

МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ НА ИЗГИБ ОБРАЗЦОВ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 10X18N10T

© 2024 г. А.В. Кочнев^{1,*}, М.Б. Ригмант¹, М.К. Корх¹, Н.В. Гордеев¹, А.М. Матосян¹

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18
E-mail: *kochnevav@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 30.05.2024; после доработки 17.06.2024
Принята к публикации 18.06.2024

Проведены циклические испытания на изгиб образцов из аустенитной хромоникелевой стали 10X18N10T. Изменения относительной магнитной проницаемости во время испытаний показали, что при разрушении материала происходит значительный рост данного параметра, связанный с образованием мартенсита деформации в месте крепления образца, которое испытывает максимальные напряжения при нагрузке. Дополнительный эксперимент показал, что образование мартенсита начинается до непосредственного разрушения.

Ключевые слова: относительная магнитная проницаемость, аустенитная сталь, мартенсит деформации, магнитный фазовый анализ, циклические испытания на изгиб.

MONITORING OF RELATIVE MAGNETIC PERMEABILITY VARIATION DURING CYCLIC BENDING TESTING OF AUSTENITIC STEEL GRADE 10KH18N10T SAMPLES

© 2024 A.V. Kochnev^{1,*}, M.B. Rigmant¹, M.K. Korkh¹, N.V. Gordeev¹, A.M. Matosyan¹

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of UB RAS,
Russia 620108, Yekaterinburg, Sofia Kovalevskaya st., 18
E-mail: *kochnevav@imp.uran.ru

Cyclic bending testing of austenitic chromium-nickel steel grade 10Kh18N10T samples was carried out. Evaluation of relative magnetic permeability showed its noticeable increase when the samples became fractured. This increase is related to deformation martensite appearance. Additional experiment showed, that deformation martensite formation starts before the actual destruction of the sample.

Keywords: relative magnetic permeability, austenitic steel, deformation martensite, magnetic phase analysis, cyclic bending testing.

DOI: 10.31857/S0130308224090054

ВВЕДЕНИЕ

Аустенитные стали являются классом материалов, которые широко используются для конструкций ответственного назначения, обладающих повышенной коррозионной стойкостью, жаропрочностью и пластичностью. Аустенит метастабилен, поэтому в ходе эксплуатации в результате воздействия различного рода нагрузок фазовый состав данных сталей может меняться вследствие фазового перехода аустенит — мартенсит деформации. Образование мартенсита влечет за собой снижение пластичности и коррозионной стойкости [1] стали, что в дальнейшем может служить причиной ее разрушения. В связи с этим интересно рассмотреть, как циклические нагрузки влияют на образование мартенсита деформации и свойства аустенитной стали, а также оценить возможность обнаружения по магнитным свойствам зон предразрушения материала, в которых происходит накопление мартенсита деформации.

Исследования нержавеющей сталей на усталостную прочность достаточно хорошо представлены в литературе, где описаны как теоретические выкладки [2], так и различные варианты циклических деформаций: от переменных одноосных нагрузок растяжения сжатия [3], изгиба [4] до испытаний на фреттинг-усталость [5]. Однако авторам этих работ обычно интересны только механические свойства металла, в то время как вопросы фазовых превращений в них не затрагиваются. Тем не менее, в работах [6, 7] рассматривалось приложение ультразвуковых и вихревых методов для слежения за содержанием мартенсита, однако там не была рассмотрена возможность применения магнитных методов контроля фазового состава.

Так как при изгибе в сталях такого класса может образовываться очень малое количество мартенсита деформации (менее 1 %), информативным параметром при контроле является от-

носительная магнитная проницаемость (μ), которая чувствительна даже к малым изменениям магнитных свойств [8].

Таким образом, целью данной работы было исследование изменения μ образцов из аустенитной хромоникелевой стали во время и после циклических испытаний на изгиб.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе были исследованы образцы из аустенитной хромоникелевой стали. Химический состав стали приведен в табл. 1. Размеры образцов: $2 \times 8 \times 100$ мм.

Таблица 1

Химический состав аустенитной хромоникелевой стали

C	Si	P	S	Cr	Ni	Mn	Ti	Fe
0,094	0,59	0,020	0,013	17,19	9,83	1,21	0,58	ост.

Образцы были вырезаны на электроэрозионном станке, так как данная технология резки не допускает фазовых переходов аустенит — мартенсит в металле.

Исследования проводились на специальной лабораторной установке для циклических испытаний на изгиб. Образец закрепляется по консольной схеме, где один его конец жестко зафиксирован, а к свободному концу прикладывается усилие, приводящее к изгибу образца. Рабочая длина (длина колеблющегося участка) — 79 мм. Прилагаемая нагрузка варьировалась путем изменения амплитуды отклонения образца от нейтрального положения (значения приведены в табл. 2).

Таблица 2

Режимы циклирования образцов

Образец, №	1	2	3	4	5	6	7	8
Амплитуда колебаний, мм	5,37	5,7	5,7	6,0	6,0	6,0	7,0	8,3

Для измерения μ вблизи от места крепления (на расстояние 65—69 мм от свободного конца) образца устанавливался первичный преобразователь лабораторного прибора «ФерроКОМ-ПАС», являющегося собственной разработкой авторов статьи. Сигнал с датчика поступал на прибор и далее через АЦП L-Card E14-140 на ПК, где записывался лог-файл программой Powergraph. Начальная величина μ образцов составила 1,003. Образцы № 2 и 8 после изготовления подвергались ручной шлифовке, в результате чего их μ выросла до значений 1,012 и 1,006 соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для образцов 1—6 были сняты зависимости изменения μ от количества циклов непосредственно в процессе испытаний, примеры которых представлены на рис. 1.

Как видно из рисунка, в конце испытания происходит резкое возрастание параметра μ , связанное с образованием мартенсита деформации.

Согласно эпюре напряжений, при консольном закреплении максимальные напряжения объект испытывает в месте зажима, вследствие чего разрушение образца происходит именно в данной области. Кроме того, в месте излома образуется наибольшее количество мартенсита, что приводит к росту μ . На рис. 2 показано распределение величины μ по длине образца от свободного конца до места излома.

Как видно из графика, μ образцов не меняется практически по всей их длине. Значительные изменения μ наблюдаются по мере приближения к месту разрушения, где произошел фазовый переход аустенит — мартенсит деформации. С уменьшением нагрузки (амплитуды изгиба) величина μ падает, так как в месте излома образуется меньшее количество мартенсита деформации.

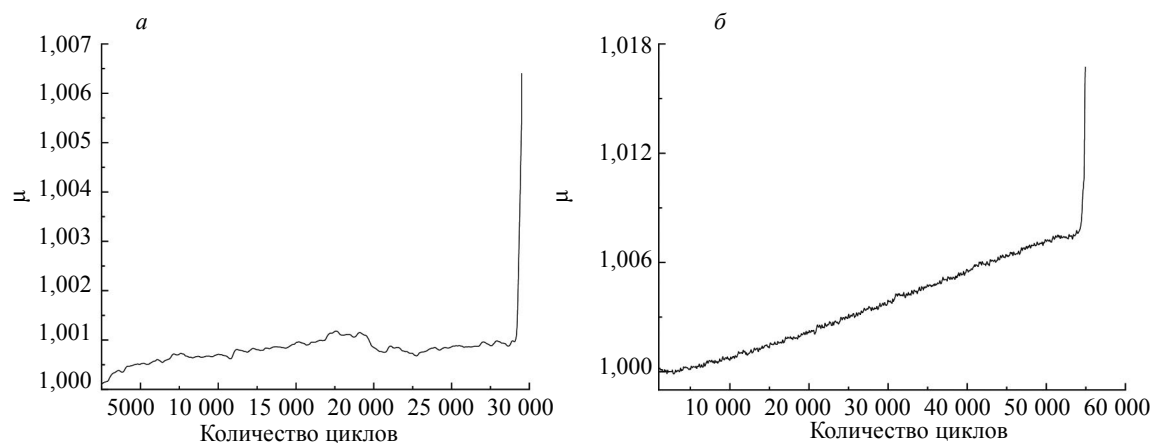


Рис. 1. Зависимость относительной магнитной проницаемости от количества циклов: образец № 6 (а); образец № 3 (б).

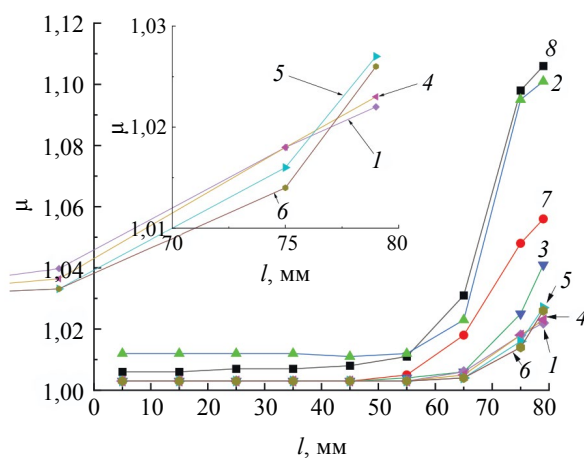


Рис. 2. Изменение относительной магнитной проницаемости по длине образца после испытаний на изгиб; l — расстояние от свободного конца образца.

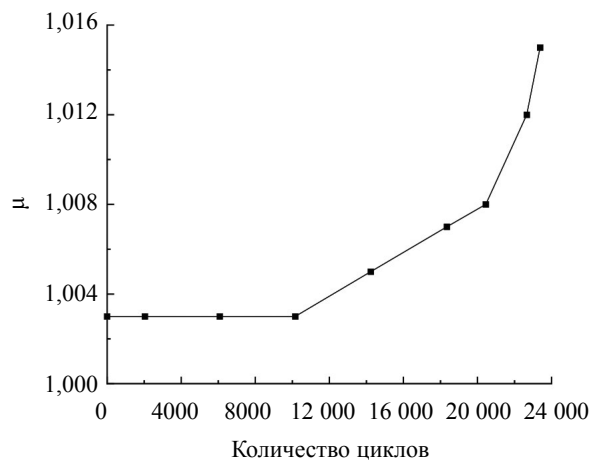


Рис. 3. Изменение относительной магнитной проницаемости в месте закрепления образца в процессе циклирования.

На результат испытаний также в значительной степени влияет подготовка поверхности образцов. После разрушения в зоне излома μ образцов № 2 и 8, подвергавшихся предварительной шлифовке, значительно превысила μ нешлифованных образцов и составила 1,101 и 1,106 соответственно.

Во время циклирования невозможно измерение μ непосредственно в зоне, испытывающей максимальные нагрузки, т.к. она располагается в месте крепления образца в держателе установки. Поэтому был сделан отдельный эксперимент для наблюдения за образованием мартенсита деформации непосредственно в месте будущего разрушения. Для этого образец в процессе циклирования периодически вынимался из установки, после чего проводилось измерение μ в области максимальной нагрузки, амплитуда изгиба составляла 6 мм. После измерения μ образец помещался обратно в установку для продолжения испытаний. Зависимость величины μ от количества циклов представлена на рис. 3.

После десяти тысяч циклов в месте крепления начинается рост μ , т.е. можно говорить о начале образования мартенсита деформации. После двадцати тысяч циклов рост становится более резким и заканчивается разрушением образца.

ВЫВОДЫ

Проведены исследования по мониторингу изменения относительной магнитной проницаемости (μ) образцов из аустенитной хромоникелевой стали при циклических испытаниях на изгиб. Показано, что при разрушении образца наблюдается резкое увеличение μ в месте излома, связанное с образованием мартенсита деформации.

Исследования также показали, что образование мартенсита деформации в зоне, испытывающей максимальные напряжения, начинается задолго до разрушения образца. Использование μ в качестве информативного параметра позволяет определить такие зоны и выявить таким образом места, в которых произойдет разрушение материала.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеев А.Е., Харина И.Л. Влияние деформационного мартенсита на свойства аустенитной стали 316L // Тяжелое машиностроение. 2014. № 11—12. С. 14—20.
2. Шанявский А.А., Солдатенков А.П. Новые парадигмы в описании усталости металлов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 1. С. 196—207.
3. Puchi-Cabrera E.S., Staia M.H., Tovar C., Ochoa-Pérez E.A. High cycle fatigue of 316L stainless steel // International Journal of Fatigue. 2008. V. 30. P. 2140—2146.
4. Berns H., Gavriljuk V.G., Nabiran N., Petrov Yu.N., Riedner S., Trophimova L.N. Fatigue and Structural Changes of High Interstitial Stainless Austenitic Steels // Steel Research International. 2010. V. 81. P. 299—307.
5. Farrahi G.H., Minaii K., Bahai H. Fretting fatigue behavior of 316L stainless steel under combined loading conditions // International Journal of Fatigue. 2019. V. 128. P. 105206.
6. Mishakin V., Gonchar A., Kurashkin K., Kachanov M. Prediction of fatigue life of metastable austenitic steel by a combination of acoustic and eddy current data // International Journal of Fatigue. 2020. V. 141. P. 105846.
7. Мишакин В.В., Гончар А.В., Курашкин К.В., Ключников В.А., Аносов М.С. Мониторинг усталостного разрушения силового элемента конструкции вихретоковым и акустическим методами // Вестник научно-технического развития. 2021. № 162. С. 46—54.
8. Ригмант М.Б. Методы и средства контроля фазового состава двух- и трехфазных аустенитных сталей // Дефектоскопия. 2018. № 2. С. 27—40.

REFERENCES

1. Korneev A.E., Kharina I.L. Vliyanie deformatsionnogo martensita na svoistva austenitnoi stali 316L // Tyazhyoloe mashinostroyeniye. 2014. № 11—12. P. 14—20.
2. Shanyavskii A.A., Soldatenkov A.P. Novye paradigmy v opisaniy uсталosti metallov // Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universtiteta. Mekhanika. 2019. № 1. P. 196—207.
3. Puchi-Cabrera E.S., Staia M.H., Tovar C., Ochoa-Pérez E.A. High cycle fatigue of 316L stainless steel // International Journal of Fatigue. 2008. V. 30. P. 2140—2146.
4. Berns H., Gavriljuk V.G., Nabiran N., Petrov Yu.N., Riedner S., Trophimova L.N. Fatigue and Structural Changes of High Interstitial Stainless Austenitic Steels // Steel Research International. 2010. V. 81. P. 299—307.
5. Farrahi G.H., Minaii K., Bahai H. Fretting fatigue behavior of 316L stainless steel under combined loading conditions // International Journal of Fatigue. 2019. V. 128. P. 105206.

6. *Mishakin V., Gonchar A., Kurashkin K., Kachanov M.* Prediction of fatigue life of metastable austenitic steel by a combination of acoustic and eddy current data // *International Journal of Fatigue*. 2020. V. 141. P. 105846.

7. *Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A., Anosov M.S.* Monitoring ustalostnogo razrusheniya silovogo elementa konstruktsii vikhretokovym i akusticheskimi metodami // *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*. 2021. № 162. P. 46—54.

8. *Rigmant M.B.* Metody i sredstva kontrolya fazovogo sostava dvukh- i tryokhfaznykh austenitnykh stalei // *Defektoskopiya*. 2018. № 2. P. 27—40.
