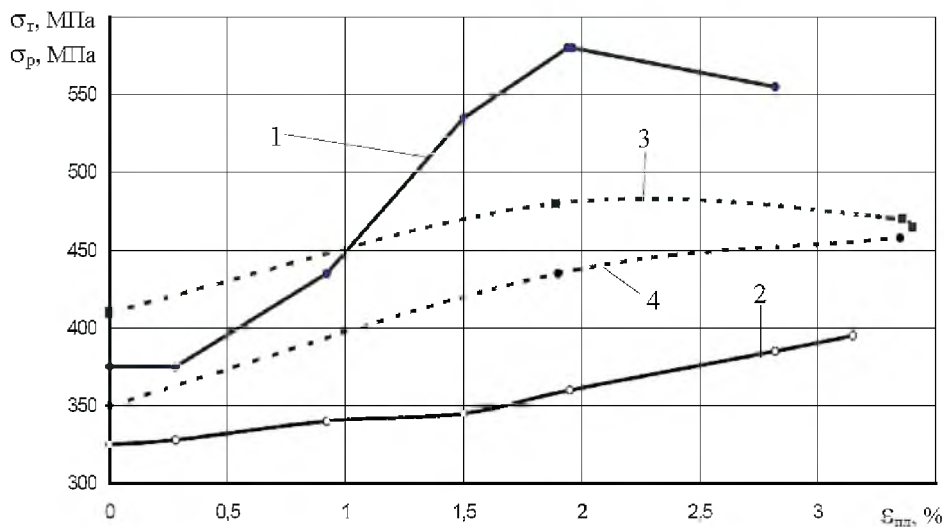


Рис. 3. Зависимость предела текучести (1, 3) и предела релаксации напряжений (2, 4) от предварительно накопленной пластической деформации при статическом растяжении образцов из стали 45 (сплошные линии) и сплава Д16Т (штриховые линии).

Анализ результатов испытания показал, что по достижении  $\epsilon_{пл} = 3,4\%$  кривые 3 и 4 (рис. 3) практически сходятся в одну точку. Это свидетельствует о том, что пределы текучести и релаксации напряжений образцов из сплава Д16Т имеют одинаковые значения. Для образцов из стали 45 в диапазоне изменения значений пластической деформации, в котором проводились исследования, этого не наблюдается.

*Циклическое нагружение в условиях релаксации напряжений.* На рис. 4 приведены зависимости предела текучести  $\sigma_T$  от амплитуды предварительного асимметричного и симметричного цикла напряжений, который изменялся в процессе испытаний, для образцов из стали 45 и сплава Д16Т. Видно, что по мере увеличения  $\sigma_a$  предел текучести линейно снижается. Для образцов из стали 45 это снижение составило 6%, для сплава Д16Т – 5,4% при одинаковых амплитудах напряжений. Интересно отметить, что предел текучести образцов из стали 45 после предварительного нагружения в условиях симметричного цикла при амплитуде напряжений 300 МПа лежит на прямой (на рис. 4 точка 3). Полученные результаты, с нашей точки зрения, представляют интерес для специалистов, занимающихся проблемой

виброобработки сварных конструкций с целью снижения в них сварочных ОН. До настоящего времени полагали [5], что циклическое нагружение приводит к повышению механических свойств сварных соединений, вследствие чего отрицательное влияние ОН на прочностные свойства конструкции и ее геометрическую стабильность уменьшается. Проведенные испытания образцов из циклически стабильного и разупрочняющегося материала не только не подтвердили этот факт, но и показали противоположный результат. Поэтому нельзя необоснованно создавать в виброобрабатываемой конструкции предельно достижимые циклические напряжения.

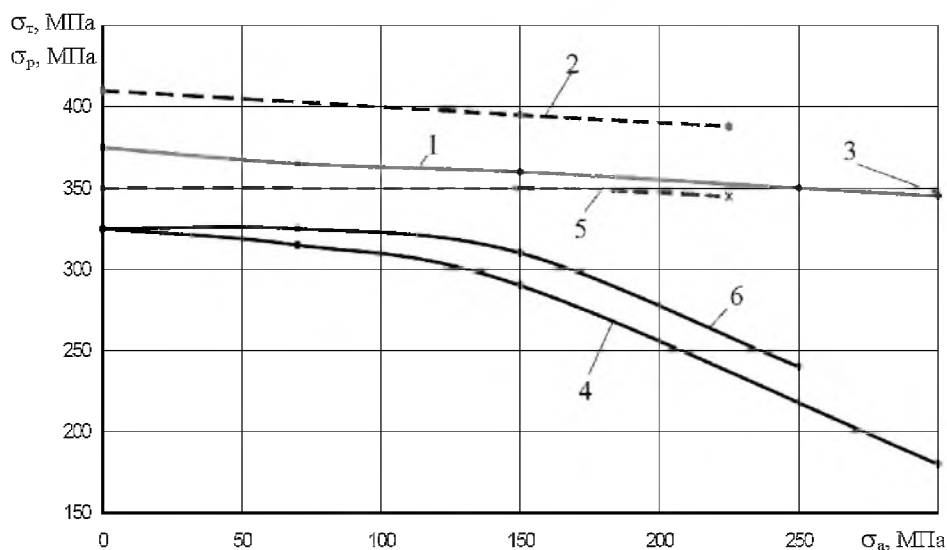


Рис. 4. Зависимость предела текучести (1–3) и предела релаксации напряжений (4–6) от амплитуды предварительного симметричного (2–5) и асимметричного (1, 6) цикла напряжений при испытаниях в условиях релаксации напряжений. (Сплошные линии – сталь 45, штриховые – сплав Д16Т).

На рис. 4 представлены также зависимости предела релаксации напряжений исследуемых материалов от амплитуды предварительного симметричного и асимметричного цикла напряжений. Видно, что по мере увеличения  $\sigma_a$  предел релаксации напряжений образцов из стали 45 снижается и при  $\sigma_a = 300$  МПа составляет 44,6%. Предел релаксации напряжений образцов из сплава Д16Т практически не изменяется (прямая 5). Зависимость предела релаксации напряжений от амплитуды напряжений предварительного асимметричного нагружения образцов из стали 45 показана на рис. 4 кривой 6. Предел релаксации напряжений также снижается и при  $\sigma_a = 250$  МПа достигает 26,2%.

Поскольку испытания проводили в условиях релаксации напряжений, когда суммарную деформацию образца поддерживали постоянной, в результате перераспределения упругой деформации в пластическую была накоплена небольшая пластическая деформация. Анализ рис. 4 показал, что кривая 6 расположена несколько выше кривой 4, хотя характер ее поведения такой же. Это свидетельствует о том, что небольшая накапливаемая пласти-



ческая деформация несколько сдерживает снижение  $\sigma_p$ , поэтому пределы релаксации напряжений при действии одинаковых амплитуд напряжений несколько выше, чем при простом симметричном нагружении. Можно отметить, что пластическое деформирование после предварительного циклического нагружения приводит к повышению механических характеристик материалов, в то время как амплитуда циклического нагружения – к их уменьшению. Насколько повысятся или, наоборот, понизятся механические характеристики материалов, зависит от соотношения накапливаемой в образцах пластической деформации и величины приложенной амплитуды напряжений.

Сравнение полученных результатов показало, что для образцов из стали 45 предел релаксации напряжений является более чувствительной характеристикой к циклическому нагружению, чем предел текучести, в то время как для сплава Д16Т, наоборот.

Более наглядно влияние накопленной пластической деформации после предварительного асимметричного нагружения при разных амплитудах напряжений при испытаниях в условиях релаксации напряжений на пределы текучести и релаксации напряжений образцов из стали 45 представлено на рис. 5. Видно, что пластическая деформация зависит от амплитуды напряжения, а ее предельно реализуемая величина при максимальной амплитуде напряжений не превышает 0,12%. Необходимо отметить, что, несмотря на увеличение пластической деформации, механические характеристики уменьшаются. По-видимому, в данном случае преобладает влияние амплитуды напряжений. Если предположить, что в результате циклического нагружения в образце происходит накопление циклической пластической деформации, то можно констатировать, что именно она является преобладающим фактором в процессе снижения механических характеристик материала. Анализ кривых показал, что циклическая нагрузка отрицательно влияет как на предел релаксации напряжений, так и на предел текучести, которые понижаются на 26,2 и 6% соответственно. Испытания также свидетельствуют о том, что длина площадки текучести в образцах из стали 45 зависит от амплитуды напряжений предварительного циклического нагружения (рис. 2). С увеличением амплитуды она уменьшается и при  $\sigma_a = 150$  МПа становится равной нулю (на рис. 2 прямая 2), что подтверждают данные литературных источников [2].

*Совместное действие статического растяжения и разной амплитуды напряжений.* На рис. 6 представлена зависимость предела текучести от накопленной пластической деформации после предварительного комбинированного нагружения и естественного старения образцов из стали 45 и сплава Д16Т. Для образцов из стали 45  $\sigma_a = 250$  МПа, из сплава Д16Т – 225 МПа. При более высокой амплитуде напряжений в образцах из сплава Д16Т развивались усталостные трещины. Видно, что с увеличением в образцах предварительной пластической деформации предел текучести повышается. Для стали 45 это повышение составило 53,6%, для сплава Д16Т – 24% при пластической деформации, равной 3%. Из рис. 6 также следует, что кривая  $l$  при  $\varepsilon_{пл} = 2,2\%$  имеет перегиб. При таком значении  $\varepsilon_{пл}$  предел текучести достигает максимума, оставаясь далее на этом же уровне.

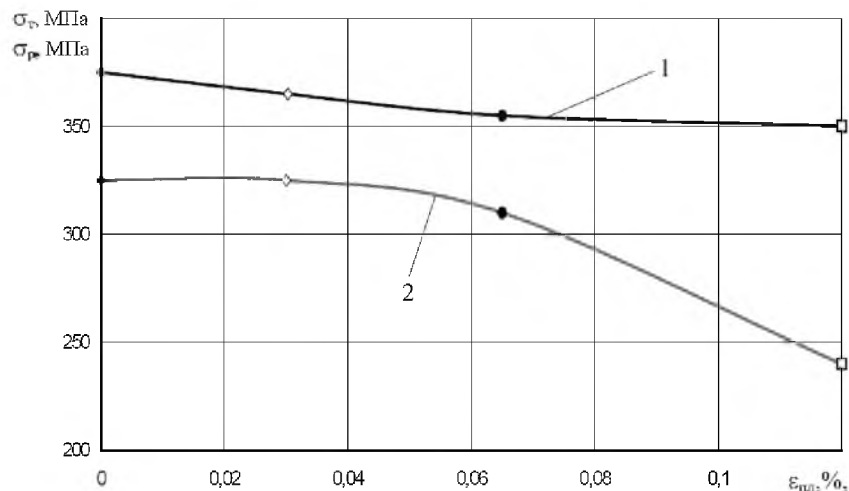


Рис. 5. Зависимость предела текучести (1) и предела релаксации напряжений (2) образцов из стали 45 от предварительно накопленной пластической деформации после асимметричного нагружения при испытаниях в условиях релаксации напряжений. (Режимы нагружения:  $\diamond$  –  $\sigma_{ст} = 300$  МПа,  $\sigma_a = 70$  МПа;  $\bullet$  –  $\sigma_{ст} = 300$  МПа,  $\sigma_a = 150$  МПа;  $\square$  –  $\sigma_{ст} = 300$  МПа,  $\sigma_a = 250$  МПа.)

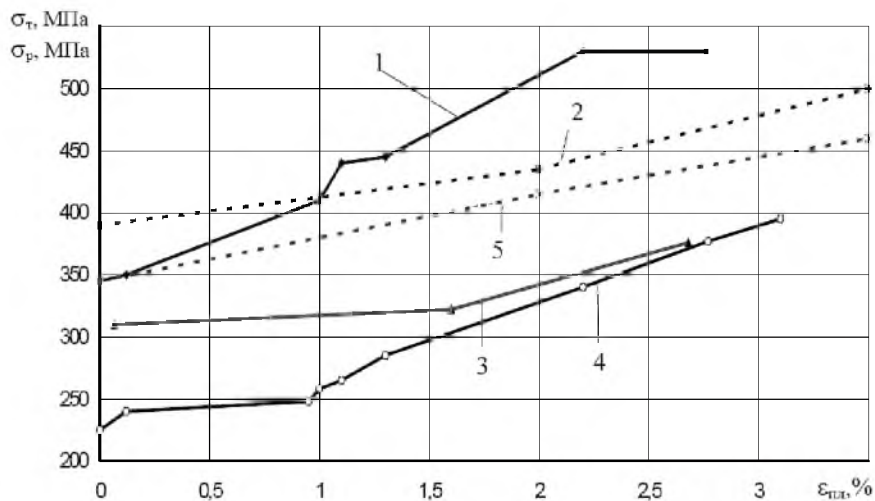


Рис. 6. Зависимость предела текучести (1, 2) и предела релаксации напряжений (3–5) от накопленной пластической деформации после предварительного комбинированного нагружения при разной амплитуде напряжений  $\sigma_a$  для стали 45 (сплошные линии) и сплава Д16Т (штриховые линии): 1, 4 –  $\sigma_a = 250$  МПа; 2, 5 –  $\sigma_a = 225$  МПа; 3 –  $\sigma_a = 150$  МПа.

Испытания показали, что характер поведения кривых пределов текучести после предварительного статического и циклического нагружения образцов из стали 45 практически одинаков (рис. 3 и 6). Предел текучести в процентном отношении повышается практически на одну и ту же величину. Перегиб кривых 1 (рис. 3 и 6) также происходит практически при одинаковом значении  $\varepsilon_{пл.}$ . Интересно отметить, что угол наклона кривых для образцов из сплава Д16Т изменяется при одинаковом значении пластической деформации. Предел текучести образцов из сплава Д16Т после пред-

варительного циклического нагружения по достижении накопленной пластической деформации 2% продолжает увеличиваться более интенсивно (на рис. 6 кривая 2), после предварительного статического нагружения он уменьшается (на рис. 3 кривая 3).

Зависимости предела релаксации напряжений исследуемых материалов от пластической деформации после предварительного комбинированного нагружения при разной амплитуде напряжений представлены на рис. 6. Видно, что по мере роста  $\varepsilon_{пл}$  пределы релаксации напряжений также увеличиваются. Для образцов из стали 45 повышение предела релаксации напряжений при  $\varepsilon_{пл} = 3\%$  и амплитуде напряжений 150 и 250 МПа составило 25,8 и 69,5% соответственно, для образцов из сплава Д16Т – 29%. Заметим, что кривые 3 и 4 по мере повышения пластической деформации сходятся и при  $\varepsilon_{пл} = 3\%$  имеют одинаковое значение предела релаксации напряжений. Это свидетельствует о том, что, начиная с определенного значения пластической деформации, величина амплитуды напряжений уже не влияет на предел релаксации напряжений. Кроме того, полученные результаты показывают, что накопленная пластическая деформация при заданной амплитуде напряжений однозначно приводит к повышению механических характеристик исследуемых материалов.

Отношение предела текучести образцов из стали 45 к таковому образцов из сплава Д16Т после предварительного влияния амплитуды симметричного цикла напряжений 250 и 225 МПа соответственно обозначим коэффициентом  $K_1$ , а отношение предела релаксации напряжений исследуемых материалов, полученных в аналогичных условиях нагружения, –  $K_2$ . Отношение пределов текучести и релаксации напряжений образцов после предварительного пластического деформирования при комбинированном нагружении – соответственно  $K_3$  и  $K_4$ . В результате имеем  $K_1 = 0,9$ ,  $K_2 = 0,67$ ,  $K_3 = 1,12$ ,  $K_4 = 0,88$ .

Видно, что в образцах из стали 45, прошедших предварительное деформирование, вследствие значительного повышения предела текучести значение коэффициента  $K_3$  превышает единицу. Если сравнить полученные коэффициенты с таковыми для образцов, предварительно подвергнутых только статическому нагружению, можно отметить, что их значения практически совпадают, за исключением коэффициента  $K_2$ . Это свидетельствует о том, что имеет место одинаковое влияние предварительной пластической деформации на механические свойства исследуемых материалов независимо от условий нагружения образцов.

На рис. 7 представлены зависимости предела релаксации напряжений образцов из стали 45 и сплава Д16Т от пластической деформации после предварительного статического и комбинированного нагружения. Анализ полученных результатов показал, что кривые для образцов из стали сходятся в одной точке, соответствующей  $\varepsilon_{пл} = 3\%$ . Для образцов из сплава Д16Т по достижении  $\varepsilon_{пл} = 3,5\%$  значения предела релаксации напряжений после предварительного статического и асимметричного нагружения становятся одинаковыми. Это говорит о том, что по достижении указанной величины предварительной пластической деформации на значения предела релаксации напряжений уже не оказывают влияние не только режимы нагружения,

но и вид нагружения (статика или циклика). Полученные результаты могут найти практическое применение в промышленности, когда возникает необходимость в выборе технологического оборудования для повышения механических характеристик конструкций.

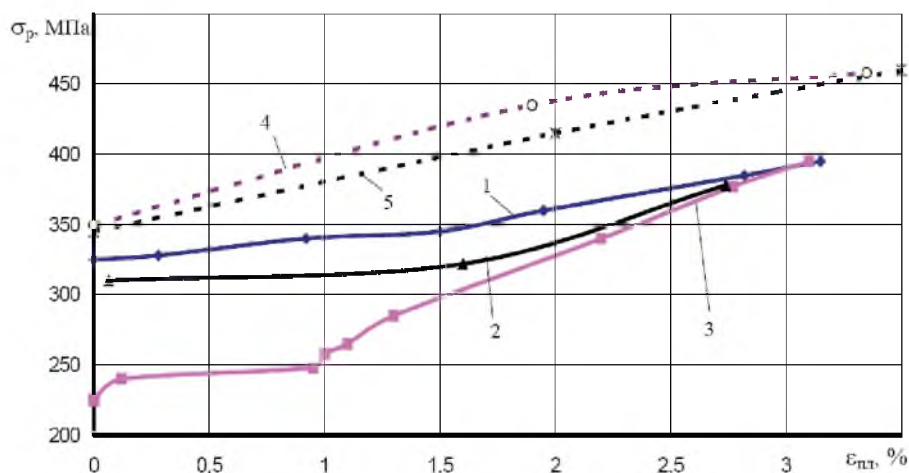


Рис. 7. Зависимость предела релаксации напряжений образцов из стали 45 (сплошные линии) и сплава Д16Т (штриховые линии) от предварительно накопленной пластической деформации после статического (1, 4) и комбинированного нагружения при разной амплитуде напряжений  $\sigma_a$  (2, 3, 5): 2 –  $\sigma_a = 150$  МПа; 3 –  $\sigma_a = 250$  МПа; 5 –  $\sigma_a = 225$  МПа.

## Выводы

1. С увеличением предварительной пластической деформации при асимметричном нагружении предел релаксации напряжений и предел текучести стали 45 и сплава Д16Т повышаются. Установлены закономерности изменения механических характеристик материалов от предварительной пластической деформации при действии разных амплитуд напряжений.

2. Экспериментально показано, что с увеличением предварительной пластической деформации при статическом или комбинированном нагружении с разной амплитудой напряжений разница между пределами релаксации напряжений уменьшается.

3. По мере повышения амплитуды напряжений предварительного нагружения происходит снижение предела релаксации напряжений и предела текучести.

4. Установлены закономерности уменьшения длины площадки текучести в образцах из стали 45 от предварительно накопленной пластической деформации при статическом нагружении и амплитуды асимметричного нагружения.

## Резюме

Експериментально встановлено закономірності зміни границі текучості та границі релаксації напружень зразків зі сталі 45 і сплаву Д16Т в залежності

від величини попередньої пластичної деформації, отриманої в умовах статичного та циклічного розтягання, а також амплітуди напружень з урахуванням процесу деформаційного старіння. Показано, що зі збільшенням пластичної деформації незалежно від виду навантаження підвищуються механічні характеристики матеріалів, у той час як ріст амплітуди напружень призводить до їх зниження. Установлено значення пластичної деформації, за умови досягнення яких незалежно від виду попереднього навантаження границі релаксації напружень матеріалів стають однаковими.

1. Саррак В. И., Суворова С. О., Энтин Р. И. Проблемы металловедения и физики металлов. – М.: Металлургия, 1964. – № 8. – С. 125.
2. Гурьев А. В., Столяров Г. Ю. Металловедение и прочность материалов. – Волгоград: Волгоград. политехн. ин-т, 1968. – С. 56 – 65.
3. Бабич В. К., Гуль Ю. П., Долженков И. Е. Деформационное старение стали. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.
4. Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
5. Полнов В. Г., Чикадили О. Г., Иванова Г. Н. и др. Влияние виброобработки на механические свойства сварных соединений низкоуглеродистой стали и стали 09Г2С // Свар. пр-во. – 1991. – № 6. – С. 20 – 21.
6. Гарф М. Е., Ищенко И. И., Филатов Э. Я. и др. Установка для высокотемпературных испытаний образцов на усталость при осевом нагружении // Прикл. механика. – 1974. – Вып. 15. – С. 94 – 100.
7. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник в 2 т: Т. 2 / Под ред. В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновского. – Киев: Наук. думка, 1987. – 1303 с.
8. ГОСТ 26007-83. Методы испытаний на релаксацию напряжений. – Введ. 01. 01. 85.
9. Жуков А. М. Ползучесть металлов при комнатной температуре после малой частичной разгрузки // Прочность, пластичность и вязкоупругость. – Свердловск, 1986. – С. 64 – 68.
10. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 01. 01. 86.

Поступила 21. 05. 2004