

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.43

## Циклическая прочность перлитных сталей в условиях упруго-пластического нагружения

В. Л. Калмыков, А. П. Тихонов, **И. П. Шиш**

Славянский государственный педагогический институт, Славянск, Украина

*Исследовано упругопластическое течение технологически распространенной перлитной стали при малоцикловом нагружении и повышенных температурах. Предложено уравнение состояния для определения накопленной деформации в зависимости от числа циклов, свойств материала и параметров нагружения.*

Известно, что многие ответственные детали и узлы современной техники (диски и лопатки газовых и паровых турбин, корпуса, паропроводы и т.д.) работают в условиях повторных малоцикловых нагружений, связанных с влиянием нестационарности, плановых и внезапных остановок [1–5]. Это значит, что при деформировании в упругопластической области любая теория, даже при одноосном напряженном состоянии, должна отражать закономерности упругопластического течения как в процессе нагружения, так и в промежуточных стадиях (последующая ползучесть, релаксация и т.д.).

Ранее [6, 7] проведено достаточно широкое исследование деформации перлитных сталей при повышенных температурах, включающее указанные выше процессы, вплоть до разрушения материала.

В настоящей работе при исследовании малоцикловой циклической прочности ограничивались наиболее распространенной схемой многократного нагружения до определенного предельного напряжения при различных скоростях деформирования с последующей разгрузкой. При этом число циклов ограничивалось возможностью достижения указанного предельного напряжения, т.е. участком упрочнения материала в упругопластической области. Это позволило, поскольку испытания проводились на машине с замкнутым кинематическим контуром [5], исключить влияние податливости на регистрируемую прочность, так как податливость машины проявляется частично при первом и последнем циклах нагружения. Во всех случаях величины деформаций, усилий и температуры испытания измеряли устройствами с одинаковой степенью точности (индикаторы часового типа  $\pm 0,01$  мм, образцовый манометр  $\pm 0,01$  МПа, что соответствовало нагрузке  $\pm 20$  Н, хромель-алюмелевые термодпары) [6, 7].

На рис. 1–3 представлены экспериментальные кривые деформирования стали 12МХ при температуре 510°C и различных скоростях нагружения (перемещения захвата). С использованием экспериментальных кривых рас-

тяжения определяли характеристики деформации, входящие в общее уравнение состояния [8]:

$$\varepsilon = m\varepsilon^{1-n} \exp(d\sigma)$$

или в соответствии с [3]

$$V = m(\varepsilon + \Sigma\varepsilon_i)^{1-n} \exp(d\sigma), \quad (1)$$

где  $V$  – скорость нагружения, %/ч;  $\varepsilon, \Sigma\varepsilon_i$  – текущая и предварительно накопленная деформация, %;  $\sigma$  – истинное напряжение, МПа;  $d, m, n$  – характеристики деформации материала, постоянные для заданной температуры.

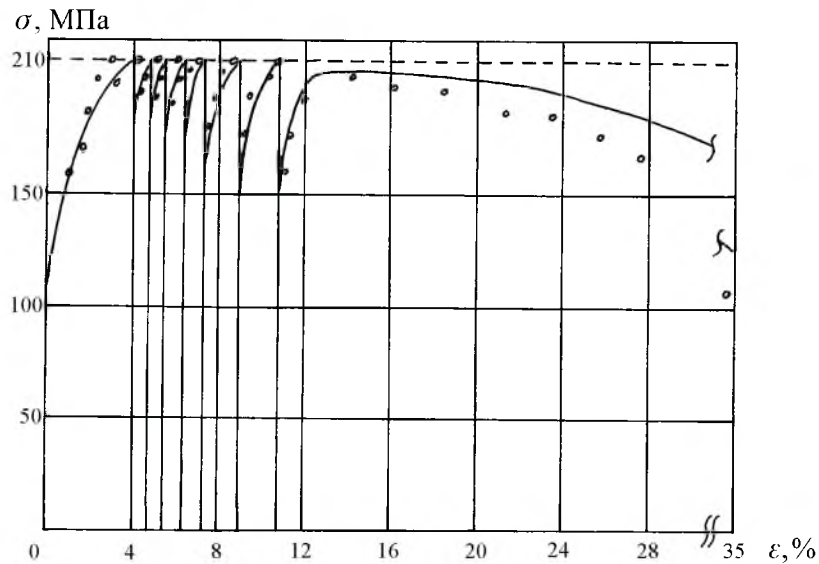


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и расчетные (сплошные линии) кривые деформирования стали 12МХ, а также предельное напряжение (штриховая линия) при  $T = 510^\circ\text{C}$  и  $\sigma_{\text{усл}}^{\text{пр}} = 210$  МПа,  $V = 20,5$  %/ч.

Поскольку нагружение производилось до предельного условного напряжения  $\sigma_{\text{усл}}^{\text{пр}}$ , истинное напряжение в указанный момент времени определялось по зависимости [8]

$$\sigma = \sigma_{\text{усл}}^{\text{пр}} [1 + k(\varepsilon + \Sigma\varepsilon_i)], \quad (2)$$

где  $k$  – фактор повреждаемости материала.

На рис. 1–3 приведены также расчетные кривые, построенные согласно уравнению (1), преобразованному к виду

$$\sigma = \frac{\ln V + (n-1) \ln(\varepsilon + \Sigma\varepsilon_i) - \ln m}{d}. \quad (3)$$

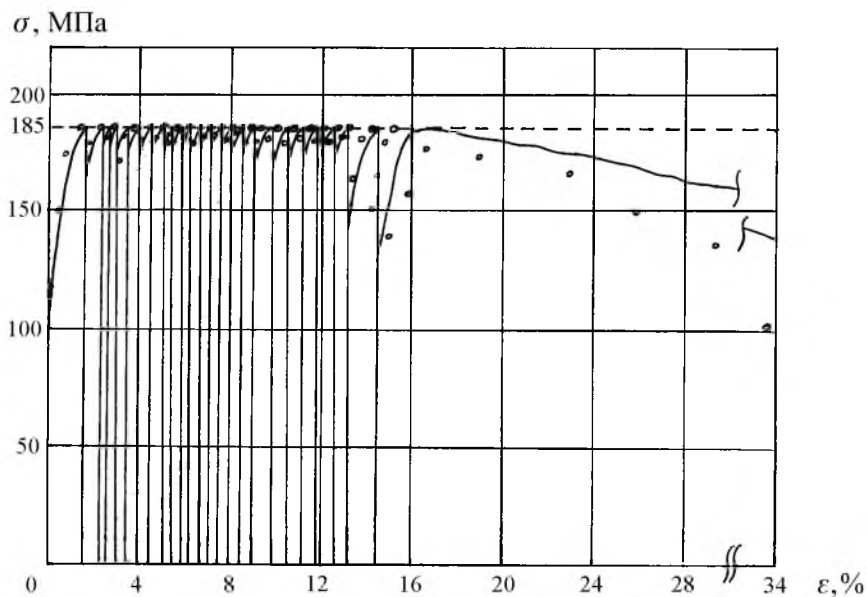


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и расчетные (сплошные линии) кривые деформирования стали 12МХ, а также предельное напряжение (штриховая линия) при  $T = 510^{\circ}\text{C}$  и  $\sigma_{\text{усл}}^{\text{пр}} = 185$  МПа,  $V = 12,2$  %/ч.

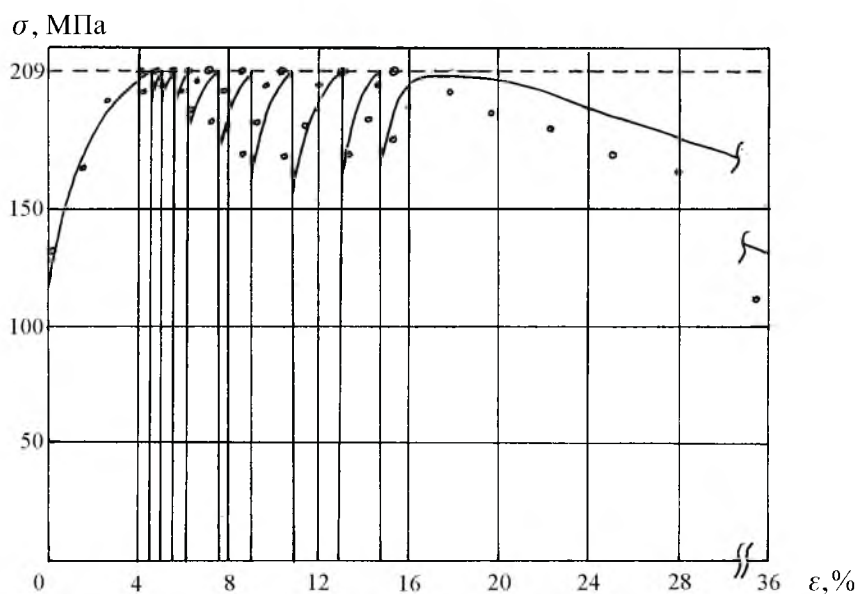


Рис. 3. Экспериментальные (точки) и расчетные (сплошные линии) кривые деформирования стали 12МХ, а также предельное напряжение (штриховая линия) при  $T = 510^{\circ}\text{C}$  и  $\sigma_{\text{усл}}^{\text{пр}} = 209$  МПа,  $V = 24,6$  %/ч.

Характеристики деформации  $d$ ,  $n$  и  $m$  определяли по известной методике [6–8] в основном по первому участку нагружения. При пересчете истинных напряжений в условные, и наоборот (2), находили фактор повреждаемости материала  $k$ , который уточняли по всем экспериментальным кривым. Характеристики деформирования стали 12МХ при  $T = 510^{\circ}\text{C}$  таковы:  $d = 0,47$  МПа;  $n = 1,75$ ;  $\lg m = -2,84$ ;  $k = 0,02$ .

Как видно, расчетные кривые достаточно хорошо совпадают с экспериментальными по всем циклам нагружения, вплоть до разрушения, при различных параметрах деформирования. Это позволяет с помощью уравнения состояния (3) описать малоцикловое нагружение до фиксированных предельных напряжений (последний цикл деформирования, как указывалось выше, не рассматривался).

Отметим, что существенное влияние на число циклов оказывала скорость нагружения, что свидетельствует о необходимости учета данного параметра в уравнении состояния.

На рис. 4 изображены кривые циклической ползучести стали 12МХ при  $T = 510^\circ\text{C}$  в координатах общая величина накопленной деформации  $\varepsilon = [(\varepsilon + \sum \varepsilon_i) / l_0] \cdot 100\%$  – число циклов ( $N_{II}$ ). Предложить некоторый суммарный деформационный критерий разрушения не представляется возможным, так как суммарная деформация функционально возрастает по мере увеличения числа циклов и при различных скоростях нагружения не может быть определена однозначной зависимостью.

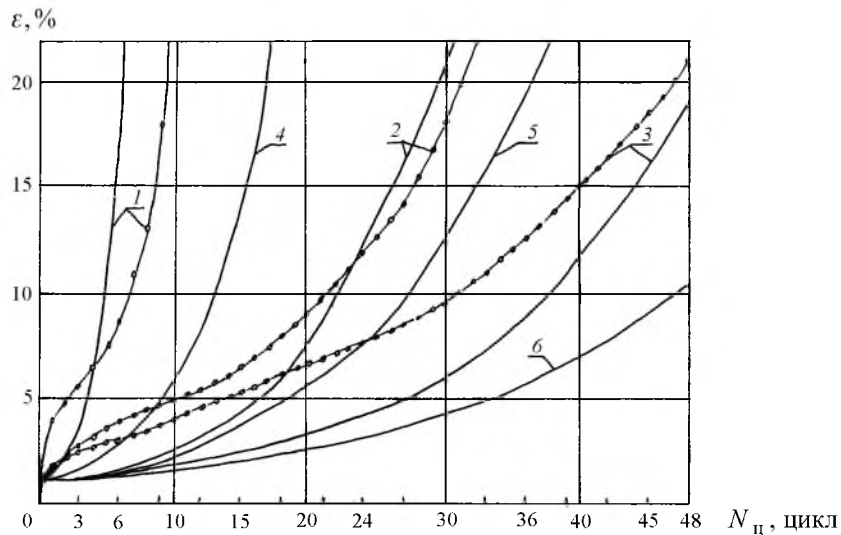


Рис. 4. Экспериментальные (точки) и расчетные (сплошные линии) кривые циклической ползучести стали 12МХ при  $T = 510^\circ\text{C}$  и различных параметрах деформирования: 1 –  $\sigma_{\text{усл}}^{\text{пр}} = 209$  МПа,  $V = 24,6$  %/ч; 2 –  $\sigma_{\text{усл}}^{\text{пр}} = 185$  МПа,  $V = 12,2$  %/ч; 3 –  $\sigma_{\text{усл}}^{\text{пр}} = 198$  МПа,  $V = 23,7$  %/ч; 4 –  $\sigma_{\text{усл}}^{\text{пр}} = 190$  МПа,  $V = 14,0$  %/ч; 5 –  $\sigma_{\text{усл}}^{\text{пр}} = 190$  МПа,  $V = 15,8$  %/ч; 6 –  $\sigma_{\text{усл}}^{\text{пр}} = 190$  МПа,  $V = 16,55$  %/ч.

В качестве первого приближения предлагается полуэмпирическая зависимость накопленной деформации от числа циклов, содержащая ранее определенные характеристики деформации в виде

$$\Sigma \varepsilon = \left[ Ad + \exp\left(\frac{\sigma d - \ln V + \ln m}{n - 1}\right) \right]^{N_{II}}, \quad (4)$$

где  $A$  – коэффициент соразмерности для стали 12МХ,  $A = 0,9 \dots 1,1$  МПа.

На рис. 4 в соответствии с уравнением (4) при  $A = 1$  расчетные кривые построены в координатах  $\varepsilon - N_{ц}$ .

Как видно, расчетные кривые достаточно хорошо совпадают с экспериментальными в широком диапазоне циклов нагружения. Аналогичные результаты получены для стали 15X1M1Ф при  $T = 510^{\circ}\text{C}$  [7]. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности использования уравнения (4) в практике расчетов циклической прочности перлитных сталей при повышенных температурах и малом числе циклов нагружения.

## Резюме

Досліджено пружнопластичну текучість технологічно розповсюдженної перлітної сталі за умови малоциклового навантаження та підвищених температур. Запропоновано рівняння стану для визначення накопиченої деформації в залежності від числа циклів, властивостей матеріалу та параметрів навантаження.

1. Биргер И. А., Демьянушко И. В., Темис Ю. М. Расчет конструкций при циклическом нагружении // Тр. Всесоюз. симп. по малоцикловой усталости при повышенных температурах. – Челябинск, 1974. – № 1. – 163 с.
2. Борздыка А. М., Гецов А. Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. – М.: Metallurgy, 1971. – 304 с.
3. Москвитин В. В. Пластичность при переменных нагружениях. – М.: Изд. МГУ, 1965. – 232 с.
4. Шнейдерович Р. М. Прочность при статическом и повторно-статическом нагружениях. – М.: Машиностроение, 1968. – 343 с.
5. Шрон Р. З., Белашов Ю. В., Нахалов В. А., Бараз Р. Х. Повреждения элементов энергетического оборудования, вызванные малоцикловой усталостью // Тр. Всесоюз. симп. по малоцикловой усталости при повышенных температурах. – Челябинск, 1974. – № 1. – 163 с.
6. Тихонов А. П., Моисеенко А. А., Шичко В. А. Релаксация напряжений с учетом одно- и многократных нагружений образца в упругопластической области деформирования // Пробл. прочности. – 1988. – № 4. – С. 73 – 78.
7. Тихонов А. П., Моисеенко А. А., Шичко В. А. Влияние условий нагружений на характеристики прочности и пластичности перлитных сталей при повышенных температурах // Там же. – № 6. – С. 99 – 102.
8. Ленин Г. Ф. Ползучесть металлов и критерии жаропрочности. – М.: Metallurgy, 1976. – 343 с.

Поступила 17. 03. 99