

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ИЗГОТОВЛЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ И ПОДВЕРГНУТЫХ УСТАЛОСТНЫМ ИСПЫТАНИЯМ

© 2024 г. Н.В. Гордеев^{1,2,*}, А.Н. Сташков¹, А.М. Матосян^{1,2},
М.К. Корх¹, А.П. Ничипурук¹, Д.А. Шишкин¹, И.Г. Ширинкина¹

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19
E-mail: *gordeev.nikita@urfu.me

Поступила в редакцию 30.05.2024; после доработки 07.06.2024
Принята к публикации 07.06.2024

Исследованы магнитные свойства и структура образцов из конструкционной стали 09Г2С, изготовленных методами литья и селективного лазерного сплавления, после усталостных испытаний на изгиб при их консольном закреплении. Установлено, что кривая усталости для 3D-стали проходит ниже, чем для литой стали 09Г2С. Коэрцитивная сила и остаточная намагниченность меньше возле места излома. Чем больше количество циклов до разрушения, тем меньше разность коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции в разных частях образца. Характер усталостного разрушения литой и 3D-стали различен: у образца из литой стали 09Г2С наблюдается прямой и однородный усталостный излом без видимых очагов зарождения трещин, у образцов из 3D-стали изломы неоднородные, имеются точечные очаги разрушения и гребни отрыва.

Ключевые слова: сталь, селективное лазерное сплавление, усталостные испытания, изгиб, магнитные свойства, фраттография.

MAGNETIC PROPERTIES AND STRUCTURE OF CARBON STEEL SAMPLES MANUFACTURED BY SELECTIVE LASER MELTING AND SUBJECTED TO FATIGUE TESTS

© 2024 N. V. Gordeev^{1,2,*}, A. N. Stashkov¹, A. M. Matosyan^{1,2},
M. K. Korkh¹, A. P. Nichipuruk¹, D. A. Shishkin¹, I. G. Shirinkina¹

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Russia 620108,
Yekaterinburg, S. Kovalevskaya str., 18

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Russia 620002 Yekaterinburg, Mira str., 19
E-mail: *gordeev.nikita@urfu.me

This study investigates the magnetic properties and structure of 09G2S steel samples fabricated using casting and selective laser melting methods. Fatigue bending tests with cantilever fixation were performed to analyze these properties. It was found that the fatigue curve for 3D-printed steel lies below that of cast steel with a similar chemical composition. Both the coercive force and residual magnetic induction are lower near the fracture site. The greater the number of cycles to failure, the smaller the difference in coercive force and residual magnetic induction in different parts of the sample. The nature of fatigue failure differs between cast and 3D-printed steel. The cast 09G2S steel sample exhibits a straight and homogeneous fatigue fracture without visible crack initiation sites. In contrast, the 3D-printed steel samples show heterogeneous fractures with localized zones of failure and tear-off ridges.

Keywords: steel, selective laser melting, fatigue tests, bending, magnetic properties, metallographic analysis.

DOI: 10.31857/S0130308224070079

ВВЕДЕНИЕ

Сталь 09Г2С нашла широкое применение в производстве труб, работающих под высоким давлением, а также в условиях статических и переменных нагрузок. При воздействии длительных повторяющихся переменных воздействий стальные изделия могут разрушаться от усталости, причем разрушения могут происходить внезапно, без заметных признаков пластической деформации [1], что является серьезной проблемой, особенно для трубопроводов, работающих под высоким давлением и в агрессивных средах.

В работе [2] проведен анализ структурных повреждений в стали 09Г2С, произведенной по технологии 3D-печати электродуговой наплавкой, с использованием акустического, магнитного и оптического контроля. В процессе усталостного нагружения наблюдалось уменьшение акустического сигнала. Магнитные характеристики (коэрцитивная сила и отношение коэрцитивной силы к остаточной магнитной индукции тела) на начальных этапах циклических испытаний показывали рост, но в момент образования магистральной трещины они уменьшились. В работе [3] на основе нейронной сети и измеряемых оптических параметров разработана модель для прогнозирования количества циклов до разрушения стали 09Г2С с погрешностью не более 15 %.

В работах [4, 5] измеряли интенсивность магнитного шума как литых, так и аддитивных образцов из стали 09Г2С при циклическом нагружении. В ходе измерения интенсивности магнитного шума было выявлено, что образцы, прошедшие термическую обработку, проявили более высокий уровень однородности. Также замечено небольшое увеличение измеряемого параметра в ходе увеличения количества циклов.

В работе [6] подробно описывается влияние термической обработки на структуру и магнитные свойства аддитивной стали 09Г2С, полученной методом селективного лазерного сплавления. Структура и магнитные свойства аддитивных и литых образцов значительно различаются. После проведения термической обработки (нормализация) магнитные свойства образцов выравниваются. Магнитные свойства литой и изготовленной на лазерном 3D-принтере стали в ходе малоцикловых испытаний значительно изменяются на начальной стадии испытаний [7].

Однако магнитные свойства (параметры петли магнитного гистерезиса) напечатанных на лазерном 3D-принтере и подвергнутых испытаниям на многоцикловую усталость образцов при изгибе для стали 09Г2С остаются неисследованными. Целью данной работы является изучение магнитных свойств и структуры образцов из стали 09Г2С, изготовленных методами литья и селективного лазерного сплавления и подверженных циклическим испытаниям при изгибе.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования проведены на образцах с размерами $120 \times 10 \times 2$ мм из конструкционной легированной стали 09Г2С (0,1 % С; 1,5 % Мn; <1 % Si). Сравнивались литые образцы (тип № 1) с образцами, напечатанными на лазерном 3D-принтере (далее 3D-сталь) и нормализованными при 980 °С (тип № 2). Напечатанный на 3D-принтере и непрошедший нормализацию образец (тип № 3) исследовался дополнительно к вышеперечисленным образцам. Подробнее параметры печати приведены в работе [7]. Усталостные испытания на изгиб проводились согласно ГОСТ 25.502—79 на оригинальной лабораторной установке. Один из концов образца жестко закреплялся, к другому (свободному) концу прикладывалась нагрузка. Коэффициент асимметрии R синусоидального цикла при усталостных испытаниях был равен -1 . Условия нагружения образцов одинаковые, тип нагружения — «жесткий» (постоянная деформация). Частота циклирования составляла 13,5 Гц. После задания амплитуды работа установки проходила в автоматическом режиме вплоть до разрушения образцов. Магнитные свойства измеряли с помощью вибрационного магнитометра Lake Shore Cryotronics VSM 7407 на вырезанных с разных сторон образцов фрагментах (диаметр 4 мм, толщина 1 мм). Каждый образец измерялся не менее трех раз, результаты усреднялись. Фрактографические исследования изломов образцов проводились с помощью оптического микроскопа Neophot 32.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны кривые усталости для образцов литой (тип № 1) и 3D-стали (тип № 2) 09Г2С. В эксперименте было доведено до разрушения 5 образцов из литой стали и 4 образца из 3D-стали. Из рис. 1 видно, что при максимальной нагрузке количество циклов до разрушения для образцов из литой и 3D-стали совпадает, а при меньших нагрузках кривая для 3D-стали идет ниже, поэтому прогнозируется, что предел выносливости 3D-стали будет меньше, чем у литой стали 09Г2С.

Магнитные свойства образцов после испытаний при максимальной нагрузке приведены в табл. 1 для литой и 3D-стали. После испытаний измерения проводились возле места излома и возле свободного конца.

Из табл. 1 видно, что коэрцитивная сила и остаточная намагниченность возле излома меньше чем возле свободного конца. Максимальная разница значений H_c и M_r возле места излома и свободного конца после разрушения наблюдается у литого образца из стали 09Г2С. Пониженные

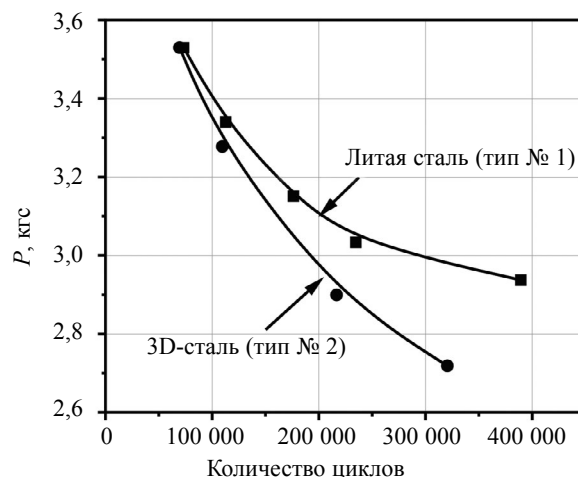


Рис. 1. Зависимость начальной амплитуды релаксационной кривой от концентрации лития.

Таблица 1

Магнитные свойства образцов после испытаний на усталость (амплитуда нагружения максимальная)

Образец	Количество циклов до разрушения	Зона измерений	H_c , А/см	M_r , Гс·см ³ /г	Разность H_c , %	Разность M_r , %
Литая сталь (№ 1)	73 287	Место излома	3,8	0,197	23,7	23,9
		Свободный конец	4,7	0,244		
3D-сталь, отжиг + нормализация (№ 2)	69 475	Место излома	5,1	0,32	9,8	9,4
		Свободный конец	5,6	0,35		
3D-сталь, отжиг (№ 3)	244 660	Место излома	11,8	0,78	2,5	2,6
		Свободный конец	12,1	0,80		

значения H_c возле мест изломов, скорее всего, связаны с релаксацией напряжений после разрушения образцов. Максимальные значения коэрцитивной силы наблюдаются у 3D-стали, подвергнутой только отжигу. При практически одинаковом количестве циклов до разрушения у образцов № 1 и № 2 разница значений H_c и B_r в разных частях образца № 1 максимальная, что свидетельствует о различном характере разрушения литой и 3D-стали.

Оптические изображения зоны изломов, а также схемы зоны излома представлены на рис. 2.

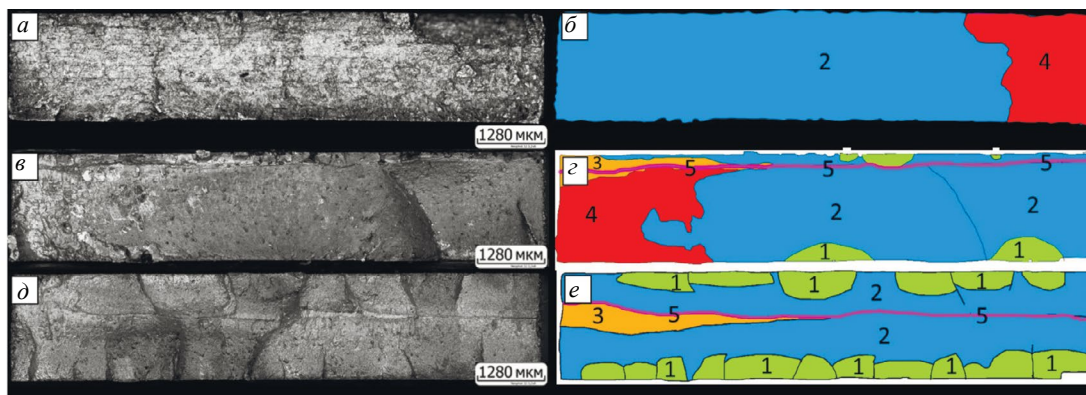


Рис. 2. Оптические изображения зоны изломов при одинаковых условиях нагружения образцов № 1 (а), № 2 (д) и № 3 (в), а также схемы зон усталостных изломов образцов № 1 (б), № 2 (е) и № 3 (з): 1 — очаг разрушения; 2 — зона стабильного роста трещин; 3 — зона ускоренного роста трещин; 4 — зона долома; 5 — гребень отрыва.

Образец № 1 из литой стали 09Г2С характеризуется прямым и однородным усталостным изломом без обнаруженных очагов зарождения трещин (рис. 2а), имеется зона долома 4 (рис. 2б). Образец № 2 из 3D-стали после отжига и нормализации также имеет прямой излом (рис. 2в), но он неоднороден по длине. Имеются несколько точечных очагов разрушения 1 с поверхности на противоположных сторонах образца, на одном из торцов имеется зона долома 4, гребень отрыва 5 сильно смещен к верхнему краю (рис. 2г). Образец № 3 из 3D-стали демонстрирует косой (рис. 2д) и неоднородный излом, с несколькими очагами разрушения 1, сливающимися в сеть ступенек и рубцов, при этом гребень отрыва 5 расположен ближе к центральной линии (рис. 2е).

ВЫВОДЫ

1. Кривая усталости для 3D-стали 09Г2С проходит ниже аналогичной кривой литой стали, что указывает на различия в пределах выносливости этих материалов.

2. Установлено, что коэрцитивная сила и остаточная намагниченность в зоне излома меньше, чем у свободного края образцов после усталостных испытаний. Максимальная разница H_c и M_r возле места излома и свободного конца после разрушения наблюдается у литого образца из стали 09Г2С.

3. Оптические изображения и результаты фрактографического анализа показывают различия в структуре и механизмах разрушения образцов из литой и 3D-стали. Образцы, изготовленные на лазерном 3D-принтере, после разрушения имеют характерный гребень отрыва, который не наблюдается у литого образца.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4. С. 59—70.

2. Аносов М.С., Рябов Д.А., Чернигин М.А., Соловьев А.А. Неразрушающий контроль накопления усталостных повреждений в стали св-09Г2С, полученной 3D-печатью электродуговой наплавкой // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. № 2. С. 47—53.

3. Манцеров С.А., Аносов М.С., Итальянцев Д.С. Диагностика структурной поврежденности стали 09Г2С, полученной с использованием технологии WAAM при малоцикловой усталости на основе нейро-нечеткой классификации // Морской вестник. 2023. № 2. С. 32—36.

4. Бусько В.Н., Ничипурук А.П., Сташков А.Н. Методика механических испытаний и исследование возможности контроля усталостной прочности магнитошумовым методом стальных образцов, изготовленных по аддитивной технологии // Контроль. Диагностика. 2024. № 4. С. 54—63.

5. Бусько В.Н. Лабораторная установка для исследования усталостной повреждаемости плоских ферромагнитных образцов // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 1. С. 165—167.

6. Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Schapova E.A., Kazantseva N.V., Makarova M.V. Structure and Magnetic Properties of 09G2S Steel Obtained by the Selective Laser Melting Method // Physics of the Solid State. 2022. Т. 64. № 3. Р. 148—153.

7. Stashkov A.N., Nichipuruk A.P., Schapova E.A., Gordeev N.V., Vshivtsev I.V., Kazantseva N.V. Magnetic Properties of Cyclically Tensile-Deformed Steel 09G2S Manufactured by Selective Laser Melting // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023. Т. 59. № 1. Р. 54—61.

REFERENCES

1. Erasov V.S., Oreshko E.I. Ispytaniia na ustalost' metallicheskih materialov (obzor) CHast' 1. Osnovnye opredeleniia, parametry nagruzheniia, predstavlenie rezul'tatov ispytaniia // Aviatsionnye materialy i tekhnologii. 2020. № 4. P. 59—70.

2. Anosov M.S., Riabov D.A., Chernigin M.A., Solov'ev A.A. Nerazrushaiushchii kontrol' nakopleniia ustalostnykh povrezhdenii v stali sv-09G2S, poluchennoi 3D-pechat'iu elektrodugovoi naplavkoi // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. 2023. Т. 21. № 2. P. 47—53.

3. Mantserov S.A., Anosov M.S., Ital'iantsev D.S. Diagnostika strukturnoi povrezhdennosti stali 09G2S, poluchennoi s ispol'zovaniem tekhnologii WAAM pri malotsiklovoi ustalosti na osnove neuro-nechetkoi klassifikatsii // Morskoi vestnik. 2023. № 2. P. 32—36.

4. *Bus'ko V.N., Nichipuruk A.P., Stashkov A.N.* Metodika mekhanicheskikh ispytaniy i issledovanie vozmozhnosti kontrolya ustalostnoi prochnosti magnitoshumovym metodom stal'nykh obraztsov, izgotovlennykh po additivnoi tekhnologii // *Kontrol'. Diagnostika*. 2024. № 4. P. 54—63.
 5. *Bus'ko V.N.* Laboratornaia ustanovka dlia issledovaniia ustalostnoi povrezhdaemosti ploskikh ferromagnitnykh obraztsov // *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2011. No. 1. P. 165—167.
 6. *Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Schapova E.A., Kazantseva N.V., Makarova M.V.* Structure and Magnetic Properties of 09G2S Steel Obtained by the Selective Laser Melting Method // *Physics of the Solid State*. 2022. T. 64. No. 3. P. 148—153.
 7. *Stashkov A.N., Nichipuruk A.P., Schapova E.A., Gordeev N.V., Vshivtsev I.V., Kazantseva N.V.* Magnetic Properties of Cyclically Tensile-Deformed Steel 09G2S Manufactured by Selective Laser Melting // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2023. V. 59. No. 1. P. 54—61.
-