

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Научный совет РАН по физике конденсированных сред  
Межгосударственный координационный совет  
по физике прочности и пластичности материалов  
Тольяттинский государственный университет  
НИИ прогрессивных технологий

## **ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

X Международная школа, посвященная 10-летию лаборатории  
«Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы»

Тольятти, 13–17 сентября 2021 года

## **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЧНОСТИ**

LXIII Международная конференция, посвященная 70-летию  
Тольяттинского государственного университета

Тольятти, 13–17 сентября 2021 года

Сборник материалов

Тольятти  
Издательство ТГУ  
2021

УДК 539.4:669.017  
ББК 30.3  
Ф505

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, профессор А.М. Глезер;  
д-р физ.-мат. наук И.С. Ясников

Редакционная коллегия:

д-р физ.-мат. наук, профессор Д.Л. Мерсон – отв. редактор;  
канд. техн. наук Е.В. Черняева – отв. за выпуск сборника.

**Ф505** Физическое материаловедение : X Международная школа, посвященная 10-летию лаборатории «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» (Тольятти, 13–17 сентября 2021 года) ; Актуальные проблемы прочности : LXIII Международная конференция, посвященная 70-летию Тольяттинского государственного университета (Тольятти, 13–17 сентября 2021 года) : сборник материалов / ответственный редактор Д.Л. Мерсон. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2021. – 328 с. : обл.

В сборнике опубликованы материалы, представленные на LXIII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» и X Международной школе «Физическое материаловедение» специалистами в области прочности и пластичности из России и ближнего зарубежья, посвященные вопросам физики и механики прочности, пластичности и разрушения материалов и конструкций; связи прочности со структурой нанокристаллов, аморфных, керамических, композиционных, полимерных и других перспективных материалов.

Предназначен для специалистов в области металлофизики, материаловедения, прочности и разрушения материалов, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

УДК 39.4:669.017  
ББК 30.3

Рекомендовано к изданию Научно-исследовательским институтом прогрессивных технологий Тольяттинского государственного университета.

ISBN 978-5-8259-1593-7

© Мерсон Д.Л. – научный  
руководитель школы, 2021  
© ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный университет», 2021

## ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ХРАНЕНИЯ НА АКУСТИЧЕСКУЮ ЭМИССИЮ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА Fe–Mn–Si ПОСЛЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Арутюнян А.Р., Волков А.Е., Евард М.Е., Остропико Е.С., Черняева Е.В.

*Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Россия,  
[lena@smel.math.spbu.ru](mailto:lena@smel.math.spbu.ru)*

В работе [1] было изучено влияние циклических нагрузок на параметры акустической эмиссии (АЭ) при индентировании образцов высокопрочной стали на основе FeMnSi, содержащей 18% Mn, 2% Si, 2% V, 0,4% C (массовые проценты). Были исследованы образцы в состоянии поставки (закалка от 1150°C + отжиг в течение 12 часов при температуре 650°C) и после дополнительного отжига (3 часа при температуре 720°C). Циклические испытания выполняли на усталостной сервогидравлической испытательной машине Si-Plan SH-B путем нагружения образцов от нулевого до заданного максимального значения напряжения  $\sigma_{\max} = 500\text{--}1000$  МПа с частотой  $f = 30\text{--}50$  Гц.

Сигналы АЭ регистрировали при помощи широкополосных датчиков АЭ MSAE-L2 с усилителем MSAE-FA010 с общим усилением 80 дБ. Для всех сигналов анализировали кривые энергетических спектров (спектральной плотности мощности) и вычисляли усредненные значения энергии и медианной частоты.

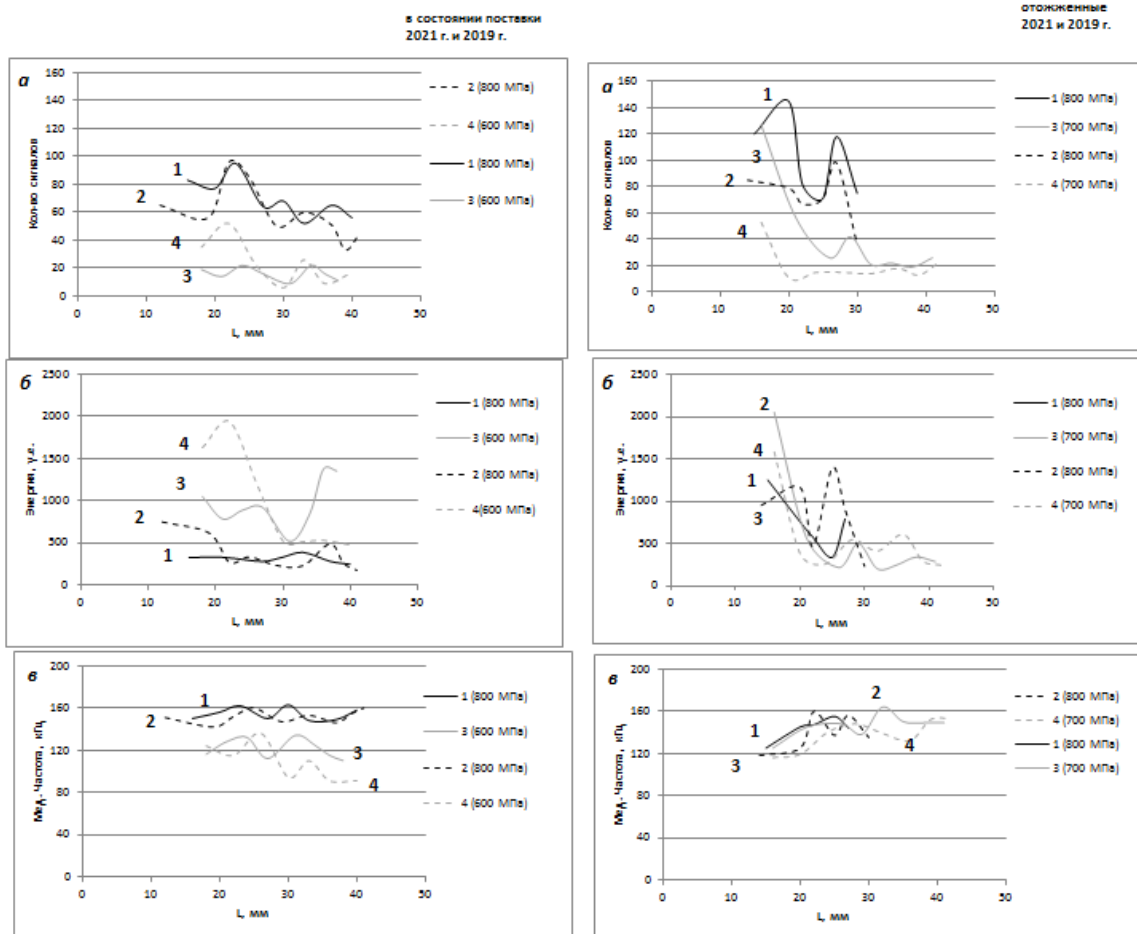
Разрушение при циклических испытаниях происходило практически без образования шейки, поэтому при уколах вдоль рабочей части явных изменений спектральных характеристик АЭ, связанных с деформацией металла в области разрушения, не наблюдалось. Не было отмечено также существенных различий в энергетических спектрах сигналов и между отожженными и не отожженными образцами.

Однако было обнаружено, что циклические нагрузки увеличивают количество сигналов АЭ, генерируемых при уколах индентором, снижают их энергию и медианную частоту по сравнению с исходным состоянием материала. Наиболее существенное влияние на АЭ оказывают режимы нагружения при  $\sigma_{\max} > 700$  МПа, тогда как при индентировании образцов после режимов нагружения при меньших  $\sigma_{\max}$  была характерна АЭ с большим разбросом параметров, похожая для всех изученных режимов.

Было высказано предположение, что изменения в параметрах АЭ при больших циклических воздействиях могут быть связаны с образованием областей нерелаксированных напряжений в материале. И в этом случае длительное хранение образцов должно оказывать влияние на количество, и, возможно, на энергию генерируемых при уколах сигналов. Для проверки этого предположения на тех же образцах были выполнены повторные серии уколов, спустя 2 года после испытаний, проведенных сразу после циклических воздействий на материал. Между испытаниями все образцы хранились при комнатной температуре. Результаты испытаний приведены на рис. 1 для образцов в состоянии поставки после циклических нагрузок при  $\sigma_{\max} = 600$  и 800 МПа и на рис. 2 для отожженных образцов после циклических нагрузок при  $\sigma_{\max} = 700$  и 800 МПа.

На всех рисунках  $L$  – расстояние от внешнего края лопатки (длина лопатки составляет 20 мм) образца до места укола индентором. Сплошные линии относятся к АЭ испытаниям сразу после циклических воздействий, штриховые – к испытаниям после двухлетнего хранения образцов при комнатной температуре.

Из рисунков видно, что при  $L > 25$  мм (т.е. в области рабочей части образца от лопатки до места разрушения) наблюдается некоторое снижение количества сигналов АЭ, особенно заметное для отожженных образцов (рис. 2а), тогда как значения энергий и медианных частот находятся в зоне разброса параметров. Аналогичные результаты ранее были получены для стали 20 [2].



**Рис.1.** Количество сигналов АЭ (а), энергия (б) и медианная частота (в) при уколах вдоль рабочей части образцов в состоянии поставки после циклических нагрузок при  $\sigma_{\max} = 800$  и 600 МПа сразу после механических испытаний (сплошные линии) (1, 3) и спустя 2 года (штриховые линии) (2, 4)

**Рис.2.** Количество сигналов АЭ (а), энергия (б) и медианная частота (в) при уколах вдоль рабочей части отожженных образцов после циклических нагрузок при  $\sigma_{\max} = 800$  и 700 МПа сразу после механических испытаний (сплошные линии) (1, 3) и спустя 2 года (штриховые линии) (2, 4)

Таким образом, после циклических нагрузок стали FeMnSi получается достаточно стабильное состояние металла, мало зависящее от времени хранения.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 19-01-00685.*

1. Арутюнян А.Р., Волков А.Е., Евард М.Е., Остропико Е.С., Сагарадзе В.В., Черняева Е.В. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА Fe–Mn–Si ПОСЛЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ//Физическое материаловедение: IX Междунар. школа с элементами научной школы для молодежи; Актуальные проблемы прочности: LXI Междунар. конф. (Тольятти, 9-13 сентября 2019 г.): сб. материалов. – Изд-во ТГУ, 2019. - с.175-176

2. Черняева Е.В., Мерсон Д.Л. Влияние времени «вылеживания» образцов из стали 20, подвергнутых усталостным испытаниям, на параметры акустической эмиссии при индентировании /Матер. 51-й междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности» (16-20 мая 2011 г., Харьков), Харьков, 2011 – с. 245

## **ТЕПЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ ЦЕПОЧКИ НАНОВКЛЮЧЕНИЙ ЖИДКОГО СВИНЦА ВДОЛЬ ЗАКРЕПЛЕННОЙ ДИСЛОКАЦИИ В АЛЮМИНИИ**

**Прокофьев С. И.**

*Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия,  
[prokof@issp.ac.ru](mailto:prokof@issp.ac.ru)*

Ранее было показано с помощью in-situ ПЭМ наблюдений, что линейное натяжение закрепленного на концах дислокационного сегмента в алюминиевой матрице приводит к взаимодействию нановключений жидкого свинца друг с другом и с закрепленными концами сегмента [1-4] Это приводит к тому, что тепловое движение нановключений проявляется в виде хаотических осцилляций вблизи линии дислокации, которые можно рассматривать как их тепловое движение в потенциальной яме [1-5]. Так как осцилляции каждого включения приводят к осцилляциям связанных с ним краев потенциальных ям, то это вносит вклад в осцилляции находящихся в них соседних нановключений. Таким образом, нановключения на одной дислокации можно рассматривать как связанные хаотические осцилляторы. Это позволяет ожидать их коллективное пространственно-коррелированное движение, которое было обнаружено в работе [4]. Кроме того, можно ожидать появления временных корреляций осцилляций нановключений и возникновения общих колебательных мод.

В данной работе с помощью in-situ ПЭМ изучалось тепловое движение цепочки 12 нановключений жидкого свинца на закрепленной дислокации в алюминиевой матрице при 442°C. С помощью анализа траекторий их теплового движения вдоль дислокации было показано, что коллективное взаимодействие нановключений приводит к их коллективным пространственно коррелированным тепловым осцилляциям. С помощью коррелограмм было показано существование временных корреляций теплового движения нановключений. Кроме того, с помощью анализа частотных спектров временных зависимостей осцилляций нановключений вдоль линии дислокации, полученных с помощью быстрого преобразования Фурье, были получены указания на синхронизацию хаотических осцилляций всех включений на дислокации.

*Данная работа сделана в рамках Госзадания ИФТТ РАН.*

1. Prokofjev S., Zhilin V., Johnson E., Levinsen M.T., Dahmen U., Def. Diff. Forum 237-240, 1072 (2005).
2. Johnson E., Prokofjev S., Zhilin V., Dahmen U., Z. Metallk. 96, 1171 (2005).
3. Prokofjev S.I., Johnson E., Zhilin V.M., Dahmen U., Adv. Sci. Technol. 46, 98 (2006).
4. Prokofjev S.I., Johnson E., J. Phys. Commun. 1, № 5, 055001 (2017).
5. Prokofjev S. I., Zhilin V. M., Johnson E., Dahmen U., Def. Diff. Forum 264, 55 (2007).