

УДК 620.179.147: 620.179.162

DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-1-94-105

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
С МОДУЛЯМИ УПРУГОСТИ  
МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ\***

© 2024 г. **Сергеева О.А.<sup>1</sup>, Мишакин В.В.<sup>2</sup>, Ключников В.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ООО «Волга-Спецгидроэнергомонтаж» – «Камспецэнерго»,  
Набережные Челны, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального  
исследовательского центра «Институт прикладной физики  
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН», Нижний Новгород, Российская Федерация

sergeevaoa\_kse@mail.ru

*Поступила в редакцию 18.01.2024*

Исследовано влияние циклического деформирования на модули упругости метастабильной аустенитной стали. В приближении Фойгта произведен оценочный расчет модулей деформационного мартенсита и матрицы материала (аустенита). Расчеты модулей проводились по данным измерений скоростей ультразвуковых волн с учетом изменения плотности материала, вызванного разницей объемов элементарных ячеек матрицы и фазы мартенсита. Объемная доля деформационного мартенсита и его изменение при циклическом деформировании определялись вихретоковым методом. Исследовано влияние амплитуды деформации цикла на рост объемной доли мартенсита. Приведены зависимости относительного изменения модуля Юнга, модуля сдвига и модуля объемного сжатия стали 12X18H10T от количества циклов нагружения. Получены связи между изменением упругих модулей и характеристиками циклического нагружения: упрочнением материала и плотностью энергии в цикле, используемых для расчета ресурса методами механики деформируемого твердого тела. Исследования показали, что величина критического изменения модулей, соответствующих появлению макротрещины, зависит от амплитуды деформации цикла. Приведены зависимости критического значения модулей от амплитуды деформации. Максимальное изменение модулей метастабильной стали 12X18H10T составило 4,3%, что на порядок больше, чем в сталях, не претерпевающих фазовых изменений.

Выявлена хорошая корреляция между изменением модулей упругости и характеристиками усталости метастабильной аустенитной стали: упрочнением материала при циклическом деформировании и плотностью энергии в цикле. Получены зависимости между усталостным ресурсом стали 12X18H10T и изменениями модуля сдвига и модуля Юнга, что позволяет по данным акустических измерений производить оценку состояния исследуемой стали.

*Ключевые слова:* усталость, модули упругости, деформационный мартенсит, скорости ультразвуковых волн, вихретоковые измерения.

---

\* Выполнено за счет гранта РФФИ №24-29-00857, <https://rscf.ru/project/24-29-00857/>.

## Введение

Ультразвуковые волны широко используются для диагностики состояния материалов конструкций [1–3]. Как правило, ультразвуковой контроль применяется для нахождения макродефектов: трещин, пор, инородных включений и других дефектов, снижающих прочностные характеристики металла. Наименее развитым направлением диагностики является направление, в котором с помощью структурно-чувствительных акустических измерений производится определение изменения механических характеристик металлических сплавов, подвергаемых силовому нагружению, на ранней стадии разрушения до образования макротрещины. Особенно это касается метастабильных аустенитных сталей, широко используемых в ядерной энергетике, химической промышленности, гидроэнергетике и других отраслях машиностроения.

Одними из важнейших эксплуатационных свойств сталей являются упругие свойства материала. Значения модулей упругости входят в расчеты прочности, в том числе и усталостной. Они применяются для вычисления резонансных частот конструкций, расчет которых необходим, например, для обеспечения безопасности энергетических установок при пуске, эксплуатации и остановке агрегатов. Особенно такие исследования важны для метастабильных сталей, в которых из-за разницы упругих модулей матрицы и образовавшихся фаз значительно изменяются модули упругости и, соответственно, акустические свойства материала в целом.

Известно, что упругие постоянные изотропного материала можно выразить через скорости продольной  $V_l$ , поперечной  $V_t$  ультразвуковой волны и плотность материала [3]:

$$\mu = \rho V_t^2, \quad (1)$$

$$E = \frac{\rho V_t^2 (4V_l^2 - 3V_t^2)}{V_l^2 - V_t^2}, \quad (2)$$

$$K = \rho \left( V_l^2 - \frac{4}{3} V_t^2 \right), \quad (3)$$

$$\nu = \frac{0,5 - (V_t/V_l)^2}{1 - (V_t/V_l)^2}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – модуль сдвига,  $E$  – модуль Юнга,  $K$  – модуль объемного сжатия,  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Величины  $\mu$ ,  $E$ ,  $K$  и  $\nu$  связаны соотношениями [4]:

$$E = \frac{9K}{1 + 3K/\mu}, \quad \nu = \frac{1 - 2\mu/(3K)}{2 + 2K/(3\mu)}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что только два модуля являются независимыми величинами, и упругие свойства в случае изотропного тела определяются двумя упругими постоянными.

При определении упругих модулей метастабильных аустенитных сталей необходимо учитывать, что пластическая деформация индуцирует превращение аустенита, имеющего гранецентрированную кубическую решетку, в фазу  $\alpha'$ -мартенсита с объемно-центрированной кубической решеткой, что повышает напряжение течения материала [5, 6]. Вследствие такого перехода изменяется плотность материала из-за

разницы объемов элементарных ячеек аустенита и образовавшейся фазы деформационного мартенсита согласно следующему выражению [7]:

$$\rho(\Phi) = \rho_0(1 - k_\Phi \Phi), \quad (6)$$

где  $k_\Phi$  – коэффициент, для аустенитной стали 12X18H10T составляет 0,037 [7],  $\rho_0$  – плотность неповрежденного материала,  $\Phi$  – объемное содержание фазы  $\alpha'$ -мартенсита.

Необходимо заметить, что на последних стадиях разрушения до появления макротрещины некоторое влияние на плотность оказывает и микроповрежденность [8, 9].

Отличие магнитных свойств аустенита (парамагнетика) и деформационного  $\alpha'$ -мартенсита (ферромагнетика) составляет несколько порядков [10–12]. Такое отличие магнитных и электромагнитных свойств позволяет устойчиво контролировать объемное содержание  $\alpha'$ -мартенсита с помощью вихретоковых измерений [13–16].

Наиболее важными механическими характеристиками, связанными с процессом усталостного разрушения, являются циклическое упрочнение металла и энергия, затраченная на деформирование материала в цикле.

Задачами проведенного исследования являются определение влияния циклического деформирования на модули упругости метастабильной аустенитной стали 12X18H10T, выявление связи изменения модулей с объемной долей  $\alpha'$ -мартенсита, с циклическим упрочнением и плотностью энергии в цикле, затраченной на деформирование материала.

### Методика эксперимента

Исследования проводились на образцах, изготовленных из метастабильной аустенитной стали 12X18H10T, имеющей химический состав в массовых процентах: С – 0,02; Si – 0,43; Mn – 0,74; Cr – 17,76; Ni – 9,16; Ti – 0,32; S – 0,002; P – 0,033; Cu – 0,23.

Циклическое деформирование (растяжение-сжатие) образцов выполнялось поэтапно на универсальной машине BISS Nano до образования макротрещины в образцах длиной 1 мм. Испытания проводились при контроле полной деформации цикла с коэффициентом асимметрии  $R_\epsilon = 0$  и амплитудой деформаций цикла  $\Delta\epsilon$  от 0,25% до 0,7% и частотой нагружения  $\sim 2$  Гц.

Образцы были вырезаны вдоль направления проката листового катаного материала. Форма образцов и схема установки преобразователей приведена на рис. 1.

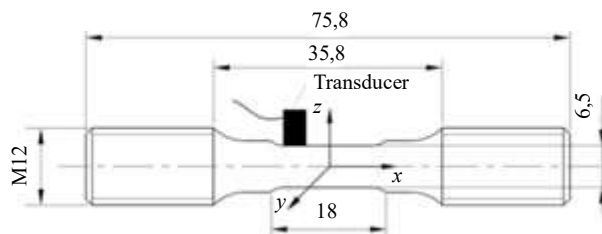


Рис. 1. Форма образца для усталостных испытаний и схема установки преобразователей

Для исследования влияния процесса циклического деформирования на упругие характеристики стали 12X18H10T применялся эхо-импульсный метод ультразвукового контроля. Измерение объемной доли  $\alpha'$ -мартенсита выполнялось с помощью

вихретокового контроля. Измерения проводились в исходном состоянии и после каждого этапа нагружения.

Для расчета упругих модулей согласно выражениям (1)–(3) в ходе эксперимента определялись с помощью выражения (6) плотность материала и скорости распространения упругих волн. Продольные волны распространялись вдоль оси  $z$  со скоростью  $V_l = V_{zz}$ , поляризация поперечных волн была направлена как вдоль оси нагружения  $x$ , так и поперек – вдоль оси  $y$  (см. рис. 1). Скорость поперечных волн  $V_t$  находилась как средняя величина скоростей поперечных волн, поляризованных вдоль  $V_{zx}$  и поперек  $V_{zy}$  оси нагружения, совпадающей с направлением проката,  $V_t = (V_{zx} + V_{zy})/2$ . Первый индекс в обозначении скоростей означает направление распространения волны, второй – направление поляризации.

Расчет скоростей волн производился с помощью выражения  $V_{zi} = 2h/t_{zi}$ , где  $t_{zi}$  – время распространения,  $2h$  – длина акустического пути,  $h$  – толщина образца,  $i = x, y, z$ . Толщина измерялась микрометром. Измерения времени проводились в трех зонах, расположенных на рабочей части образца, не менее 5 раз в каждой зоне. Результаты усреднялись.

Методика измерения времени распространения продольных волн  $t_{zz}$  и сдвиговых волн, поляризованных вдоль  $t_{zx}$  и поперек  $t_{zy}$  оси нагружения, приведена в [14].

Максимальная погрешность измерения времени составляет 1-2 нс, определения скорости продольных волн – 5 м/с, поперечных – 2 м/с.

Плотность материала до начала испытаний найдена с помощью гидростатического взвешивания [7], она составила  $\rho_0 = (7919 \pm 0,8)$  кг/м<sup>3</sup>.

С помощью многофункционального вихретокового прибора МВП-2М проводилось измерение объемной доли фазы деформационного мартенсита  $\Phi$  до и после каждого этапа нагружения. Прибор был предварительно откалиброван на образцах с известным содержанием ферритной фазы. Относительная погрешность измерения не превышала 5%. В неповрежденном материале содержание фазы мартенсита составляло в среднем около 0,2%.

Абсолютная погрешность определения модулей составила для модуля сдвига 0,10 ГПа, модуля Юнга 0,46 ГПа, модуля объемного сжатия 0,60 ГПа.

Плотность энергии  $U_i$ , рассеиваемой в  $i$ -м цикле, и амплитуда напряжения  $\sigma_A$  были получены из петель гистерезиса, регистрируемых универсальной машиной BISS Nano. Суммарная плотность энергии  $U$  рассчитывалась как  $U = \sum_i U_i$  ( $i$  – номер цикла нагружения).

## Результаты исследования

Экспериментальные исследования показали, что в процессе циклического деформирования происходит интенсивное образование деформационного мартенсита. На рис. 2 приведены зависимости объемной доли мартенсита от количества циклов нагружения  $N$  исследуемой стали [8] при различных амплитудах деформации  $\Delta\varepsilon$ , помеченных маркерами.

На рис. 3 приведены зависимости относительного изменения модуля сдвига  $\mu$  (а), модуля Юнга  $E$  (б) и модуля всестороннего сжатия  $K$  (в) от количества циклов нагружения  $N$ . Расчет модулей производился с учетом влияния на плотность изменения объемной доли деформационного мартенсита, согласно выражению (6).

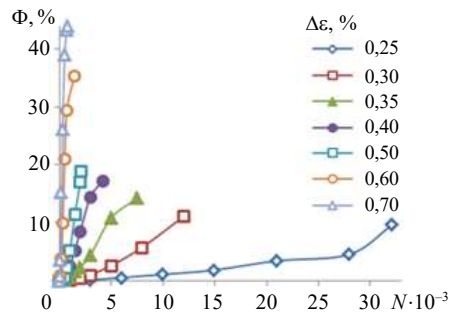


Рис. 2. Зависимость объемной доли мартенсита от количества циклов нагружения

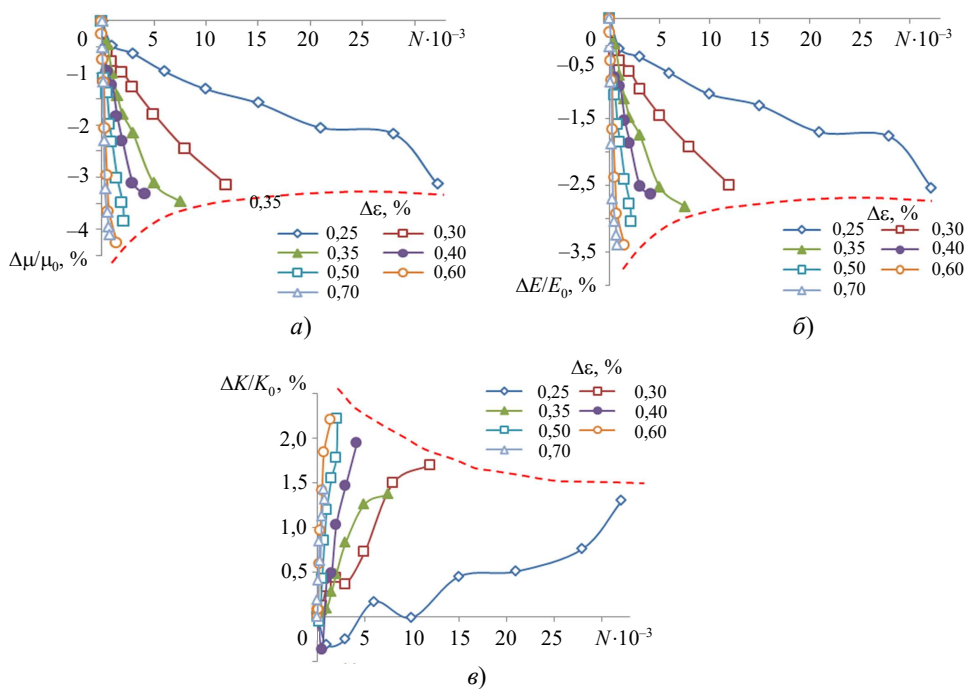


Рис. 3. Зависимости относительного изменения модулей упругости от количества циклов нагружения

За красными линиями вне области начала координат (см. рис. 3) находятся области образования макротрещины. Критическая величина изменения модулей, соответствующая появлению макротрещины, зависит от величины амплитуды деформации цикла. Связи критических значений относительных изменений модуля сдвига  $(\Delta\mu/\mu)^*$  и модуля Юнга  $(\Delta E/E)^*$  с амплитудой деформации определяются выражениями:

$$(\Delta\mu/\mu)^* = -2,71 - 2,19\Delta\epsilon, \quad (\Delta E/E)^* = -2,06 - 1,97\Delta\epsilon, \quad (7)$$

в которых все величины выражаются в процентах.

Уменьшение модулей связано с фазовыми изменениями и накоплением структурных дефектов. Исследования показали, что максимальное изменение модуля сдвига составляло  $(4,3 \pm 0,12)\%$ , модуля Юнга  $-(3,5 \pm 0,2)\%$ , модуля объемного сжатия  $-(2,3 \pm 0,3)\%$  при циклическом деформировании метастабильной аустенитной стали

12X18H10T в заданном диапазоне амплитуд. Это существенно больше изменения модулей при циклическом деформировании, например, углеродистых сталей, которые не претерпевают фазовых изменений. Уменьшение модулей в таких сталях происходит, как правило, на десятые доли процента.

На рис. 4 приведены зависимости суммарной плотности энергии  $U(a)$  и амплитуды напряжения  $\sigma_A$  ( $\delta$ ) от количества циклов нагружения.

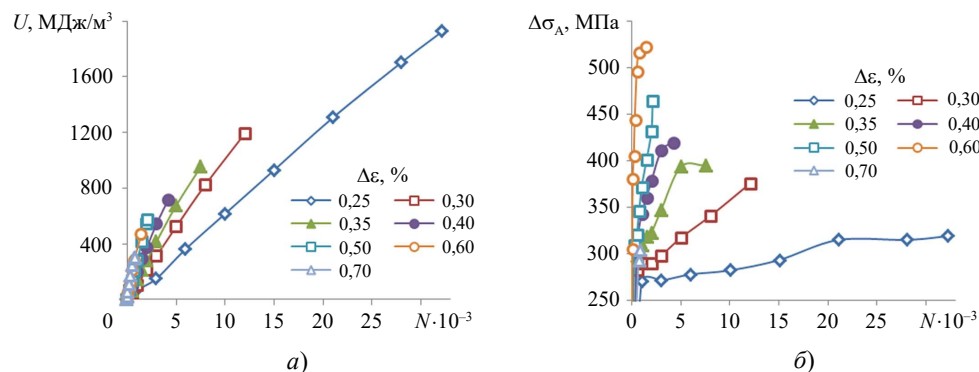


Рис. 4. Зависимости суммарной плотности энергии и изменение амплитуды напряжения от количества циклов нагружения

Как видно из рис. 4, снижение амплитуды деформации ведет к увеличению значения плотности энергии, соответствующей появлению макротрещины, и минимальному значению упрочнения при  $\Delta\varepsilon = 0,25\%$ .

### Обсуждение результатов эксперимента

Кривые, представленные на рис. 2, свидетельствуют о значительном изменении объемной доли деформационного мартенсита. В момент появления макротрещины для амплитуд нагружения в диапазоне 0,25–0,7% объемная доля  $\alpha'$ -мартенсита составляла от 9,7% до 43,9%. Изменение модулей упругости сплава вследствие выделения новой фазы можно учесть, используя различные приближения [17]. В приближении Фойгта модули упругости двухфазного материала рассчитываются с помощью выражения:

$$M_C = M_1\vartheta_1 + M_2\vartheta_2, \quad \vartheta_1 + \vartheta_2 = 1, \quad (8)$$

где  $M_C$  – модули упругости всего материала,  $M_1$ ,  $M_2$  и  $\vartheta_1$ ,  $\vartheta_2$  – модули упругости и объемное содержание первой и второй фаз соответственно.

Из выражения (8) для модуля мартенсита  $M_M$  получим:

$$M_M = M_C - \frac{M_A(1-\Phi)}{\Phi}, \quad (9)$$

где  $M_A$  – модуль упругости аустенита.

Оценочные значения модулей упругости аустенита рассчитывались с помощью выражений (1)–(3) при  $\Phi \approx 0$  и  $\rho = \rho_0$ . Значения модулей  $\alpha'$ -мартенсита, вычисленные с помощью выражения (8), приведены в таблице 1.

Таблица 1

Расчетные значения модулей упругости аустенита и  $\alpha'$ -мартенсита

| $K_A$ , МПа | $\mu_A$ , МПа | $E_A$ , МПа | $K_M$ , МПа | $\mu_M$ , МПа | $E_M$ , МПа |
|-------------|---------------|-------------|-------------|---------------|-------------|
| 161,3       | 79,0          | 204,1       | 166,4       | 70,4          | 187,2       |

Как видно из таблицы 1, наблюдается заметная разница модулей аустенита и  $\alpha'$ -мартенсита – на 11, 8 и 3% для  $\mu$ ,  $E$  и  $K$  соответственно.

Кроме образования деформационного мартенсита, на модули упругости оказывает влияние образование и накопление микродефектов, например, дислокаций, микропор, микротрещин [18–21]. Как правило, для большинства металлических сплавов, в которых не происходят фазовые превращения, изменение модулей из-за этих факторов составляет не более процента.

На изменение энергии  $U$  также влияют деградиационные процессы, связанные с микродефектами, фазовыми превращениями и тепловыми потерями. Тепловые потери энергии, как правило, существенно выше, чем энергия, затраченная на образование микродефектов [22].

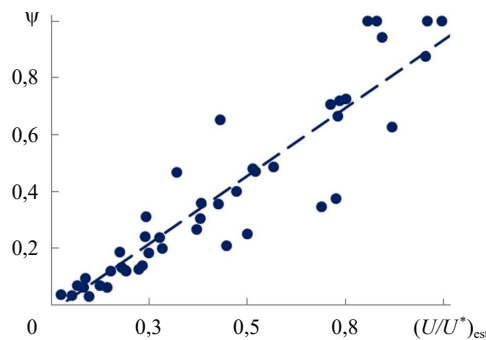
Величина  $U/U^*$  ( $U^*$  – значение параметра  $U$  в момент появления макротрещины) имеет сильную корреляцию с изменением модулей упругости, которая хорошо описывается выражением:

$$\left(\frac{U}{U^*}\right)_{est} = 0,024 - 0,186 \frac{\Delta\mu}{\mu_0} + 0,41 \frac{\Delta K}{K_0} + 1,3 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\Delta\mu}{\mu_0}\right)^2 - 2,71 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\Delta K}{K_0}\right)^2. \quad (10)$$

Коэффициент корреляции между расчетным значением  $(U/U^*)_{est}$  и фактическим  $U/U^*$  составляет 0,94.

Исследования показали, что поврежденность  $\psi$ , рассчитанная с помощью гипотезы линейного накопления повреждений Пальмгрена – Майера, хорошо коррелирует с параметром  $U/U^*$ .

На рис. 5 приведена связь величины поврежденности  $\psi = N/N^*$  ( $N^*$  – количество циклов нагружения до образования макротрещины) с величиной расчетного значения  $(U/U^*)_{est}$ .

Рис. 5. Связь поврежденности  $\psi$  с параметром  $(U/U^*)_{est}$ 

Зависимость поврежденности  $\psi$  от  $(U/U^*)_{est}$  определяется как:

$$\psi = -0,02 + 0,95 \left(\frac{U}{U^*}\right)_{est}. \quad (11)$$

Коэффициент корреляции равен 0,96.

Ресурс материала  $Re$  рассчитывается согласно выражению

$$Re = 1 - \psi. \quad (12)$$

Погрешность оценки ресурса составляет менее 20%.

Найденные зависимости позволяют по данным акустических измерений оценивать ресурс аустенитной метастабильной стали, подвергаемой циклическому деформированию при одноосном или близком к нему виде нагружения.

Расчеты показали, что имеется сильная корреляция упрочнения  $\sigma_A$  с изменением модуля сдвига. Для диапазона амплитуд  $\Delta\varepsilon = 0,25\% - 0,5\%$  связь  $\sigma_A(\Delta\mu/\mu_0)$  описывается линейной зависимостью (рис. 6а):

$$\sigma_A = -33,9 - 4209 \frac{\Delta\mu}{\mu_0}. \quad (13)$$

Для диапазона амплитуд  $\Delta\varepsilon = 0,6\% - 0,7\%$  связь  $\sigma_A(\Delta\mu/\mu_0)$  хорошо аппроксимируется выражением (рис. 6б):

$$\sigma_A = -25,7 - 114 \cdot 10^2 \frac{\Delta\mu}{\mu_0} - 14,2 \cdot 10^4 \left( \frac{\Delta\mu}{\mu_0} \right)^2. \quad (14)$$

Коэффициент корреляции составляет не менее 0,95.

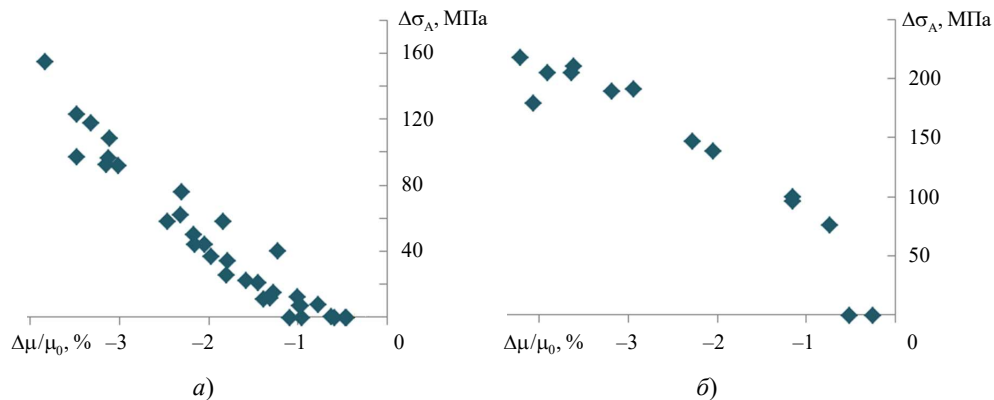


Рис. 6. Зависимость упрочнения  $\Delta\sigma_A$  от относительного изменения модуля сдвига  $\mu$  для разных диапазонов амплитуд

Разница в зависимостях, приведенных на рис. 6, определяется процессами упрочнения-разупрочнения исследуемой стали. При больших амплитудах деформации цикла, характерных для области, близкой к повторно статическому нагружению (см. рис. 6б), интенсивное выделение мартенсита деформации является определяющим для упрочнения сплава. При более низких амплитудах (см. рис. 6а), при которых число циклов до разрушения достигает  $\sim 10^4$  циклов (граница перехода из области малоциклового в область многоциклового [23]), интенсивность образования мартенсита снижается, и на величину упрочнения активно влияют деградационные процессы, связанные с дефектами структуры металлов.



## Закключение

Экспериментальные исследования показали, что интенсивность изменения модулей упругости при усталости метастабильной аустенитной стали существенно зависит от величины амплитуды деформации цикла. Максимальное изменение модулей стали 12X18H10T составляло:  $\Delta\mu/\mu^* = (4,3\pm 0,12)\%$ ,  $\Delta E/E^* = (3,5\pm 0,2)\%$ ,  $\Delta K/K^* = (2,3\pm 0,3)\%$ , что на порядок больше чем в сталях, не претерпевающих фазовых изменений. Значительное изменение связано с увеличением объемной доли деформационного мартенсита, модули которого существенно отличаются от модулей аустенита.

Исследование показало хорошую корреляцию между изменением модулей упругости и характеристиками сопротивления усталости метастабильной аустенитной стали: упрочнением материала и плотностью энергии в цикле. Получены связи между усталостным ресурсом стали 12X18H10T и изменениями модулей сдвига и Юнга. Это позволит по данным акустических измерений оценивать ресурсные характеристики при одноосном или близком к нему виде нагружения метастабильной стали.

### Список литературы

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. *Незрушающий контроль и диагностика: Справочник*. Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.
2. Burrascano P., Callegari S., Montisci A., Ricci M., Versaci M. *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems. Industrial Application Issues*. Cham: Springer, 2015. 324 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10566-6>.
3. Алешин Н.П., Белый В.Е., Вopilкин А.Х. и др. *Методы акустического контроля металлов*. Под ред. Н.П. Алешина. М.: Машиностроение, 1989. 456 с.
4. Ерофеев В.И. *Волновые процессы в твердых телах с микроструктурой*. М.: Изд-во Московского университета, 1999. 328 с.
5. Das A., Sivaprasad S., Chakraborti P.C., Tarafder S. Morphologies and characteristics of deformation induced martensite during low cycle fatigue behaviour of austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528. Iss. 27. P. 7909–7914. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.011>.
6. Behrens B.A., Hübner S., Bouguecha A., Knigge J., Voges-Schwieger K., Weilandt K. Local strain hardening of metal components by means of martensite generation. *Advanced Materials Research*. 2010. Vol. 137. P. 1–33. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.137.1>.
7. Kachanov M., Mishakin V., Pronina Yu. On low cycle fatigue of austenitic steel. Part II: Extraction of information on microcrack density from a combination of the acoustic and eddy current data. *International Journal Engineering Science*. 2021. Vol. 169. Article No 103569. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2021.103569>.
8. Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A., Kachanov M. On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part I: Changes of Poisson's ratio and elastic anisotropy. *International Journal Engineering Science*. 2021. Vol. 168. Article No 103567. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2021.103567>.
9. Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kirikov S.V., Klyushnikov V.A. Evaluation of condition of low-carbon steels experiencing plastic deformation using the effect of acoustic birefringence. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2021. Vol. 36. Iss. 2. P. 225–235. <https://doi.org/10.1080/10589759.2020.1728266>.
10. Khan S.Z., Khan T.M., Joya Y.F., Khan M.A., Ahmed S., Shah A. Assessment of material properties of AISI 316L stainless steel using non-destructive testing. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2016. Vol. 31. Iss. 4. P. 360–370. <https://doi.org/10.1080/10589759.2015.1121265>.
11. Kim C. Nondestructive evaluation of strain-induced phase transformation and damage accumulation in austenitic stainless steel subjected to cyclic loading. *Metals*. 2017. Vol. 8. Iss. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/met8010014>.
12. Kinoshita K., Nakazaki R., Matsumoto E. Variation of the magnetic properties of the

martensite phase of SUS304 steel due to tensile deformation. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2014. Vol. 45. P. 45–52. <https://doi.org/10.3233/JAE-141811>.

13. Liu K., Zhao Z., Zhang Z. Eddy current assessment of the cold rolled deformation behavior of AISI 321 stainless steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2012. Vol. 21. Iss. 8. P. 1772–1776. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-0080-4>.

14. Khan S.H., Farhad Ali., Iqbal M.A., Nusair Khan A. Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction. *Computational Materials Science*. 2008. Vol. 43. Iss. 4. P. 623–628. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.01.034>.

15. Silva V.M.A., Camerini C.G., Pardal J.M., de Blás J.C.G., Pereira G.R. Eddy current characterization of cold-worked AISI 321 stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 3. P. 395–401. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.002>.

16. Shaira M., Guy P., Courbon J., Godin N. Monitoring of martensitic transformation in austenitic stainless steel 304 L by eddy currents. *Research in Nondestructive Evaluation*. 2010. Vol. 21. Iss. 2. P. 112–126. <https://doi.org/10.1080/09349840903427854>.

17. Шермергор Т.Д. *Теория упругости микронеподородных сред*. М.: Наука, 1977. 400 с.

18. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. *Ультразвуковые методы в физике твердого тела*. М.: Мир, 1972. 308 с.

19. Kachanov M., Sevostianov I. *Micromechanics of Materials, with Applications*. Cham: Springer, 2018. 712 p. DOI: 10.1007/978-3-319-76204-3.

20. Салганик Р.Л. Механика тел с большим числом трещин. *Механика твердого тела*. 1973. №4. С. 149–158.

21. Вавакин А.С., Салганик Р.Л. Об эффективных характеристиках неоднородных сред с изолированными неоднородностями. *Механика твердого тела*. 1975. №3. С. 65–76.

22. Фёдоров В.В. *Основы эргодинамики и синергетики деформируемых тел. Ч. 3. Основы эргодинамики деформируемых тел*. Калининград: КГТУ, 2014. 222 с.

23. Коллинз Дж. *Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение*. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 624 с.

#### References

1. Klyuev V.V., Sosnin F.R., Kovalev A.V. et al. *Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika: Spravochnik [Nondestructive Testing and Diagnostics. Guide]*. Ed. V.V. Klyuev. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1995. 488 p. (In Russian).

2. Burrascano P., Callegari S., Montisci A., Ricci M., Versaci M. *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems. Industrial Application Issues*. Cham. Springer. 2015. 324 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10566-6>.

3. Aleshin N.P., Belyy V.E., Vopilkin A.Kh. et al. *Metody akusticheskogo kontrolya metallov [Methods of Acoustic Control of Metals]*. Ed. N.P. Aleshin. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1989. 456 p. (In Russian).

4. Erofeev V.I. *Volnovye protsessy v tverdykh telakh s mikrostrukturoy [Wave Processes in Solids with Microstructure]*. Moscow. MGU Publ. 1999. 328 p. (In Russian).

5. Das A., Sivaprasad S., Chakraborti P.C., Tarafder S. Morphologies and characteristics of deformation induced martensite during low cycle fatigue behaviour of austenitic stainless steel. *Mater. Sci. Eng. A*. 2011. Vol. 528. Iss. 27. P. 7909–7914. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.011>.

6. Behrens B.A., Hübner S., Bouguecha A., Knigge J., Voges-Schwieger K., Weilandt K. Local strain hardening of metal components by means of martensite generation. *Adv. Mat. Res.* 2010. Vol. 137. P. 1–33. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.137.1>.

7. Kachanov M., Mishakin V., Pronina Yu. On low cycle fatigue of austenitic steel. Part II: Extraction of information on microcrack density from a combination of the acoustic and eddy current data. *Int. J. Eng. Sci.* 2021. Vol. 169. Article No 103569. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2021.103569>.

8. Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A., Kachanov M. On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part I: Changes of Poisson's ratio and elastic anisotropy. *Int. J. Eng. Sci.* 2021. Vol. 168. Article No 103567. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2021.103567>.

9. Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kirikov S.V., Klyushnikov V.A. Evaluation of condition of low-carbon steels experiencing plastic deformation using the effect of acoustic birefringence.

*Nondestruct. Test. Evaluation*. 2021. Vol. 36. Iss. 2. P. 225–235. <https://doi.org/10.1080/10589759.2020.1728266>.

10. Khan S.Z., Khan T.M., Joya Y.F., Khan M.A., Ahmed S., Shah A. Assessment of material properties of AISI 316L stainless steel using non-destructive testing. *Nondestruct. Test. Evaluation*. 2016. Vol. 31. Iss. 4. P. 360–370. <https://doi.org/10.1080/10589759.2015.1121265>.

11. Kim C. Nondestructive evaluation of strain-induced phase transformation and damage accumulation in austenitic stainless steel subjected to cyclic loading. *Metals*. 2017. Vol. 8. Iss. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/met8010014>.

12. Kinoshita K., Nakazaki R., Matsumoto E. Variation of the magnetic properties of the martensite phase of SUS304 steel due to tensile deformation. *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* 2014. Vol. 45. P. 45–52. <https://doi.org/10.3233/JAE-141811>

13. Liu K., Zhao Z., Zhang Z. Eddy current assessment of the cold rolled deformation behavior of AISI 321 stainless steel. *J. Mater. Eng. Perform.* 2012. Vol. 21. Iss. 8. P. 1772–1776. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-0080-4>.

14. Khan S.H., Farhad Ali., Iqbal M.A., Nusair Khan A. Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction. *Comput. Mater. Sci.* 2008. Vol. 43. Iss. 4. P. 623–628. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.01.034>.

15. Silva V.M.A., Camerini C.G., Pardal J.M., de Blás J.C.G., Pereira G.R. Eddy current characterization of cold-worked AISI 321 stainless steel. *J. Mater. Res. Technol.* 2018. Vol. 7. Iss. 3. P. 395–401. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.002>.

16. Shaira M., Guy P., Courbon J., Godin N. Monitoring of martensitic transformation in austenitic stainless steel 304 L by eddy currents. *Res. Nondestruct. Evaluation*. 2010. Vol. 21. Iss. 2. P. 112–126. <https://doi.org/10.1080/09349840903427854>.

17. Shermegor T.D. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred [Theory of Elasticity of Microneogeneous Media]*. Moscow. Nauka Publ. 1977. 400 p. (In Russian).

18. Truell R., Elbaum C., Chick B.B. *Ultrasonic Methods in Solid State Physics*. New York. Academic Press. 370 p.

19. Kachanov M., Sevostianov I. *Micromechanics of Materials, with Applications*. Cham. Springer. 2018. 712 p. DOI: 10.1007/978-3-319-76204-3.

20. Salganik R.L. Mekhanika tel s bolshim chislom treshchin [Mechanics of bodies with a large number of cracks]. *Mekhanika tverdogo tela [Mechanics of Solids]*. 1973. Iss. 4. P. 149–158 (In Russian).

21. Vavakin A.S., Salganik R.L. Ob effektivnykh kharakteristikakh neodnorodnykh sred s izolirovannymi neodnorodnostyami [On effective characteristics of inhomogeneous media with isolated inhomogeneities]. *Mekhanika tverdogo tela [Mechanics of Solids]*. 1975. Iss. 3. P. 65–76 (In Russian).

22. Fedorov V.V. *Osnovy ergodinamiki i sinergetiki deformiruemykh tel. Ch. 3. Osnovy ergodinamiki deformiruemykh tel [Fundamentals of Ergodynamics and Synergetics of Deformable Bodies. Pt. 3. Fundamentals of Ergodynamics of Deformable Bodies]*. Kaliningrad. KGTU Publ. 2014. 222 p. (In Russian).

23. Collins J.A. *Failure of Materials in Mechanical Design. Analysis. Prediction. Prevention*. New York. John Wiley & Sons. 1981. 629 p.

**STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN FATIGUE CHARACTERISTICS  
AND ELASTIC MODULUS OF METASTABLE AUSTENITIC STEELS\***

**Sergeeva O.A.<sup>1</sup>, Mishakin V.V.<sup>2</sup>, Klyushnikov V.A.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Volga-Spetsgidroenergmontazh – Kamspetsenergo Ltd,  
Naberezhnye Chelny, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences –  
Branch of Federal Research Center “Institute of Applied Physics  
n.a. A.V. Gaponov-Grekhov of the RAS”, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

sergeevaoa\_kse@mail.ru

*Received by the Editor 2024/01/18*

This work is devoted to studying the influence of cyclic deformation on the elastic moduli of metastable austenitic steel. The estimated calculation of the modules of the strain-induced martensite and the modules of the matrix of the material (austenite) in the Voigt approximation.

The modulus calculations were made according to the ultrasonic wave velocity measurements taking into account changes in the density of the material due to the difference in the volumes of the unit cells of the matrix and the  $\alpha'$ -martensite. The volume fraction of  $\alpha'$ -martensite and its change during cyclic deformation were determined by the eddy-current method. The influence of the strain cycle amplitude on the increase in the volume fraction of martensite was studied. The dependences of the relative change in Young's modulus, shear modulus, volume compression modulus on the number of loading cycles for metastable steel 12Kh18N10T are given. Relationships between the moduli change and the characteristics of cyclic loading of steel are obtained: the hardening of the material and the energy density in the cycle, used to calculate the service life using the methods of deformable solid mechanics. Studies shown that the critical change in the modules corresponding to the appearance of a microcrack depends on the strain cycle amplitude. The maximum change in the modules of metastable steel 12Kh18N10T was 4.5%; that by an order more than in steels that don't undergo phase transformations.

A high degree of correlation between the change in elastic moduli and the fatigue characteristics of metastable austenitic steel is revealed: the hardening of the material and the energy density in the cycle. Correlations between the fatigue life of 12Kh18N10T steel and the change in elastic modulus – shear modulus and Young's modulus are obtained, which makes it possible to assess the state of the studied steel based on acoustic measurements.

*Keywords:* fatigue, elastic moduli, strain-induced martensite, ultrasonic wave velocities, eddy current measurements.

---

\*The research supported by the Russian Scientific Foundation (project No 24-29-00857).  
<https://rscf.ru/en/project/24-29-00857/>).