

УДК 620.179.147:620.179.162

**В. В. МИШАКИН<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, гл. науч. сотр. лаборатории неразрушающего контроля и диагностики материалов и конструкций;  
**В. А. КЛЮШНИКОВ<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории неразрушающего контроля и диагностики материалов и конструкций;  
**А. В. ЖИДКОВ<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, доц. кафедры теоретической, компьютерной и экспериментальной механики Института информационных технологий, математики и механики

## ВЛИЯНИЕ УСТАЛОСТИ НА МОДУЛЬ УПРУГОСТИ И МОДУЛЬ РАЗГРУЗКИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т

<sup>1</sup>Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН»

Россия, 603024, г. Н. Новгород, ул. Белинского, д. 85. Тел.: (831) 432-03-00; эл. почта: ndt@ipmran.ru

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского»

Россия, 603022, г. Н. Новгород, пр. Гагарина, д. 23. Тел.: (831) 465-66-11; эл. почта: zhidkov@mm.unn.ru

*Ключевые слова:* нержавеющая сталь, метастабильный аустенит, усталость, упругие модули, модуль разгрузки, деформационное мартенситное превращение, ультразвуковой метод, вихретоковый метод.

---

*Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния усталости на упругие модули нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т. Проведено сравнение характера изменения модуля разгрузки, полученного при анализе петель гистерезиса и модуля упругости, рассчитанного по данным акустических измерений. Проведен анализ влияния накопления поврежденности и мартенситного превращения, вызванного деформацией, на зависимости изменения модулей при циклическом деформировании.*

---

### Введение

Одними из характеристик, отражающих сложный процесс разрушения поликристаллического материала как при статическом нагружении, так и при циклическом деформировании, являются модули упругости. Как правило, значение статического модуля Юнга  $E$  определяют при нагрузке материала в процессе механических испытаний на растяжение в упругой области при малых скоростях деформирования. Модуль  $E$  рассчитывается как отношение приложенного механического напряжения  $\sigma$  к величине деформации  $\varepsilon$  при достижении усилия, соответствующему напряжению, равному 70–80 % от предполагаемого предела пропорциональности [1]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (1)$$

На модуль  $E$  могут влиять дефекты структуры, в частности микроповрежденность, полученная, например, в результате пластического деформирования. Связь модуля Юнга с параметром поврежденности согласно [2] выражается как:

$$E = E_0(1 - D), \quad (2)$$

где  $E_0$  – модуль Юнга неповрежденного материала,  $D$  – поврежденность, определяемая как отношение изменения площади сечения в результате образования микропор, микротрещин к площади сечения неповрежденного материала.

Кроме накопления микроповреждений, на модули упругости может оказывать заметное влияние образование фаз, например, образование деформационного мартенсита [3] при циклическом деформировании.

Помимо измерения статических модулей, существует большая практика определения динамических модулей по данным измерения скоростей упругих волн [4] и плотности материала. Например, связь динамического модуля Юнга  $E_d$  со скоростями упругих волн выражается формулой:

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

где  $V_t$  и  $V_l$  – скорость сдвиговых и продольных объемных волн;  $\rho$  – плотность.

В общем случае динамические модули зависят от частоты колебания упругих волн [5]. Модули  $E_d$  и  $E$  для металлических сплавов при частотах ультразвуковых волн в мегагерцовом диапазоне отличаются незначительно.

Нагружение материала при измерении модулей  $E_d$  и  $E$  осуществляется в сугубо упругой области, ниже предела пропорциональности, при этом необратимые структурные изменения не происходят. В отличие от этих нагрузок, значительные циклические деформации при усталости ведут к необратимым структурным изменениям в материале, развитию спектра дефектов: точечных, линейных, объемных и как завершающая стадия накопления микроповреждений – к образованию макротрещины. На процесс разрушения в этом случае активно влияют образование зон микропластических деформаций [6] и процесс возврата, связанный с релаксацией микронапряжений. Кривая зависимости напряжения  $\sigma$  от деформации  $\varepsilon$  формируется в петлю гистерезиса  $\sigma(\varepsilon)$ , участки нагрузки-разгрузки становятся выражено нелинейными.

Одним из параметров, характеризующих процесс усталостного разрушения, является модуль разгрузки  $E_{un}$ , определяемый как соотношение  $\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$  на разгрузочном участке кривой петли гистерезиса [7, 8], рис. 1.

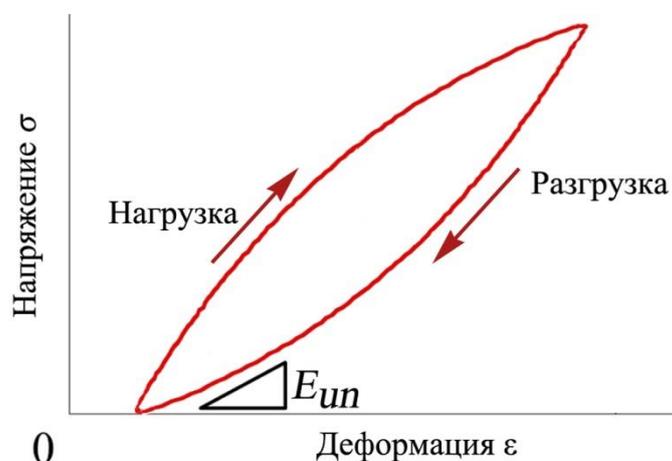


Рис. 1. Разгрузочный модуль, определяемый из петли гистерезиса

Нелинейность кривой  $\sigma(\varepsilon)$  связана с эффектами неупругости и вязкоупругости, которые ведут к разности фаз между приложенным напряжением и деформацией, и в этом случае модуль Юнга определяется как комплексная характеристика. Эффекты неупругости и вязкоупругости проявляются в связи с элементарными актами релаксационных процессов на уровне микроструктуры, например, перескоке атомов внедрения в разбавленном твердом растворе, кооперативном перемещении атомов на границе зерна или перестройке дислокаций, совместном движении дислокаций с примесными атмосферами и др. процессами, связанными с потерей механической энергии на тепло и накопление различного рода дефектов, несущих скрытую энергию повреждаемости [9]. Площадь петли гистерезиса определяет плотность механической энергии, потерянной при циклическом деформировании.

Необходимо учитывать, что на вид зависимости  $\sigma(\varepsilon)$  влияют факторы, оказывающее действие на силы межатомных связей, например, наличие легирующих элементов, определяющих их упорядоченность в твердом растворе и др. Надо также принимать во внимание, что пластическое деформирование метастабильных аустенитных сталей индуцирует мартенситное превращение [10], вследствие чего изменяются модули упругости всего материала из-за появления фазы мартенсита деформации, имеющего модули упругости, отличные от модулей аустенита [3].

Стадийность процесса разрушения также отражается на изменении упругих характеристик [11]. На начальных этапах нагружения образование фазы мартенсита деформации практически не происходит (инкубационная стадия согласно [12]), и его воздействие на модули минимально. После инкубационной стадии наблюдается активное увеличение объемной доли мартенсита и изменение модулей. При последующем нагружении интенсивность мартенситного превращения значительно уменьшается, что совпадает с активным образованием микроповрежденности, снижающей модули упругости.

Регистрация модуля разгрузки позволяет оценить этапы разрушения метастабильной аустенитной стали и определить начало накопления микроповреждений по динамическим кривым  $\sigma(\varepsilon)$ . Представляет интерес исследования влияние основных деградационных процессов: фазовых изменений и накопления микроповреждений на модуль разгрузки и динамический модуль Юнга.

Целью работы является проведение экспериментальных исследований влияния циклического деформирования и связанных с ним деградационных процессов структуры металла на модуль упругости и модуль разгрузки стали 12X18H10T.

#### **Методика проведения эксперимента**

Для проведения испытаний на малоцикловую усталость были изготовлены образцы круглого сечения (диаметр рабочей зоны 7 мм) из метастабильной аустенитной стали 12X18H10T.

На рабочей зоне каждого образца были изготовлены плоские параллельные площадки с двух сторон для проведения измерений (рис. 1).

Испытания проводились на сервогидравлической испытательной машине *BISS Nano UT-01-0025* при контроле полной деформации цикла с коэффициентом асимметрии  $R_\varepsilon = 0$ , постоянной скоростью деформации  $5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Размах деформации цикла  $\Delta\varepsilon$  составлял 0,8 %, 1,2 % и 1,4 %, число циклов до разрушения

$N_f$  при этом составило 5000, 1400 и 800, соответственно. При испытании проводилась запись петель гистерезиса для каждого цикла нагружения. С помощью программного обеспечения испытательной машины определялись модули разгрузки (*Unloading Modulus*)  $E_{un}$  (рис. 1). Каждый испытуемый образец нагружался поэтапно.

Для определения динамического модуля использовались ультразвуковые измерения. Для нахождения объемной доли мартенсита – вихретоковые измерения. Ультразвуковые и вихретоковые измерения проводились перед испытанием и после каждого этапа нагружения вплоть до образования макротрещины длиной 1 мм после разгрузки образцов.

Скорости ультразвуковых волн, входящих в выражение (2), рассчитывались по соотношению толщины  $h$  (измерялась микрометром до и после каждого этапа нагружения) и времени распространения волны  $t$ :

$$V = \frac{2h}{t}. \quad (4)$$

Для измерения времени распространения продольных и сдвиговых упругих волн применялся эхо-импульсный метод ультразвукового контроля. Излучение сдвиговых волн производилось с помощью пьезоэлектрического преобразователя *V157-RM*, продольных волн – преобразователем *V1091-RM*, производства *Olympus* с центральной частотой  $\sim 5$  МГц и диаметром рабочей зоны 3 мм. Для обеспечения передачи сдвиговых волн с преобразователя в образец применялась эпоксидная смола без отвердителя, при передаче продольных волн – специальный гель «Медиагель». Продольные и поперечные волны распространяются вдоль оси  $Z$  (3) (рис. 2); поляризация сдвиговых волн была направлена вдоль оси нагрузки  $X$  (1) и поперек нее (вдоль оси  $Y$  (2)).

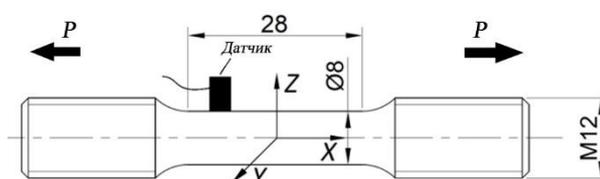


Рис. 2. Форма образца для усталостных испытаний и схема установки преобразователей

Время распространения сдвиговых волн рассчитывалось как среднее время распространения волн, поляризованных вдоль и поперек оси нагружения. Генерация электрических импульсов осуществлялась ультразвуковым дефектоскопом (A1212 МАСТЕР, ООО «АКС», Россия). Для получения временной развертки сигналов от пьезоэлектрического преобразователя использовался цифровой осциллограф (ЛА-n1USB, ООО «Руднев-Шиляев», Россия) и персональный компьютер с установленным на нем приложением *ADCLab*. Частота дискретизации цифрового осциллографа составляла 1000 МГц, соответственно, разрешение развертки по времени составляло 1 нс. Полученные амплитудно-временные диаграммы эхоимпульсов сохранялись в файлы данных для анализа и обработки в программе *MathCAD*. Погрешность измерения времени составляет не более 1-2 нс, определения скоростей – 5 м/с. Более подробная методика измерений приведена в [11].

Плотность материала определялась с помощью гидростатического взвешивания до начала испытаний [13] и составила  $\rho_0 = 7\,919 \pm 0,8$  кг/м<sup>3</sup>.

Используя полученные значения скоростей и плотности материала в исходном состоянии, был рассчитан динамический модуль Юнга  $E_d$  на каждом этапе нагружения согласно формуле (3). Погрешность определения  $E_{un}$  составляла 2-3 ГПа, погрешность  $E_d$  менее 1 ГПа.

Измерение объемной доли мартенсита проводилось с помощью многофункционального вихретокового прибора «МВП-2М» производства ООО «НПЦ «Кропус», Россия). Прибор был разработан для определения процентного содержания магнитной фазы (ферромагнитной фазы) в аустенитных сталях. Устройство было откалибровано изготовителем по образцам с известным содержанием феррита. Относительная погрешность измерения не превышала 5 %.

### Результаты и обсуждение

В результате испытаний на усталость были получены нормированные значения изменения модуля разгрузки  $\Delta E_{iun}/E_{0iun}$  от  $N_i/N_i^*$  ( $N_i$  и  $N_i^*$  – текущее и предельное число циклов нагружения на  $i$ -м этапе соответственно) для каждого этапа нагружения (рис. 3–5).

Величина  $\Delta E_{iun}/E_{i0un}$  определялась как:

$$\frac{\Delta E_{iun}}{E_{0iun}} = \frac{E_{iun} - E_{0iun}}{E_{0iun}}, \quad (5)$$

где  $E_{iun}$  – текущее значение модуля разгрузки на  $i$ -м этапе,  $E_{0iun}$  – модуль разгрузки в начале этапа нагружения.

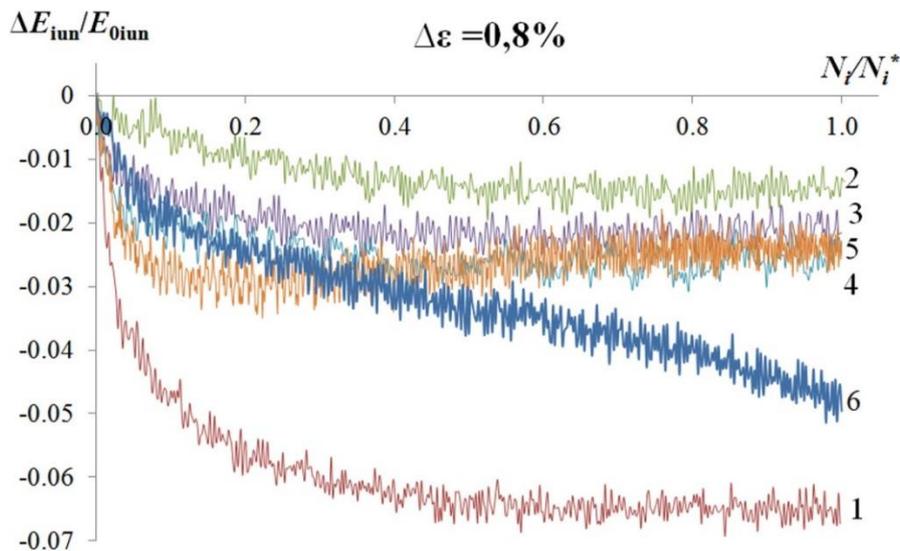


Рис. 3. Нормированные значения изменения модуля разгрузки  $E_{un}$  на разных этапах нагружения при размахе деформации  $\Delta \varepsilon = 0,8$  %

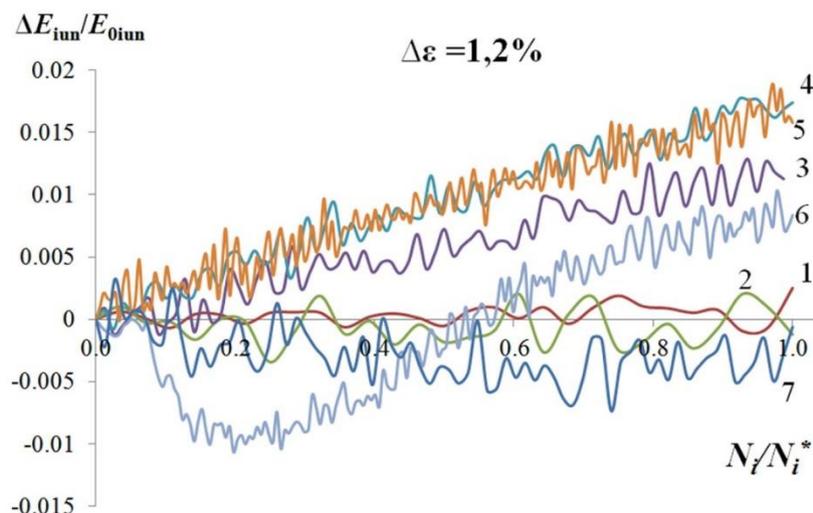


Рис. 4. Нормированные значения изменения модуля разгрузки  $E_{un}$  на разных этапах нагружения при размахе деформации  $\Delta\varepsilon = 1,2\%$

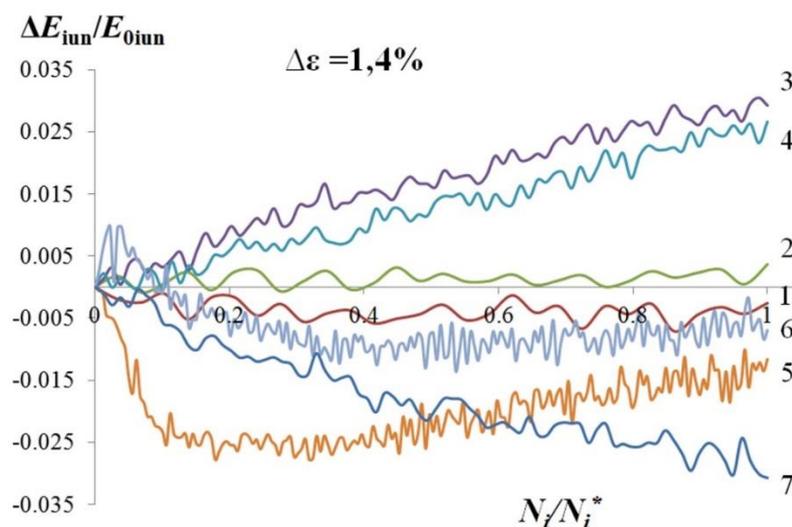


Рис. 5. Нормированные значения изменения модуля разгрузки  $E_{un}$  на разных этапах нагружения при размахе деформации  $\Delta\varepsilon = 1,4\%$

Как видно из рис. 3–5, скорости изменения модуля разгрузки на различных этапах циклического деформирования заметно отличаются. На начальных участках каждого этапа наблюдается нестационарная часть (нелинейная), которая после ее прохождения (при  $N_i/N_i^* > 0,5$ ), а на некоторых этапах и раньше, переходит в зависимость близкую к линейной.

На линейных участках зависимости модуля разгрузки  $E_{un}$  от числа циклов для каждого  $i$ -го этапа были рассчитаны скорости его изменения  $\Delta E_{un}/\Delta N$ . На рис. 6 приведены значения скорости изменения для  $\Delta\varepsilon = 0,8; 1,2$  и  $1,4\%$ . Можно отметить, что скорость изменения модуля разгрузки при  $\Delta\varepsilon = 0,8\%$  практически постоянна до заключительной части нагружения, тогда как при размахах деформации  $1,2\%$  и  $1,4\%$  скорость увеличивается на начальных этапах. На

заключительном этапе, близком к образованию макротрещины, скорость изменения модуля разгрузки принимает отрицательное значение для всех размахов деформации.

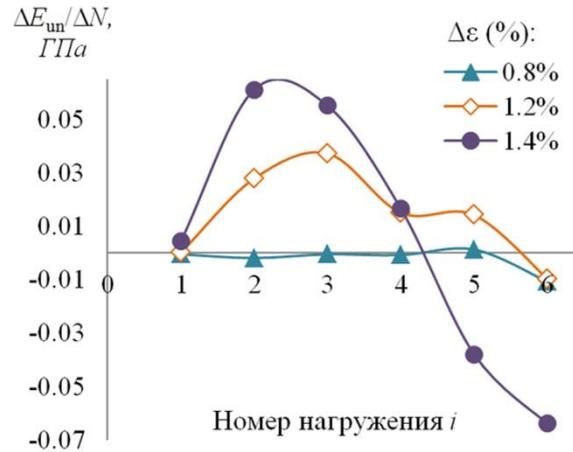


Рис. 6. Динамика изменения модуля разгрузки при циклическом деформировании стали 12X18H10T

Существенное увеличение  $\Delta E_{un}/\Delta N$  на начальных этапах нагружения при  $\Delta \varepsilon = 1,2; 1,4\%$  связано, по-видимому, со значительной скоростью роста объемной доли деформационного мартенсита  $\Phi$  при больших амплитудах деформации после прохождения инкубационной стадии (рис. 7) и, соответственно, с интенсивным упрочнением сплава.

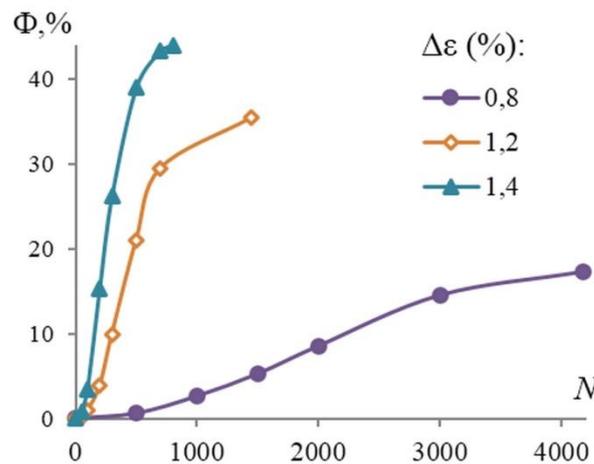


Рис. 7. Изменение объемной доли деформационного мартенсита при различных размахах деформации цикла

Кристаллы мартенсита уменьшают подвижность дислокаций, перераспределение деформаций между упругой и пластической составляющей происходит в сторону упругой, проявление микропластических деформаций снижается, нелинейность кривой  $\sigma(\varepsilon)$  уменьшается, модуль разгрузки увеличивается. При дальнейшем нагружении интенсивность мартенситного превращения замедляется, в то время как интенсифицируется процесс накопления

поврежденности, что ведет к разупрочнению сплава и уменьшению модуля разгрузки, нелинейность кривой  $\sigma(\epsilon)$  на участке разгрузки петли гистерезиса растет.

В отличие от динамики изменения модуля разгрузки, изменение динамического модуля Юнга принимает отрицательное значение на всех этапах нагружения и носит монотонный характер, рис. 8.

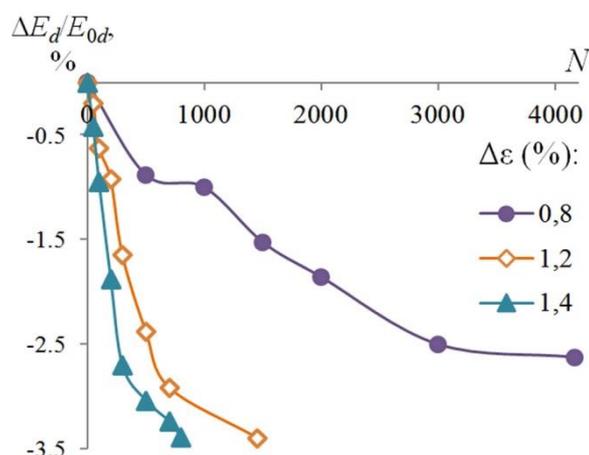


Рис. 8. Динамика изменения динамического модуля упругости при циклическом деформировании стали 12X18H10T

Изменение модуля  $E_d$  вследствие образования деформационного мартенсита и накопления микроповреждений  $D$  можно записать в виде:

$$\Delta E_d(\Phi, D) = \frac{dE}{d\Phi} \Delta\Phi + \frac{dE}{dD} \Delta D \quad (6)$$

Исходя из того, что как увеличение объемной доли мартенсита деформации [3], так и накопление микроповреждений [14], приводят к уменьшению модуля Юнга; изменение модуля  $\Delta E_d$  на всем протяжении усталостного разрушения имеет отрицательное значение.

### Выводы

В результате исследования показано, что основные деградационные процессы, происходящие в исследуемой метастабильной аустенитной стали при усталостном разрушении (образование деформационного мартенсита, накопление микроповреждений) активно влияют на динамические и разгрузочные модули, рассчитанные по кривым петли гистерезиса. Динамический модуль Юнга, определенный по данным акустических измерений, монотонно уменьшается на протяжении всего циклического деформирования. Это связано с тем, что появление мартенсита деформации и накопление микроповреждений снижают значение модуля.

Для модуля разгрузки получено, что скорость его изменения в процессе нагружения имеет немонотонный характер. На начальных этапах циклического деформирования происходит рост скорости, что объясняется интенсивным увеличением объемной доли мартенсита и соответственно, упрочнением сплава, перераспределением между упругой и пластической составляющей деформации в сторону упругой. На этапе интенсивного накопления повреждений скорость роста



объемной доли мартенсита замедляется, в то время как интенсифицируется процесс накопления поврежденности, ведущий к разупрочнению сплава и уменьшению скорости изменения модуля разгрузки до отрицательных значений. Немонотонное изменение модуля разгрузки позволяет определить начало этапа интенсивного накопления микроповреждений, заканчивающегося образованием макротрещины.

*Исследования были выполнены в ИПМ РАН в рамках государственного задания ИПФ РАН на 2024-2026 г.г., регистрационный номер НИОКТР 124031500079-2 (шифр FFUF-2024-0031).*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 16.07.84 № 2515. – Дата введения 1984–07–16. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 24 с. – Текст : непосредственный.
2. Леметр, Ж. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов / Ж. Леметр. – Текст : непосредственный // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1983. – № 1. – С. 124–134.
3. Сергеева, О. А. Исследование связи характеристик циклического деформирования с модулями упругости метастабильных аустенитных сталей / О. А. Сергеева, В. В. Мишакин, В. А. Ключников. – Текст : непосредственный // Проблемы прочности и пластичности. – 2024. – Том 86, № 1. – С. 94–105.
4. Методы акустического контроля металлов / под редакцией Н. П. Алешина. – Москва : Машиностроение, 1989. – 456 с. – ISBN 5-217-00492-4. – Текст : непосредственный.
5. Труэлл, Р. Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. – Москва : Мир, 1972. – 308 с. – Текст : непосредственный.
6. Гурьев, А. В. Роль микропластических деформаций в формировании частотной зависимости / А. В. Гурьев, А. П. Карпов. – Текст : непосредственный // Проблемы прочности. – 1986. – № 4. – С. 24–27.
7. Романов, А. Н. Разрушение при малоцикловом нагружении / А. Н. Романов. – Москва : Наука, 1988. – 282 с. – ISBN 5-02-006534-X. – Текст : непосредственный.
8. Гусенков, А. П. Прочность при изотермическом и неизотермическом нагружении / А. П. Гусенков. – Москва : Наука, 1979. – 295 с. – Текст : непосредственный.
9. Федоров, В. В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел / В. В. Федоров. – Ташкент : ФАН, 1985. – 168 с. – Текст : непосредственный.
10. Гольдштейн, М. И. Металлофизика высокопрочных сплавов / М. И. Гольдштейн, В. С. Литвинов, Б. М. Бронфин. – Москва : Металлургия, 1986. – 310 с. – Текст : непосредственный.
11. Мишакин, В. В. Влияние микроповрежденности на упругие характеристики метастабильных аустенитных сталей при усталостном разрушении / В. В. Мишакин, О. А. Сергеева, В. А. Ключников. – Текст : непосредственный // Журнал технической физики. – 2024. – Том 94, выпуск 1. – С. 60–65.
12. Krupp, U. Deformation-induced martensite formation during cyclic deformation of metastable austenitic steel: Influence of temperature and carbon content / U. Krupp, C. West, H.-J. Christ // *Mat. Sci. Eng. A*. – 2008. – Vol. 481–482. – P. 713–717.
13. Kachanov, M. 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 / M. Kachanov, V. Mishakin, Y. Pronina // *International Journal of Engineering Science*. – 2021. – Vol. 169. – P. 103569. – DOI 10.1016/j.ijengsci.2021.103569.



14. Kachanov, M. Micromechanics of Materials, with Applications / M. Kachanov, I. Sevostianov. – Berlin : Springer International Publishing AG, 2018. – 712 p. – ISBN 978-3-319-76204-3. – DOI 10.1007/978-3-319-76204-3.

**MISHAKIN Vasiliy Vasilevich<sup>1</sup>, doctor of technical sciences, leading researcher of laboratory of non-destructive testing and diagnostics of materials and alloys; KLYUSHNIKOV Vyacheslav Aleksandrovich<sup>1</sup>, candidate of technical sciences, senior researcher of laboratory of non-destructive testing and diagnostics of materials and alloys; ZHIDKOV Aleksandr Vasilevich<sup>2</sup>, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of theoretical, computer and experimental mechanics of the Institute of information technology, mathematics and mechanics**

### THE EFFECT OF FATIGUE ON THE MODULUS OF ELASTICITY AND UNLOADING MODULUS OF AUSTENITIC STEEL 12KH18N10T

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute of RAS – branch of Federal Research Center A.V. Gaponov – Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences 85, Belinskogo St., Nizhny Novgorod, 603024, Russia. Tel.: +7 (831) 432-03-00; e-mail: ndt@ipmran.ru

<sup>2</sup>Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod 23, Gagarina Prospekt, Nizhny Novgorod, 603022, Russia. Tel.: +7 (831) 465-66-11; e-mail: zhidkov@mm.unn.ru

*Key words:* stainless steel, metastable austenite, fatigue, elastic modulus, unloading modulus, strain-induced martensitic transformation, ultrasonic method, eddy-current method.

---

*The article presents the results of experimental studies of the fatigue on the elastic modulus of austenitic stainless steel 12Kh18N10T. A comparison was carried out of the nature of the change in the unloading modulus obtained by analyzing hysteresis loops and the elastic modulus calculated from acoustic measurement data. An analysis of the influence of damage accumulation and strain-induced martensitic transformation on the dependences of changes in elastic modulus during cyclic deformation was performed.*

---

### REFERENCES

1. GOST 1497-84. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie [Metals. Methods of tension test] mezhgosudarstvennyy standart : data vved. 1984–07–16. Moscow: Standartinform, 2005, 24 p.
2. Lemetr J. Kontinualnaya model povrezhdeniya, ispolzuemaya dlya rascheta razhrucheniya plastichnykh materialov [A continuum fracture model used to calculate the fracture of ductile materials]. Teoreticheskiye osnovy inzhenernykh raschetov [Theoretical foundations of engineering calculations]. 1983, № 1. P. 124–134.
3. Sergeeva O. A., Mishakin V. V., Klyushnikov V. A. Issledovanie svyazi kharakteristik tsikliheskogo deformirovaniya s modulyami uprugosti metastabilnykh austenitnykh staley [Study of the relationship between fatigue characteristics and elastic modulus of metastable austenitic steels]. Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of strength and plasticity]. 2024, V. 86, № 1. P. 94–105.
4. Metody akusticheskogo kontrolya metallov [Methods of acoustic testing of metals] pod redaktsiyey N. P. Aleshina. Moscow, Mashinostroenie, 1989, 456 p.
5. Truell R., Elbaum C., Chick B. Ultrazvukovye metody v fizike tverdogo tela [Ultrasonic methods in solid state]. Moscow, Mir, 1972. 308 p.



6. Guriyev A. V., Karpov A. P. Rol mikroplasticheskikh deformatsiy v chastotnoy zavisimosti [The role of microplastic deformations in the formation of frequency dependence]. Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of strength and plasticity]. 1986, № 4. P. 24–27.
7. Romanov A. N. Razrusheniye pri malotsiklovom nagruzhении [Low-cycle failure]. Moscow, Nauka, 1988, 282 p.
8. Gusenkov A. P. Procnost pri izotermicheskom i neizotermicheskon nagruzhении [Strength under isothermal and non-isothermal loading]. Moscow, Nauka, 1979, 295 p.
9. Fedorov V. V. Kinetika povrezhdaemosti i razhrusheniya tverdykh tel [Kinetics of damage and destruction of solids]. Tashkent, FAN, 1985, 168 p.
10. Goldstein M. I., Litvinov V. S., Bronfin B. M. Metallofizika vysokoprochnykh splavov [Metallophysics of high strength alloys]. Moscow, Metallurgiya, 1986, 310 p.
11. Mishakin V. V., Sergeeva O. A., Klyushnikov V. A., Vliyanie micropovrezhdennosti na uprugie kharakteristiki metastabil'nyh austenitnykh staley pri ustalostnom razrushении [Relationship between the elastic characteristics of metastable austenitic steels and microdamage under fatigue]. Zhurnal tekhnicheskoi fiziki [Journal of technical physics]. 2024. Vol. 94, Issue 1. P. 60–65.
12. Krupp U., West C., Christ H.-J. Deformation-induced martensite formation during cyclic deformation of metastable austenitic steel: Influence of temperature and carbon content // Mat. Sci. Eng. A. 2008. Vol. 481–482. P. 713–717.
13. 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. № 103569.
14. Kachanov M., Sevostianov I. *Micromechanics of Materials, with Applications*. Berlin, Springer, 2018, 712 p.

© В. В. Мишакин, В. А. Ключников, А. В. Жидков, 2024

Получено: 29.08.2024 г.