

**УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ НА ОСНОВЕ FeMnSi ПРИ МЕХАНОЦИКЛИРОВАНИИ В МАРТЕНСИТНОМ СОСТОЯНИИ**

**Остропико Е.С.<sup>1</sup>, Арутюнян А.Р.<sup>1</sup>, Волков А.Е.<sup>1</sup>, Евард М.Е.<sup>1</sup>,  
Сагарадзе В.В.<sup>2</sup>, Трофимов С.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,

<sup>2</sup> Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН,  
Екатеринбург, Россия  
es-ostropiko@mail.ru

Среди функциональных материалов, претерпевающих мартенситные превращения, сплавы на основе FeMnSi занимают особое место благодаря присущему им эффекту памяти формы, доступной механической обработке (в отличие от TiNi и сплавов на его основе), а свойственный им широкий гистерезис превращения может быть полезен в специальных приложениях, требующих стабильности в большом интервале температур. Немаловажную роль играет и тот факт, что стоимость сплавов на основе железа и марганца существенно ниже стоимости сплавов TiNi. Вопросы экономии выходят на первый план, когда речь идет о массовом производстве или об изготовлении массивных изделий, таких, например, как демпферы и изоляторы вибрации, используемые для защиты зданий и сооружений от землетрясений.

Объектом исследования в настоящей работе является упрочненная частицами высокопрочная сталь на основе FeMnSi, содержащая 18% Mn, 2% Si, 2%V, 0,4% C (массовые проценты). Ранее было показано [1], что в таких сплавах формирование частиц карбида VC приводит к значительному увеличению предела текучести: до 728 МПа по сравнению со сплавами Fe – 0.20 C – 18 Mn – 2 Si – 1 V ( $\sigma_{0.2} = 257$  МПа) и Fe – 28 Mn – 6 Si ( $\sigma_{0.2} = 496$  МПа), в которых указанные карбиды либо не формируются, либо формируются в незначительных количествах. При этом исследуемая сталь демонстрирует довольно значительную пластичность (однородная деформация до разрушения  $\delta = 14\%$ ), а благодаря создаваемым равномерно распределенными наночастицами VC напряжениям, восстанавливаемая при нагреве за счет эффекта памяти формы деформация составляет 1,4 % для закаленных образцов и 2,1 % для образцов после дополнительного отжига после закалки при 720°C в течение 3 часов.

В связи с возможностью применения данного материала в виброзащитных устройствах были исследованы его механические характеристики и усталостное поведение в мартенситном состоянии при циклическом нагружении от нулевого до заданного максимального значения напряжения  $\sigma_{max}$ . Исследовались 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). На рис. 1 приведены диаграммы деформирования при комнатной температуре (в мартенситном состоянии) для обеих термообработок. Видно, что дополнительный отжиг при 720°C, вызывая, согласно [1], частичное растворение наночастиц VC, приводит к снижению предела текучести и одновременному увеличению пластичности материала.

Циклические испытания выполняли на усталостной сервогидравлической испытательной машине Si-Plan SH-B. На рис. 2 приведены усталостные кривые для исходного и дополнительно отожженного образцов. В исходном образце ( $\sigma_{0.2} = 787$  МПа) при  $\sigma_{max} = 800$  МПа количество циклов до разрушения составляет примерно 20000. С уменьшением величины максимального напряжения до 500 МПа количество циклов до разрушения возрастает до 192000 – 300000 циклов.

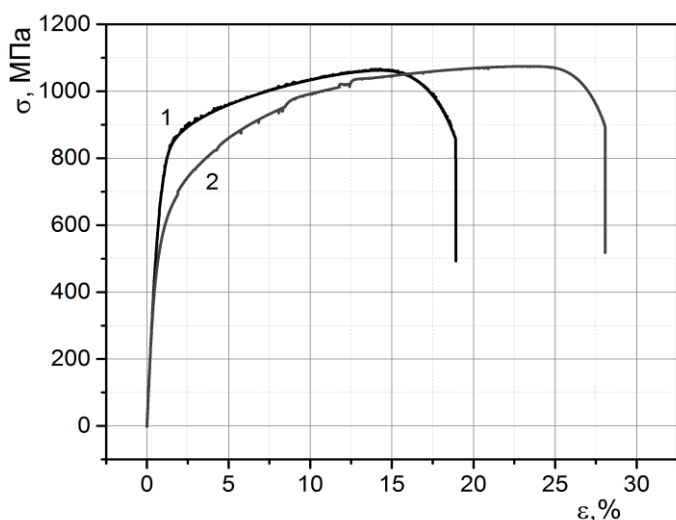


Рисунок 1 - Диаграммы деформирования стали 0.40 C – 18 Mn – 2 Si – 2 V при комнатной температуре. Образцы в состоянии поставки после закалки от 1150°C и отжига в течение 12 часов при температуре 650°C (1) и после дополнительного отжига при 720°C в течение 3 часов (2)

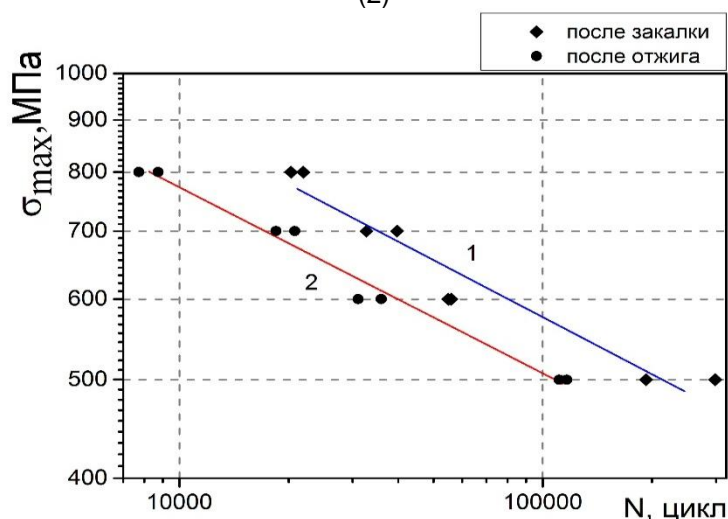


Рисунок 2 - Зависимость числа циклов до разрушения от максимальной величины напряжения  $\sigma_{\max}$  в цикле. Образцы в состоянии поставки после закалки от 1150°C и отжига в течение 12 часов при температуре 650°C (1) и после дополнительного отжига при 720°C в течение 3 часов (2)

Дополнительно отожженный (разупрочненный) образец, для которого исследованные значения  $\sigma_{\max}$  лежат, в основном, выше предела текучести, демонстрирует значительно худшие усталостные свойства: около 8000 циклов до разрушения при  $\sigma_{\max} = 800$  МПа и около 115000 циклов при  $\sigma_{\max} = 500$  МПа.

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

*При определении химического состава сплава и характеристических температур превращения использовано оборудование ресурсных центров СПбГУ «Методы анализа состава вещества» и «Термогравиметрические и калориметрические методы исследования» (<http://researchpark.spbu.ru/>)*

#### Список литературы

1. V.V. Sagaradze, S.V. Afanas'ev, High-strength precipitation-hardening austenitic steels with shape memory effect, Materials Science Foundations, Vols. 81-82 (2015), pp. 575-599.