

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПРИ ГИГАЦИКЛОВОМ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2021 г. Р.А. Саврай^{1,*}, Л.Х. Коган^{2,**}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Россия 620049 Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
E-mail: *ras@imach.uran.ru; **lhkogan@e1.ru

Поступила в редакцию 25.01.2021; после переработки 20.02.2021

Принять к публикации 19.03.2021

В процессе эксплуатации поверхности деталей из аустенитных хромоникелевых сталей подвергаются интенсивным циклически повторяющимся контактными, в том числе ударным нагрузкам. Поэтому актуальной задачей является изучение контактной выносливости и разработка способов неразрушающего контроля усталостной деградации таких сталей. Целью работы явилось исследование возможности проведения вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении аустенитной стали AISI 321. Механические испытания на контактную гигацикловую усталость проводили по схеме пульсирующего ударного контакта «плоскость—плоскость» с ультразвуковой частотой нагружения. Показано, что проведение вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении стали AISI 321 возможно, однако имеет определенные ограничения вследствие немонотонного изменения показаний вихретокового прибора α от числа циклов нагружения. При этом по восходящей ветви можно контролировать степень разрушения поверхностного слоя, учитывая в методике контроля неоднозначный характер зависимостей показаний вихретокового прибора от числа циклов нагружения. Контроль может проводиться путем измерений показаний вихретокового прибора на частоте возбуждения вихретокового преобразователя $f = 124$ кГц. В этом случае в большей степени анализируются поверхностные слои, в которых интенсивно развиваются процессы усталостной деградации, оказывающие влияние на физические характеристики стали. Наибольшее влияние на величину α оказывает количественное соотношение аустенита и мартенсита деформации в зоне контроля.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, коррозионно-стойкая аустенитная сталь, структура, мартенсит деформации, контактная усталость, усталостное выкрашивание.

DOI: 10.31857/S0130308221050079

ВВЕДЕНИЕ

Аустенитные нержавеющие стали, в том числе сталь AISI 321, широко используются для изготовления различных элементов конструкций, которые в процессе эксплуатации подвергаются механическим нагрузкам. Это может приводить к изменению структурного состояния стали и снижению долговечности изделий. Поэтому большое внимание уделяется исследованию возможности неразрушающего контроля (НК) структурного состояния таких сталей и его изменения в различных условиях нагружения [1—15]. При этом отмечается эффективность использования методов вихретокового НК. В частности, вихретоковый контроль может быть применен для оценки объемной доли мартенсита деформации в стали AISI 321 при холодной прокатке [1—3], квазистатическом растяжении [4], малоцикловом [4, 5] и многоцикловом [4] усталостном нагружении, а также для обнаружения различных дефектов, возникающих в процессе эксплуатации изделий и этой стали [6, 7]. Полученные результаты неразрушающего контроля также используют для оценки остаточного ресурса контролируемых изделий.

В процессе эксплуатации поверхности деталей из аустенитных хромоникелевых сталей также подвергаются воздействию циклических напряжений и температур [16], интенсивным циклически повторяющимся контактными, в том числе ударными [17], нагрузкам. Поэтому актуальной задачей является изучение контактной выносливости и разработка способов неразрушающего контроля усталостной деградации таких сталей. При этом также целесообразно использование вихретокового контроля. Возможность использования амплитудного метода вихретокового НК для контроля усталостной деградации материала при контактном нагружении была продемонстрирована применительно к хромоникелевым и кобальтхромоникелевому покрытиям, полученным методом газопорошковой лазерной наплавки [18—21]. Отметим, что данные металлические покрытия, как и аустенитные стали, относятся к материалам с низкой магнитной проницаемостью, для контроля

свойств которых может быть рекомендовано использование методов вихретокового НК [22, 23]. В литературе отсутствуют работы, посвященные исследованию возможности неразрушающего контроля усталостной деградации аустенитной стали AISI 321 при контактном нагружении.

Цель настоящей работы — исследование возможности проведения вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении аустенитной стали AISI 321. Механические испытания на контактную гигацикловую усталость проводили по схеме пульсирующего ударного контакта «плоскость—плоскость» с ультразвуковой частотой нагружения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве материала исследования использовали коррозионно-стойкую аустенитную сталь AISI 321 промышленной плавки, химический состав которой представлен в табл. 1. Образцы для механических испытаний на контактную усталость изготавливали из исходного прокатанного листа толщиной 10 мм в виде пластин размерами 70 на 40 мм. Поверхность образцов готовили с помощью механической шлифовки на абразивных шкурках и последующей полировки на алмазных пастах до достижения зеркальной поверхности. Подробное описание методики подготовки поверхности образцов представлено в [24].

Таблица 1

Химический состав стали AISI 321, мас. %

C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	Mo	Co	Nb	Cu	P	S	Fe
0,05	16,80	8,44	0,33	1,15	0,67	0,26	0,13	0,03	0,31	0,036	0,005	Основа

Механические испытания на контактную гигацикловую усталость с ультразвуковой частотой нагружения по схеме пульсирующего ударного контакта «плоскость—плоскость» (рис. 1) проводили с использованием ультразвуковой установки и специальной оснастки оригинальной конструкции [25] при частоте колебаний индентора $f = 21$ кГц, амплитуде колебаний индентора $A = 10$ мкм, постоянной нагрузке на индентор $P = 170$ Н на базе $N = 10^9$ циклов нагружения. Индентор цилиндрической формы диаметром 8 мм с плоской торцевой поверхностью изготавливали из твердого сплава марки ВК8 (в мас. %: 92 WC, 8 Co). Подробное описание испытательной установки представлено в [24]. В результате контактно-усталостных испытаний с различным числом циклов нагружения на поверхности образца были сформированы пятна контакта. Дополнительную подготовку поверхности пятен контакта перед последующими исследованиями и измерениями не проводили.

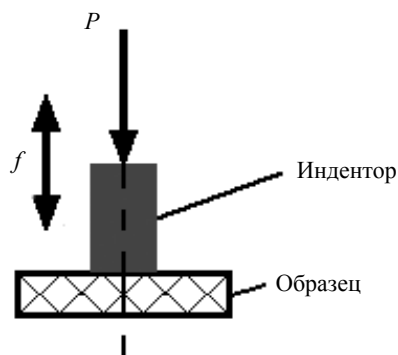


Рис. 1. Схема механических испытаний на контактную гигацикловую усталость.

Поверхности пятен контакта после контактно-усталостных испытаний изучали с применением сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA II XMU. Глубину контактных повреждений определяли с помощью оптического профилометра Wyko NT-1100. Рентгеноструктурный фазовый

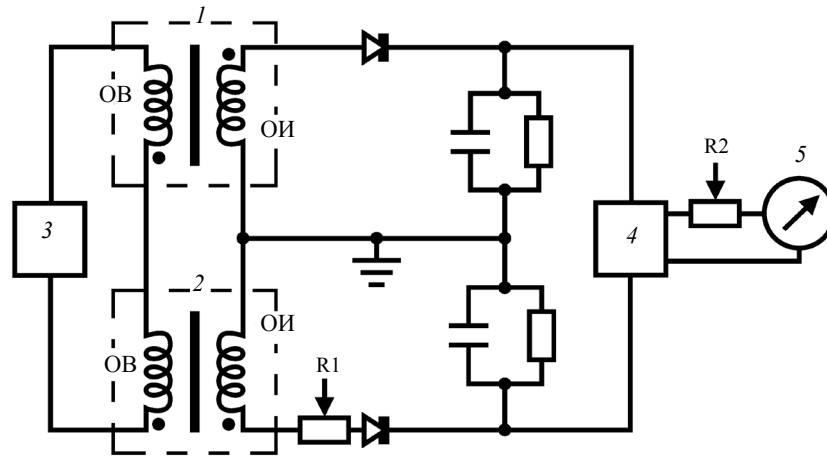


Рис. 2. Схема вихретокового прибора:

1 — рабочий преобразователь; 2 — компенсационный преобразователь; 3 — генератор сигналов ГЗ-33; 4 — усилитель постоянного тока У7-1; 5 — стрелочный индикатор М265М; ОИ — измерительная обмотка; ОВ — обмотка возбуждения; R1 — регулятор установки нуля; R2 — регулятор настройки чувствительности.

анализ выполняли на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 в CrK_α -излучении до и после контактно-усталостных испытаний.

Измерение электромагнитных параметров выполняли на лабораторном макете вихретокового прибора (рис. 2) с использованием дифференциально включенных накладных трансформаторных вихретоковых преобразователей с плоской торцевой поверхностью (рис. 3). Как показано на рис. 2, обмотки возбуждения (ОВ) рабочего (1) и компенсационного (2) преобразователей, включенные согласно, подключены к генератору ГЗ-33 (3). Сигнал с измерительных (ОИ), включенных встречно, обмоток преобразователей поступает на вход усилителя постоянного тока У7-1 (4), с выхода которого разностный сигнал поступает на стрелочный индикатор М265М (5). При таком способе включения преобразователей была обеспечена независимость показаний прибора от изменения условий окружающей среды. Локальность контроля использованного вихретокового преобразователя составляет около 6 мм в диаметре. Определяли показания вихретокового прибора α при частотах возбуждения преобразователя $f = 24, 36, 72, 96, 112$ и 124 кГц. Величину показаний вихретокового прибора α находили как среднее арифметическое из 5-6 измерений. Абсолютная погрешность измерений величины α составила $\Delta\alpha = \pm 3$ дел.

Для балансировки схемы измерений и настройки чувствительности использовали два стандартных образца с однородной структурой (образец № 1 и образец № 2), изготовленных из стали

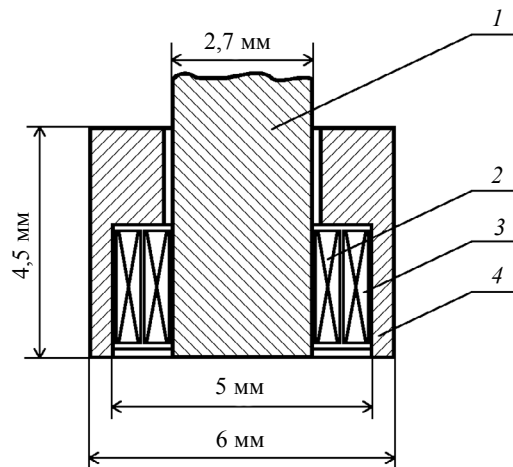


Рис. 3. Схематическое изображение накладного трансформаторного вихретокового преобразователя:

1 — стержневой ферритовый сердечник; 2 — измерительная обмотка; 3 — обмотка возбуждения; 4 — сердечник броневое типа.

одной марки, но несколько отличающиеся друг от друга по физическим свойствам за счет различных режимов термической обработки. Балансировка схемы измерений осуществлялась для каждой из использованных частот возбуждения вихретокового преобразователя следующим образом. При нахождении компенсационного преобразователя на воздухе, рабочий преобразователь помещали на стандартный образец № 1, после чего показания стрелочного индикатора устанавливали на значение 0 дел. с помощью регулятора R1 (см. рис. 2). Для настройки чувствительности, рабочий преобразователь помещали на стандартный образец № 2, после чего показания стрелочного индикатора устанавливали на значение 40 дел. с помощью регулятора R2 (см. рис. 2). После данной настройки проводили измерения на исследуемых образцах, компенсационный преобразователь при этом оставляли на воздухе. При данной схеме измерений величина $\alpha = 0$ дел. соответствует стандартному образцу, положительные значения α свидетельствуют о росте, а отрицательные значения α свидетельствуют об уменьшении сигнала вихретокового преобразователя.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микроструктура стали AISI 321 в состоянии поставки состоит из деформированных аустенитных зерен (γ -фазы), мартенситных кристаллов (α' -фазы) и включений карбида титана TiC (рис. 4). Участки мартенсита в аустенитных сталях представляют собой параллельные пластинки, расположенные в деформированных зернах аустенита, что характерно для α' -фазы [26]. По данным рентгеноструктурного анализа содержание мартенсита деформации в стали составило 8 об. % (рис. 5). Это может быть обусловлено деформацией при производстве листа, поскольку стали данного класса характеризуются деформационной нестабильностью. Шероховатость поверхности стали перед контактно-усталостными испытаниями составила $Ra = 0,03$ мкм.

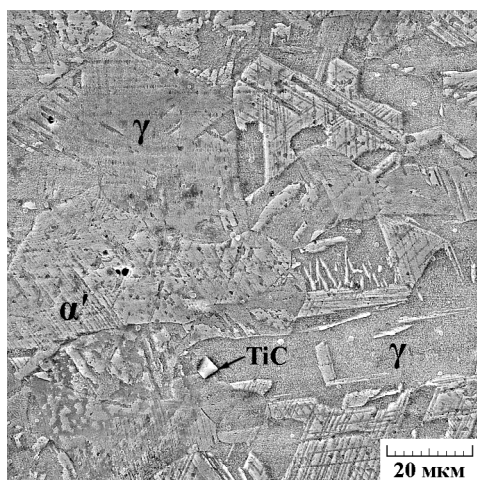


Рис. 4. Микроструктура стали AISI 321.

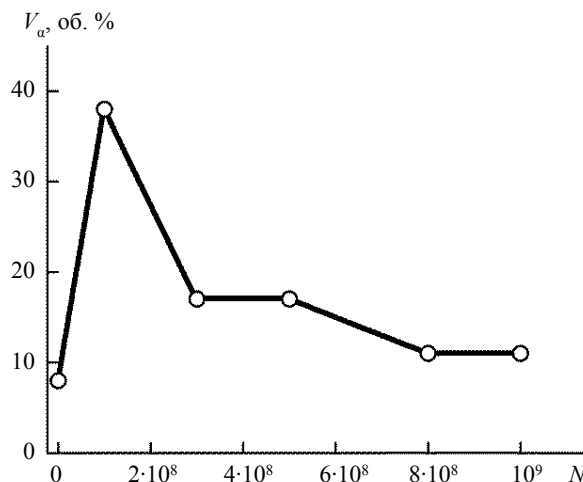


Рис. 5. Влияние числа циклов нагружения N на объемную долю α' -фазы $V_{\alpha'}$ в стали AISI 321 после контактно-усталостных испытаний.

Исследование пятен контакта методами сканирующей электронной микроскопии (рис. 6) показало, что в зоне воздействия плоской торцевой поверхности индентора (центральная зона) при числе циклов нагружения 10^8 на поверхности стали отчетливо видны следы поверхностного деформирования (обозначены стрелкой 1 на рис. 6а), которых не наблюдалось на поверхности образца перед испытаниями. На данной стадии нагружения еще не происходит разрушения поверхностного слоя стали. С увеличением числа циклов контактного нагружения до $3 \cdot 10^8$ — $5 \cdot 10^8$ наблюдается равномерное выкрашивание поверхностного слоя стали (обозначены стрелками 2 на рис. 6б, в), свидетельствующее о начавшемся разрушении поверхностного слоя в результате механического воздействия индентора. Нагружение до $8 \cdot 10^8$ — $1 \cdot 10^9$ циклов приводит к появлению глубоких и протяженных локализованных выкрошенных участков (обозначены стрелками 3 на рис. 6г), глубина которых составляет около 20 мкм [24].

В зоне воздействия на образец края индентора (периферийная зона) при числе циклов нагружения 10^8 на поверхности стали виден кольцеобразный (по форме индентора) след пластического

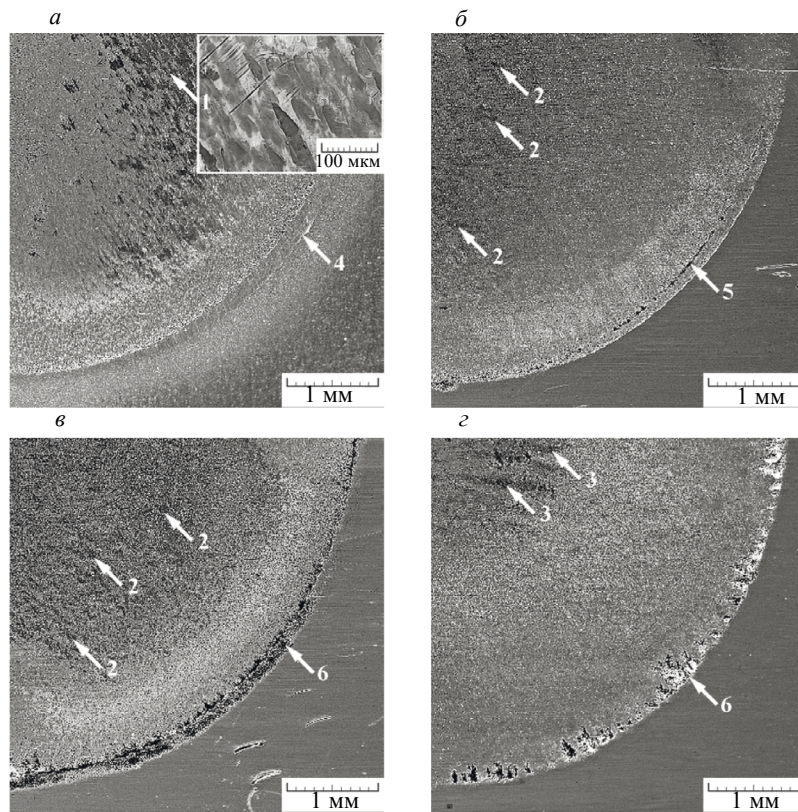


Рис. 6. Пятна контакта (электронная сканирующая микроскопия) после контактно-усталостных испытаний стали AISI 321 с числом циклов нагружения $N = 10^8$ (а), 3×10^8 (б), 5×10^8 (в) и 10^9 (г). Стрелками 1 обозначены следы поверхностного пластического деформирования, 2 — участки равномерного выкрашивания, 3 — глубокие и протяженные локализованные выкрошенные участки, 4 — кольцеобразный след пластического деформирования, 5 — частично соединенные между собой разрушенные участки, 6 — кольцеобразная зона разрушения.

деформирования (обозначен стрелкой 4 на рис. 6а). С увеличением числа циклов контактного нагружения до 3×10^8 на поверхности стали в периферийной зоне уже образовались разрушенные участки, которые частично соединены между собой (обозначены стрелкой 5 на рис. 6б). При числе циклов нагружения 5×10^8 эти участки сливаются и образуют на поверхности кольцеобразную зону разрушения (обозначена стрелками 6 на рис. 6в, г). Дальнейшее нагружение до 8×10^8 — 1×10^9 циклов сопровождается продолжающимся разрушением поверхности в зоне воздействия периферийной части индентора, о чем свидетельствует, в частности, увеличение глубины и протяженности контактных повреждений (см. рис. 6г). При этом глубина контактных повреждений в периферийной зоне превышает 40 мкм [24].

На рис. 7 представлены зависимости показаний вихретокового прибора от числа циклов нагружения, измеренные на пятнах контакта после контактно-усталостных испытаний стали AISI 321. Видно, что у стали AISI 321 для всех частот возбуждения вихретокового преобразователя зависимости показаний вихретокового прибора от числа циклов нагружения носят качественно одинаковый характер, при котором показания вихретокового прибора α сначала резко снижаются до 10^8 циклов нагружения. С увеличением числа циклов нагружения до 3×10^8 наблюдается достаточно интенсивный рост величины α , который сменяется ее менее интенсивным ростом при дальнейшем нагружении вплоть до 10^9 циклов. При этом, на максимальной использованной частоте $f = 124$ кГц рассматриваемая зависимость является наиболее выраженной (см. рис. 7е). Это свидетельствует о том, что в поверхностных слоях более интенсивно развиваются процессы усталостной деградации, влияющие на физические характеристики стали, поскольку глубина проникновения электромагнитного поля δ зависит от частоты (чем больше f , тем меньше δ) [27].

Наблюдаемое резкое снижение показаний вихретокового прибора α у стали AISI 321 при увеличении числа циклов нагружения до 10^8 (см. рис. 7) обусловлено значительным ростом доли мартенсита деформации в поверхностном слое от 8 до 38 об. % (см. рис. 5). Образование ферро-

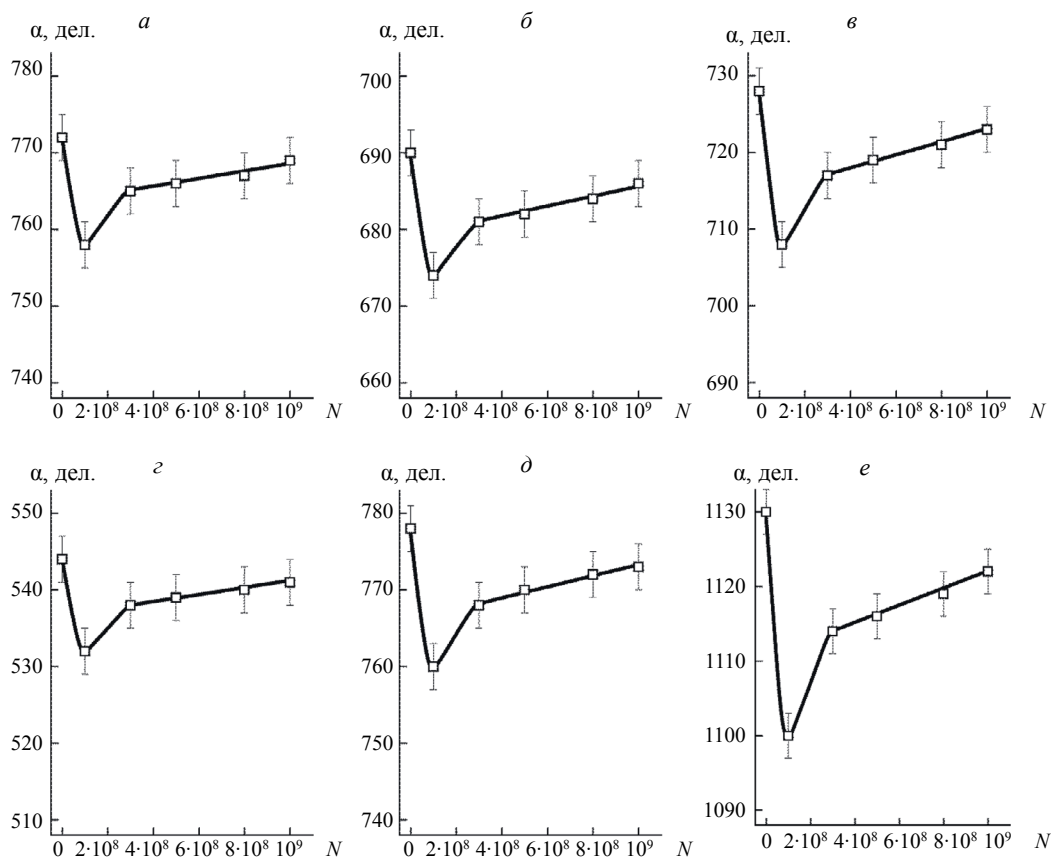


Рис. 7. Зависимости показаний вихретокового прибора α на частоте $f = 24$ (а), 36 (б), 72 (в), 96 (г), 112 (д) и 124 кГц (е) от числа циклов нагружения N , измеренные на пятнах контакта после контактно-усталостных испытаний стали AISI 321.

магнитной α' -фазы повышает магнитную проницаемость стали. Показания вихретокового прибора α прямо пропорциональны ЭДС, наведенной в измерительной обмотке вихретокового преобразователя, являются комплексным параметром и определяются значениями начальной магнитной проницаемости μ_i и удельного электрического сопротивления ρ объекта измерения $\alpha \sim \sqrt{1/(\mu_i \cdot \rho)}$ [28]. Поэтому рост магнитной проницаемости должен приводить к снижению величины α . При увеличении количества циклов до 3×10^8 наблюдаемый рост величины α у стали AISI 321 может быть обусловлен достаточно резким снижением доли мартенсита деформации в поверхностном слое до 17 об. % (см. рис. 5) в результате начавшегося его разрушения (см. рис. 6б). Дальнейшее нагружение до 10^9 циклов сопровождается менее интенсивным ростом показаний вихретокового прибора α , что обусловлено продолжающимся снижением доли мартенсита деформации в поверхностном слое до 11 об. % (см. рис. 5). Однако в диапазоне числа циклов нагружения 3×10^8 — 5×10^8 и 8×10^8 — 1×10^9 доля ферромагнитной α' -фазы по данным рентгеноструктурного анализа существенно не изменяется и соответственно составляет 17 и 11 об. %, а величина α продолжает расти (см. рис. 7). Это может быть обусловлено большей чувствительностью амплитудного метода вихретокового НК по сравнению с рентгеноструктурным фазовым анализом, причем наибольшая чувствительность была достигнута при измерениях на максимальной использованной частоте $f = 124$ кГц (см. рис. 7е). Следует подчеркнуть, что пластическая деформация и разрушение поверхности стали также должны оказывать влияние на показания вихретокового прибора [18—21]. Однако в рассматриваемом случае выделить вклад этих факторов в величину α достаточно сложно, поскольку магнитные свойства аустенита (парамагнетик) и мартенсита деформации (ферромагнетик) резко отличаются, и показания вихретокового прибора будут определяться главным образом количественным соотношением этих двух фаз в зоне контроля.

Следовательно, используя амплитудный метод вихретокового НК, можно контролировать процесс усталостной деградации при гигацикловой контактной усталости стали AISI 321. Однако зависимости показаний вихретокового прибора имеют нисходящую и восходящую ветви, граница

между которыми при данных условиях нагружения составила 10^8 циклов (см. рис. 7). По восходящей ветви можно контролировать степень разрушения поверхностного слоя, учитывая в методике контроля неоднозначный характер зависимостей показаний вихретокового прибора от числа циклов нагружения. Контроль может проводиться путем измерений показаний вихретокового прибора на частоте возбуждения вихретокового преобразователя $f = 124$ кГц. В этом случае в большей степени анализируются поверхностные слои, в которых интенсивно развиваются процессы усталостной деградации, оказывающие влияние на физические характеристики стали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована возможность проведения вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении аустенитной стали AISI 321. Механические испытания на контактную гигацикловую усталость проводили по схеме пульсирующего ударного контакта «плоскость—плоскость» с ультразвуковой частотой нагружения. Показано, что проведение вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении стали AISI 321 возможно, однако имеет определенные ограничения вследствие немонотонного изменения показаний вихретокового прибора α от числа циклов нагружения. Зависимости показаний вихретокового прибора имеют нисходящую и восходящую ветви, граница между которыми при данных условиях нагружения составила 10^8 циклов. При этом по восходящей ветви можно контролировать степень разрушения поверхностного слоя, учитывая в методике контроля неоднозначный характер зависимостей показаний вихретокового прибора от числа циклов нагружения. Контроль может проводиться путем измерений показаний вихретокового прибора на частоте возбуждения вихретокового преобразователя $f = 124$ кГц. В этом случае в большей степени анализируются поверхностные слои, в которых интенсивно развиваются процессы усталостной деградации, оказывающие влияние на физические характеристики стали. Наибольшее влияние на величину α оказывает количественное соотношение аустенита (парамагнетик) и мартенсита деформации (ферромагнетик) в зоне контроля. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методик оценки степени усталостной деградации и остаточного ресурса изделий из аустенитных сталей, подвергающихся в процессе эксплуатации контактно-усталостному нагружению.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и ИФМ УрО РАН по теме «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3. Электронная сканирующая микроскопия и механические испытания выполнены в ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН. Авторы выражают благодарность А.Л. Осинцевой за участие в экспериментальных исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. V. 7. Is. 3. P. 395—401.
2. *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. V. 21. Is. 8. P. 1772—1776.
3. *Khan S.H., Ali F., Nusair Khan A., Iqbal M.A.* Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction // *Computational Materials Science*. 2008. V. 43. Is. 4. P. 623—628.
4. *De Backer F., Schoss V., Maussner G.* Investigations on the evaluation of the residual fatigue life-time in austenitic stainless steels // *Nuclear Engineering and Design*. 2001. V. 206. Is. 2—3. P. 201—219.
5. *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. 105846. P. 1—6.
6. *Corte J.S., Rebello J.M.A., Areiza M.C.L., Tavares S.S.M., Araujo M.D.* Failure analysis of AISI 321 tubes of heat exchanger // *Engineering Failure Analysis*. 2015. V. 56. P. 170—176.
7. *Wilam M., Čermáková I.* Integrity of VVER steam generator tubes // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 1995. V. 23. Is. 2. P. 151—153.
8. *Klyushnikov V.A.* Influence of plastic deformation temperature on ultrasonic and electromagnetic properties of austenitic steel // *Materials Today: Proceedings*. 2019. V. 19. P. 2320—2322.
9. *Walther F., Eifler D.* Cyclic deformation behavior of steels and light-metal alloys // *Materials Science and Engineering A*. 2007. V. 468—470. P. 259—266.

10. *Niffenegger M., Leber H.J.* Sensitivity of the magnetization curves of different austenitic stainless tube and pipe steels to mechanical fatigue // *Journal of Nuclear Materials*. 2008. V. 377. Is. 2. P. 325—330.
11. *Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Gonchar A.V., Kachanov M.* On assessing damage in austenitic steel based on combination of the acoustic and eddy current monitoring // *International Journal of Engineering Science*. 2019. V. 135. P. 17—22.
12. *Lang M., Johnson J., Schreiber J., Dobmann G., Bassler H.-J., Eifler D., Ehrlich R., Gampe U.* Cyclic deformation behaviour of AISI 321 austenitic steel and its characterization by means of HTC-SQUID // *Nuclear Engineering and Design*. 2000. V. 198. Is. 1—2. P. 185—191.
13. *Das A.* Magnetic properties of cyclically deformed austenite // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2014. V. 361. P. 232—242.
14. *Dobmann G.* Fatigue monitoring by NDT of austenitic stainless steel at ambient temperature and 300°C and new attempts to monitor a fracture mechanics test // *Procedia Engineering*. 2014. V. 86. P. 384—394.
15. *Novotný P., Sajdl P., Macháč P.* A magneto-optic imager for NDT applications // *NDT & E International*. 2004. V. 37. Is. 8. P. 645—649.
16. *Замараев Л.М., Смирнов С.В., Матафонов П.П.* Исследование термоциклической долговечности стали 12Х18Н10Т в водородной и воздушной средах // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2008. № 2. С. 46—49.
17. *Dobromyslov A.V., Taluts N.I.* An electron-microscopic study of the deformation structure of the 12KH18N10T steel after explosive loading in spherical systems // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015. Is. 5. P. 109—117. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2015.5.109-117>
18. *Саврай Р.А., Макаров А.В., Горкунов Э.С., Коган Л.Х., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л.* Вихретоковый контроль усталостной деградации при контактном нагружении NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки // *Дефектоскопия*. 2015. № 11. С. 43—58.
19. *Savrai R.A., Makarov A.V., Gorkunov E.S., Soboleva N.N., Kogan L.Kh., Malygina I.Yu., Osintseva A.L., Davydova N.A.* Eddy-current testing of the fatigue degradation of a gas powder laser clad NiCrBSi—Cr₃C₂ composite coating under contact fatigue loading // *AIP Conference Proceedings*. 2017. V. 1915. 040049. P. 1—4. <https://doi.org/10.1063/1.5017397>
20. *Savrai R.A., Makarov A.V., Gorkunov E.S., Soboleva N.N., Kogan L.Kh., Malygina I.Yu., Osintseva A.L.* Eddy-current testing of fatigue degradation in additionally heat-treated gas powder laser clad NiCrBSi coating under contact fatigue loading // *AIP Conference Proceedings*. 2018. V. 2053. 040088. P. 1—4. <https://doi.org/10.1063/1.5084526>
21. *Саврай Р.А., Коган Л.Х., Макаров А.В., Соболева Н.Н.* Особенности вихретокового контроля усталостной деградации наплавленного лазером кобальтхромоникелевого покрытия при контактном нагружении // *Письма о материалах*. 2020. Т. 10. № 3. С. 315—321.
22. *Бакунов А.С., Мужижкий В.Ф., Шубочкин С.Е.* Современное решение задач вихретоковой структуроскопии // *Дефектоскопия*. 2004. № 5. С. 79—84.
23. *Savrai R.A., Malygina I.Yu., Kolobylin Yu.M.* An approach to eddy-current evaluation of the structural state in a cast aluminum–silicon alloy subjected to surface laser heat treatment // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2019. V. 38. Is. 3. 81. P. 1—7.
24. *Savrai R.A., Makarov A.V., Osintseva A.L., Malygina I.Yu.* Estimating the contact endurance of the AISI 321 stainless steel under contact gigacycle fatigue tests // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018. V. 27. Is. 2. P. 601—611.
25. Патент РФ № 162959. Устройство для контактно-усталостных испытаний образцов материалов / Р.А. Саврай, А.В. Макаров // *БИМП*. 2016. № 19.
26. *Ozgowicz W., Kurc A.* The effect of the cold rolling on the structure and mechanical properties in austenitic stainless steels type 18-8 // *Archives in Materials Science and Engineering*. 2009. V. 38. Is. 1. P. 26—33.
27. *Дорофеев А.Л.* Индукционная структуроскопия. М.: Энергия, 1973. 176 с.
28. *Дякин В.В., Сандовский В.А.* Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. М.: Наука, 1981. 136 с.