

УДК 620.178

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАРТЕНСИТНОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ НА УСТАЛОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ МИКРОДЕФОРМАЦИИ

<sup>1</sup>Мыльников В.В., <sup>2</sup>Шетулов Д.И., <sup>3</sup>Мясников А.М.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»,  
Нижегород, e-mail: mrmynnikov@mail.ru;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,  
Нижегород, e-mail: shetulov@mail.ru;

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,  
филиал, Дзержинск, e-mail: ivanovich.doc@yandex.ru

Изменение физико-механических свойств за счет различных режимов термической обработки металлических материалов существенно влияет на механизмы их разрушения и долговечность. Исследования эволюции параметров микропластической деформации и выявление закономерностей с параметрами сопротивления усталости и пределом выносливости мартенситностареющих сталей позволяет существенно продвинуться в понимании процесса деформации и разрушения металлических материалов, а также ответить на некоторые вопросы практической оценки конкретных эксплуатационных факторов, влияющих на сопротивление усталостному разрушению мартенситностареющих сталей, в том числе закономерностей механизма разрушения. В представленной работе исследовано влияние различных видов термической обработки мартенситностареющей стали на усталость и микропластическую деформацию. По результатам полученных экспериментальных данных установлена взаимосвязь параметров сопротивления усталости с параметрами микропластической деформации этой стали. Выявлено, что рост предела выносливости и уменьшение наклона кривой усталости обусловлены возрастанием параметра микропластической деформации, при этом циклическая прочность исследованной стали снижается с понижением температуры старения после закалки. Определены максимальные и минимальные значения показателей сопротивления усталости и стабильности поведения исследуемой стали при циклическом нагружении с разными видами термической обработки.

**Ключевые слова:** усталость металла, мартенситностареющая сталь, термическая обработка, микропластическая деформация, циклическая деформация

## INFLUENCE OF HEAT TREATMENT MODES OF MARTENSITE AGING STEEL ON FATIGUE CHARACTERISTICS AND MICRODEFORMATION PARAMETERS

<sup>1</sup>Mylnikov V.V., <sup>2</sup>Shetulov D.I., <sup>3</sup>Myasnikov A.M.

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,  
Nizhny Novgorod, e-mail: mrmynnikov@mail.ru;

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseeva,  
Nizhny Novgorod, e-mail: shetulov@mail.ru;

<sup>3</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseeva, branch,  
Dzerzhinsk, e-mail: ivanovich.doc@yandex.ru

Changes in physical and mechanical properties due to different modes of heat treatment of metallic materials significantly affect the mechanisms of their destruction and durability. Studies of the evolution of microplastic deformation parameters and the identification of regularities with the fatigue resistance parameters and the fatigue limit of maraging steels make it possible to significantly advance in understanding the process of deformation and fracture of metallic materials, as well as to answer some questions of the practical assessment of specific operational factors affecting the resistance to fatigue fracture of maraging steels, in including the laws of the destruction mechanism. In the presented work, maraging steel was investigated for fatigue and microplastic deformation with various types of heat treatment. Based on the results of the experimental data obtained, the relationship between the parameters of fatigue resistance and the parameters of microplastic deformation of this steel has been established. It was revealed that an increase in the endurance limit and a decrease in the slope of the fatigue curve are due to an increase in the microplastic deformation parameter, while the cyclic strength of the studied steel decreases with a decrease in the aging temperature after quenching. The maximum and minimum values of the indicators of fatigue resistance and stability of the behavior of the investigated steel under cyclic loading with different types of heat treatment have been determined.

**Keywords:** metal fatigue, maraging steel, heat treatment, microplastic deformation, cyclic deformation

Актуальность изучения механического поведения мартенситностареющих сталей при циклическом нагружении обусловлена, прежде всего, поиском путей повышения долговечности, а также факторов, ее определяющих. Изменение физико-механиче-

ских свойств за счет различных режимов термической обработки металлических материалов сильно влияет на механизмы их разрушения и долговечность. Исследование эволюции параметров микропластической деформации и выявление закономерностей

с параметрами сопротивления усталости и пределом выносливости мартенситно-старееющих сталей позволит существенно продвинуться в понимании процесса деформации и разрушения металлических материалов и позволит ответить на некоторые вопросы практической оценки конкретных эксплуатационных факторов, влияющих на сопротивление усталостному разрушению мартенситно-старееющих сталей, в том числе закономерностей механизма разрушения.

Анализ механических повреждений и разрушений [1] деталей машин и конструкций показывает, что в большинстве случаев, разрушение происходит под действием циклических нагрузок, что принято обозначать как усталость сталей. Современные техногенные катастрофы от усталости металлоконструкций связаны с тем, что процесс усталостного разрушения зависит от многих факторов (вид циклического деформирования, состояние поверхности стали, концентраторов напряжений, влияние агрессивной среды, масштабный эффект, частота циклического нагружения и асимметрия и др.) [2–4], а также с увеличением сложности современных конструкций с увеличенными нагрузочными параметрами и с резким возрастанием частот и скоростей современных агрегатов.

В связи с тем, что практически все металлические детали и конструкции подвергаются термической обработке [5], несомненный интерес представляет влияние термической обработки на сопротивление усталости. Однако этот вопрос изучен недостаточно ввиду многовариативности и многофакторности этих процессов. Поэтому на сегодняшний день современные представления в области науки и техники не дают однозначного ответа на конфигурацию и последовательность физических процессов, происходящих в конструкционных материалах при воздействии переменных нагрузок.

Цель настоящей работы – определение влияния режимов термической обработки на закономерности изменения показателя сопротивления усталости ( $tg\alpha_w$ ) и предела выносливости  $\sigma_{-1}$  с параметрами микропластической деформации.

#### Материалы и методы исследования

Исследования проводили на образцах мартенситно-старееющей стали 03Н18К9М5Т-ЭЛ (ВСК-210).

Химический состав стали 03Н18К9М5Т-ЭЛ в%: Al ≤ 0,15; C ≤ 0,03; Co 8,5–9,5; Fe Осн.; Mn ≤ 0,1; Mo 4,6–5,5; Ni 17,7–19; P ≤ 0,01; S ≤ 0,01; Si ≤ 0,1; Ti 0,6–0,8. ЭЛ – электронно-лучевой переплав.

Сталь 03Н18К9М5Т – это коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная мартенситно-старееющая сталь. Данная сталь применяется для сварных корпусов двигателей, резервуаров высокого давления, деталей крепежа, зубчатых передач двигателей и для валов вертолетов. Выплавляют эту сталь в открытых индукционных печах. Она обладает неограниченной прокаливаемостью и имеет хорошую свариваемость. До старения она легко деформируется и обрабатывается резанием. Коробления, при термической обработке, не происходит [6].

#### Испытания на усталость

Испытаниям на усталость подвергали образцы прямоугольного сечения 5x22 мм с рабочей длиной 43 мм, изготовленные из исследуемой стали после каждого режима старения. Нагружение проводили на резонансном электромагнитном стенде с частотой 240 Гц. Контролируемыми характеристиками являлись: предел выносливости ( $\sigma_{-1}$ ), показатель сопротивления циклическому нагружению (наклон кривой усталости к оси циклов):

$$tg\alpha_w = \frac{d \lg \sigma}{d \lg N},$$

где  $\sigma$  – циклическое напряжение;  $N$  – количество циклов.

#### Испытания на микропластическую деформацию (МПД)

Экспериментально полученные данные изменений параметров МПД исследованного материала показаны на рис. 1. Анализ результатов, их связь и корреляция с параметрами циклической деформации рассмотрена нами в работе [7]. Значения МПД были получены при испытаниях цилиндрических образцов 3,5x5 мм. Для проведения испытаний был задействован пресс большой жесткости ( $I/k = 10^4$  МН/м). Данный пресс подвергли модернизации: с целью исключения перекоса образца при испытании и возможности искажений величин релаксаций напряжений от влияния конструктивных особенностей испытательной машины в конструкцию нагружающего устройства пресса было установлено жесткое монолитное ядро. Образцы подвергали последовательному нагружению сжатием ступенчато увеличивающейся нагрузкой до предела текучести через равные промежутки времени ( $\tau = 150$  с) и фиксировали изменения релаксации напряжений. Эти данные позволили выявить стадийность процесса пластической деформации (СПД) образцов стали, в различных структурно-фазовых состояни-

ях, полученных в ходе предварительной термической обработки по разным режимам.

Графически изображенные данные результатов (рис. 3) таких процессов имеют несколько стадий – максимум из семи стадий, но в большинстве случаев СПД наблюдалась из двух до пяти стадий, при этом каждая из них ограничивается критическими напряжениями  $\Delta\sigma^0, \sigma', \sigma''$ , которым соответствуют значения  $\Delta\sigma^0, \Delta\sigma'$  и  $\Delta\sigma''$ .

Область МПД при значении  $E_{ост} = 4 \cdot 10^{-4}$  отсекается напряжением  $\sigma''$ , которое находится перед пределом текучести. На диаграмме (рис. 3) при  $\Delta\sigma = const$  прослеживается ярко выраженный участок в интервале напряжений  $\Delta\sigma - (\Delta\sigma_H)$  с  $\sigma_2^0$ , который отображает остаточную деформацию материала, накопленную при испытаниях, и со-

ответствует пределам пропорциональности и макроупругости стали.

Анализируя экспериментальные данные, необходимо остановить внимание на регистрируемых критических напряжениях  $\Delta\sigma^0, \Delta\sigma'$  и  $\Delta\sigma''$ . Изменение их значений выступает как отклик эволюции процессов пластической деформации в исследуемом материале при испытаниях и имеют ярко выраженный физический смысл, что удобно использовать при сравнительной оценке эксплуатационных свойств сталей и сплавов, кроме того, полученные данные и направление динамики их изменений могут применяться в методах прогнозирования прочностных характеристик материалов, что является весьма важным как с практической, так и с теоретической точек зрения.

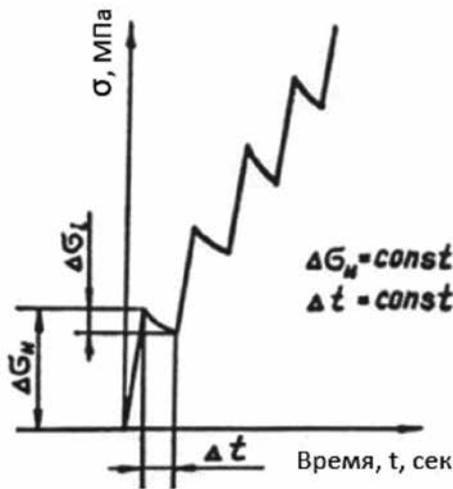


Рис. 1. Схематическое изображение режима испытания

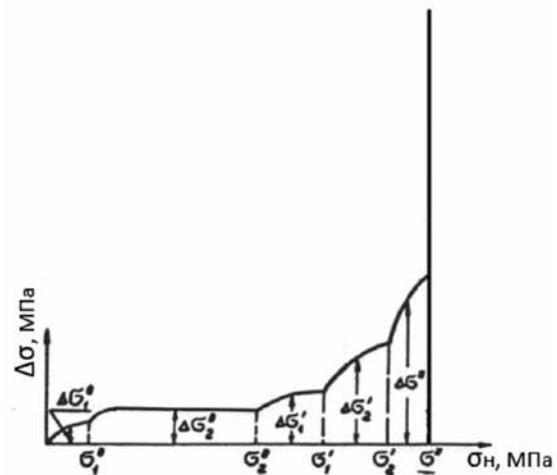


Рис. 2. Зависимость  $\Delta\sigma = f(\sigma_H)$ , полученная при реализации режима испытаний (рис. 1)

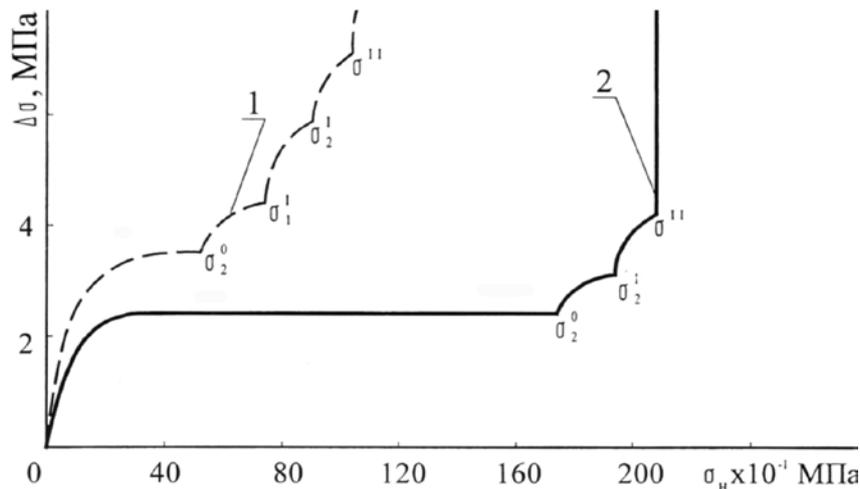


Рис. 3. Стадийность микропластической деформации стали при различных видах термической обработки: 1 – закалка; 2 – старение 500 °С

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 схематически изображены режимы испытаний и полученная по результатам этих испытаний закономерность, представленная в виде зависимости  $\Delta\sigma = f(\sigma_n)$  (рис. 2), которая показывает, что ниже напряжений релаксации МПД наиболее заторможена. Дальнейший рост напряжений, за счет увеличения внешней нагрузки, существенно сказывается на приращении  $\Delta\sigma$ , что вызывает интенсивное монотонное его увеличение.

Стали с объемом центрированной кубической кристаллической структурой характеризуются независимостью величины релаксации напряжения  $\Delta\sigma_2^0$  от приложенной нагрузки в определенном спектре испытаний. Было обнаружено, что при равном приращении  $\Delta\sigma_n$  появляется одинаковая величина  $\Delta\sigma_2^0$ . Такой параметр можно успешно применять для сравнительных оценок стабильности упругих характеристик и возможности применения исследуемых материалов для изготовления упругих устройств.

При циклических испытаниях наибольший интерес из всех снимаемых значений параметров МПД представляют напряжения  $\sigma_2^0$  и его приращение  $\Delta\sigma_2^0$ .

Под действием знакопеременных нагрузок увеличение сопротивления стали МПД сопровождается уменьшением величины  $\Delta\sigma_2^0$  и незначительными изменениями микроструктуры. А это означает, что следует ожидать стабильные эксплуатационные свойства и более высокий предел выносливости исследуемого материала и деталей, изготовленных из него, при этом недопустимы перегрузки единичного и случайного характера, так как могут спровоцировать деформацию материала в локальной зоне. Ввиду изложенного закономерен тот факт, что критическое напряжение должно иметь значительное отличие от максимальных рабочих напряжений ( $\sigma_{\text{раб}}$ ) и учитывать, что величина  $\sigma''$  в действительности соответствует пределу текучести сплава.

На рис. 4 представлены кривые усталости стали 03Н18К9М5Т-ЭЛ в различном структурном состоянии после разных видов термической обработки, построенные по результатам испытаний образцов прямоугольного сечения по схеме консольного изгиба. Данные кривые усталости имеют следующие уравнения:

Кривая усталости 1 –  $\lg\sigma = 3,5386 - 0,1549\lg N$ ,  $K_{\text{кор}} = -0,9566$ ;

Кривая усталости 2 –  $\lg\sigma = 3,8657 - 0,2218\lg N$ ,  $K_{\text{кор}} = -0,9226$ ;

Кривая усталости 3 –  $\lg\sigma = 3,5753 - 0,1474\lg N$ ,  $K_{\text{кор}} = -0,9653$ ;

Кривая усталости 4 –  $\lg\sigma = 3,5684 - 0,1357\lg N$ ,  $K_{\text{кор}} = -0,9409$ ;

Кривая усталости 5 –  $\lg\sigma = 3,5224 - 0,1209\lg N$ ,  $K_{\text{кор}} = -0,9778$ ;

Кривая усталости 6 –  $\lg\sigma = 3,4861 - 0,1023\lg N$ ,  $K_{\text{кор}} = -0,9872$ ,

где  $\sigma$  – напряжение при достижении соответствующего  $N$ ;  $N$  – количество циклов нагружения до разрушения (долговечность);  $K_{\text{кор}}$  – коэффициент корреляции отображает степень сходимости построенного графика кривой усталости с полученными результатами эксперимента.

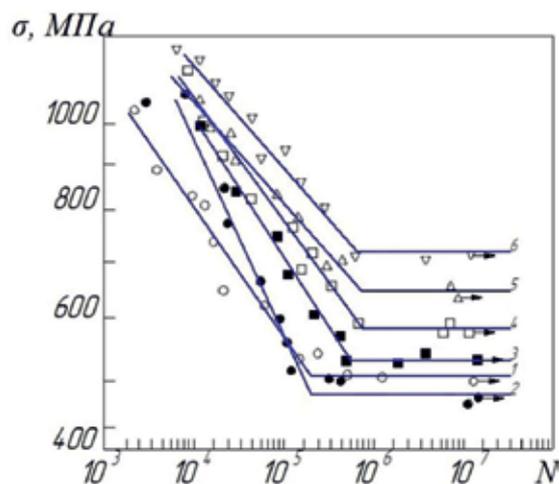


Рис. 4. Кривые усталости стали после разных видов термической обработки: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – старение при 200, 300, 400, 450, 500 и 550 °С

Из представленных результатов следует, что прочность закаленной стали увеличивается с возрастанием температуры старения от 300 до 550 °С. Предел выносливости ( $\sigma_1$ ) изменяется при этом с 480 МПа при температуре старения 300 °С до 730 МПа при температуре 550 °С, однако при 200 °С предел выносливости составил 525 МПа – последовательность роста значений  $\sigma_1$  нарушилась.

Полученные значения, обработанные с помощью математической статистики и программы Excel, и параметры микропластической деформации  $\sigma''$  сведены в таблицу.

Видно, что наибольшие значения  $\text{tg}\alpha_w$  отмечаются для кривой усталости, построенной по результатам испытаний образцов, состаренных при 300 °С.

Следует отметить небольшой разброс экспериментальных точек ( $K_{\text{кор}}$ ) на кривых усталости стали, закаленной и отпущенной при разных температурах. Это свидетельствует о стабильном поведении стали при многоцикловом нагружении. Все значения показателя сопротивления усталости  $\text{tg}\alpha_w$  укладываются на одну плавную кривую (рис. 5).

Результаты испытаний стали 03Н18К9М5Т-ЭЛ

№ кривой усталости	Температура старения, °С	Предел усталости ( $\sigma_{-1}$ ), МПа	Параметр $\text{tg } \alpha_w$	Критическое напряжение ( $\sigma''$ ), МПа
1	200	525	0,1549	1050
2	300	480	0,2218	1200
3	400	535	0,1474	1550
4	450	560	0,1357	1800
5	500	640	0,1209	2050
6	550	730	0,1023	2000

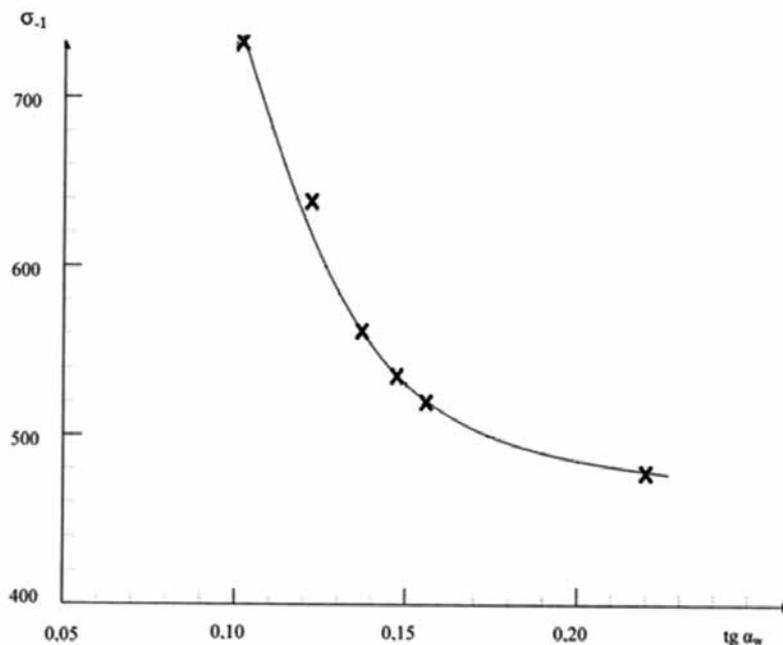


Рис. 5. Зависимость предела выносливости от показателя  $\text{tg } \alpha_w$

**Заключение**

1. Предел выносливости стали 03Н18К9М5Т-ЭЛ при понижении температуры старения уменьшается. Исключение составляет его значение, полученное после старения при 200 °С ( $\sigma_{-1} = 525$  МПа). Наивысшую циклическую прочность ( $\sigma_{-1} = 730$  МПа) и минимальный разброс экспериментальных данных ( $K_{\text{кор}} = -0,9872$ ) показали образцы, подвергнутые старению при 550 °С.

2. При изменении параметра микропластической деформации ( $\sigma''$ ) и уменьшении численного значения показателя  $\text{tg } \alpha_w$  (с улучшением сопротивления усталости) предел выносливости увеличивается, за исключением некоторых «выпадов» (рис. 3, кривая 1), т.е. очевидна корреляция показателя параметров микропластической деформации с характеристиками усталости исследованной стали. Увеличение параме-

тра  $\sigma''$  соответствует росту предела выносливости  $\sigma_{-1}$  и уменьшению значения  $\text{tg } \alpha_w$ .

**Список литературы**

1. Мак-Ивили А.Дж. Анализ аварийных разрушений: Пер. с англ. Э.М. Лазарева, И.Ю. Шкадиной / Под. ред. Л.Р. Ботвиной. М.: Техносфера, 2010. 416 с.
2. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. 479 с.
3. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobev S.V., Kononov S.V. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams. Cambridge, 2015. 272 p.
4. Мыльников В.В. Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов // Наука и техника. 2019. Т. 18. № 5. С. 427–435.
5. Биронт В.С. Теория термической обработки металлов. Закалка, старение и отпуск: учеб. пособие. Красноярск: СФУ ИЦМиЗ, 2007. 172 с.
6. ТУ14-131-33-72. [Электронный ресурс]. URL: <https://inzhenier-info.ru/razdely/materialy/konstruksionnye-stali/deformiruemye-stali/vysokoprochnye-stali/stal-vysokoprochnaya-martensitostareyushchaya-03n18k9m5tr-ep637-vks-210.html> (дата обращения: 22.05.2021).
7. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. О корреляции параметров микропластической и циклической деформации при разной термической обработке инструментальной стали // Литейные процессы. 2012. № 11. С. 136–140.