

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЦИКЛИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ РАСТЯЖЕНИЕМ СТАЛИ 09Г2С, ИЗГОТОВЛЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

© 2023 г. А.Н. Сташков^{1,*}, А.П. Ничипурук¹, Е.А. Щапова¹, Н.В. Гордеев¹, И.В. Вшивцев¹, Н.В. Казанцева¹

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

Поступила в редакцию 21.10.2022; после доработки 09.12.2022
Принята к публикации 11.12.2022

Проведены испытания на малоцикловую усталость в упругопластической области деформаций образцов из стали 09Г2С, изготовленных на лазерном 3D-принтере методом селективного лазерного сплавления (СЛС-сталь). Измерены предельные петли гистерезиса и полевые зависимости обратимой магнитной проницаемости. Установлено, что нормализация при 980 °С (1 ч) снижает предел прочности СЛС-стали 09Г2С в 2 раза ($\sigma_B = 502$ МПа) и увеличивает относительное удлинение почти в 6 раз ($\delta = 34,6$ %), приближая эту сталь к литой стали 09Г2С. Магнитные свойства (H_c , B_r , μ_{max}) литой и СЛС-нормализованной стали до и после циклических испытаний схожи. Основные изменения этих свойств как литой, так и СЛС-стали наблюдаются на начальном этапе малоцикловых испытаний, дальнейшее увеличение количества циклов (вплоть до разрушения испытываемых образцов) не приводит к их существенному изменению. Характер изменения магнитоупругого поля H_c , определенного из экспериментальных полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости, во время малоцикловых испытаний для литой и СЛС-сталей кардинально различается: для литой стали 09Г2С магнитоупругое поле H_c практически не меняется с увеличением числа циклов, тогда как для стали 09Г2С, изготовленной с помощью селективного лазерного сплавления, на первых циклах испытаний наблюдается резкое возрастание величины H_c на 30 %, что скорее всего связано с возрастанием остаточных механических напряжений.

Ключевые слова: сталь, селективное лазерное сплавление, термическая обработка, растяжение, малоцикловая усталость, магнитные свойства.

DOI: 10.31857/S0130308223010050, EDN: BVMBTK

ВВЕДЕНИЕ

Стальные детали и конструкции, будь то подъемные механизмы, мосты, трубопроводы, детали подвески и трансмиссии, испытывают во время работы знакопеременные нагрузки, иногда превышающие предел упругости. Известно, что циклические нагрузки в упругопластической зоне деформаций (испытания на малоцикловую усталость) приводят к деградации механических свойств стали и разрушению конструкции после количества циклов N . Вовремя заметить такую деградацию металла и предотвратить разрушение — важная задача диагностики, в том числе с привлечением физических неразрушающих методов [1].

Аддитивные технологии получили широкое распространение в аэрокосмической отрасли, медицине, автомобильной промышленности [2—5]. Стальные детали, изготовленные с помощью аддитивных технологий, в частности селективного лазерного сплавления (СЛС), зачастую имеют свойства, отличающиеся от свойств деталей из аналогичной марки стали, но изготовленных с помощью «традиционных» технологий (литьем, ковкой, прокаткой) [6]. В деталях, изготовленных с помощью лазерных 3D-принтеров, возникают остаточные механические напряжения в результате локального нагрева материала в зоне лазерного нагрева и неравномерного охлаждения. Формирование остаточных напряжений в результате теплового воздействия связано с неполной релаксацией термонапряжений. При охлаждении зоны релаксации до исходного состояния в ней должны возникнуть остаточные растягивающие напряжения, а в окружающую зону релаксации материале — компенсирующие их остаточные сжимающие напряжения. В работе [7] приводятся результаты нейтронографических исследований остаточных напряжений в разных направлениях образцов стали 17-4 PH.

В работах [8—10] был установлен монотонный характер деформации сталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий (СЛС-стали), при статических испытаниях. Однако зачастую инженерные конструкции испытывают циклические нагрузки в процессе работы. Данные об усталостных свойствах СЛС-сталей очень ограничены. В работе [11] авторы выявили гораздо лучшие усталостные свойства стали 316L в исходном состоянии по сравнению с аналогами, изготовленными

ми традиционным способом, что, как считается, было вызвано сильным сопротивлением ячеистых структур зарождению трещин. В работе [12] приводятся результаты исследований циклической долговечности СЛС-образцов из стали SS316L с ячеистой структурой.

В работе [13] были исследованы квазистатические свойства при растяжении нержавеющей стали 308L, поведение при циклической деформации, усталостная долговечность и механизмы усталостного разрушения. По сравнению с горячекатаными аналогами образцы, изготовленные с помощью аддитивной технологии WAAM (с помощью проволочной дуги), показали несколько большую усталостную долговечность при относительно высоких амплитудах деформации, но меньшую усталостную долговечность при малых амплитудах деформации, что связано с их худшим зарождением трещин, но лучшим сопротивлением их распространению.

В работе [14] представлены результаты измерения анизотропии акустической скорости, модуля Юнга, модуля сдвига, коэффициента Пуассона СЛС-образцов из стали 09Г2С. Установлено, что анизотропия акустических свойств в образцах после релаксационного отжига (350 °С в течение 1 и 3 ч) составила 0,26 %, изменение скорости продольной волны в зависимости от стадии термообработки существенно и составляет 1,46 %, для скоростей поперечных волн это различие менее существенно и составляет 0,46 %.

На сегодняшний день отсутствуют работы, в которых приводятся данные о поведении магнитных свойств и остаточных механических напряжений СЛС-образцов из стали 09Г2С, подвергнутых малоцикловым испытаниям.

Вследствие чувствительности магнитных свойств к фазовым и структурным изменениям нами в работах [14—16] была предложена методика оценки остаточных механических сжимающих напряжений в пластически деформированных растяжением конструкционных и инструментальной углеродистых сталях. Методика заключается в экспериментальном определении из полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости магнитоупругого поля H_c и расчете остаточных сжимающих макронапряжений. Однако методика не была опробована на образцах, подвергнутых циклическим деформационным воздействиям.

Целью данной работы является установление закономерностей изменения магнитных свойств, в том числе магнитоупругого поля, чувствительного к действию механических напряжений, на разных этапах малоцикловых испытаний при одноосном растяжении образцов из стали 09Г2С, изготовленных методом селективного лазерного сплавления и литьем до и после термообработок.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве образцов сравнения были взяты литые образцы из конструкционной низколегированной стали 09Г2С (0,1 %С; 1,5 %Mn; <1 %Si). Образцы из СЛС-стали были изготовлены из исходного порошка стали 09Г2С российского производства с помощью лазерного 3D-принтера EOSINT 280M. В камеру принтера предварительно закачивался азот. Размеры фракции исходного порошка составляли от 10 до 45 мкм. Мощность лазера 3D-принтера составляла 200 Вт, диаметр пятна лазера — 50 мкм. Платформу для построения образцов подогревали до 100 °С для лучшей адгезии расплавленного порошка. Образцы отжигали вместе с подложкой при температуре 350 °С в течение 1 и 3 ч для уменьшения внутренних механических напряжений. После отжига образцы отрезали от подложки на электроэрозионном станке. Также часть образцов подвергли нормализации при 980 °С (время выдержки 30 мин), охлаждение на воздухе. Размер образцов для циклических испытаний и магнитных исследований составлял 2×3×120 мм³. На концах образцов были сделаны галтели для шпилечных захватов. Измерения петель магнитного гистерезиса проводили в пермеамetre с помощью измерительного комплекса REMAGRAPH C-500 производства фирмы Magnet Physik Dr. Steingroever GmbH (Германия).

Малоцикловые испытания проводили на разработанной гидравлической установке, представленной на рис. 1. К образцам прикладывалась растягивающая нагрузка, превышающая предел упругости, по достижении которой происходила разгрузка. Тип нагружения — «мягкое» (согласно ГОСТ 25.502—79). Частота циклирования по схеме «нагрузка—разгрузка» составляла ~0,05 Гц. Количество циклов и значение растягивающей нагрузки задавалось оператором, после чего работа установки проходила в автоматическом режиме. Погрешность задания нагрузки составила не более 1 %. После каждого этапа циклических испытаний определялось удлинение образцов. Образцы для проведения циклических испытаний с галтелями на концах для шпилечных захватов вырезались на электроэрозионном станке из исходных заготовок.

Полевые зависимости обратимой магнитной проницаемости были измерены на лабораторной установке, структурная схема которой представлена на рис. 2.

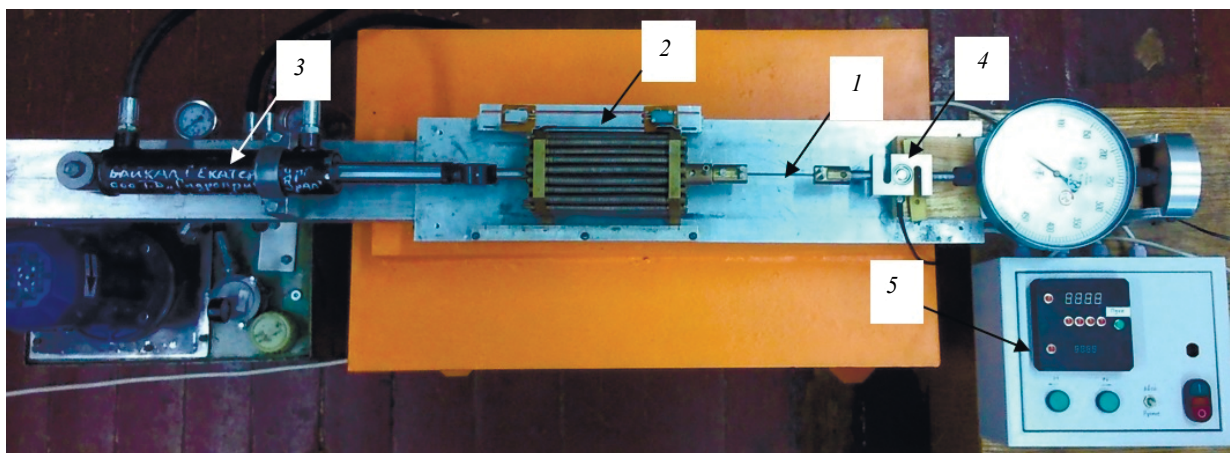


Рис. 1. Внешний вид установки для испытаний на малоцикловую усталость:

1 — испытуемый образец; 2 — демпфер; 3 — гидроцилиндр; 4 — электронный динамометр; 5 — блок управления.

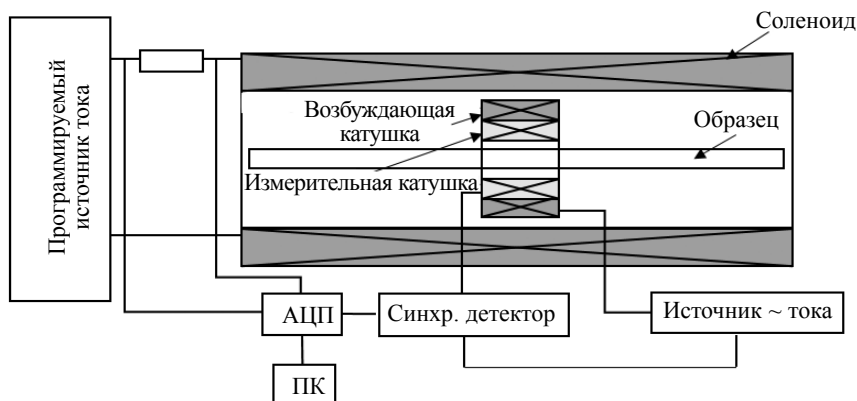


Рис. 2. Структурная схема установки для измерения полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости.

Перемагничивание образцов по предельной петле гистерезиса проводили в соленоиде при частоте изменения поля $5 \cdot 10^{-3}$ Гц. Максимальная напряженность магнитного поля в соленоиде была ± 350 А/см. В обмотку возбуждающей катушки подавался переменный ток небольшой амплитуды (амплитуда магнитного поля много меньше поля коэрцитивной силы образцов) с частотой 30 Гц. Полезный сигнал, пропорциональный обратимой магнитной проницаемости, был измерен катушкой (число витков 900) и детектирован на частоте подмагничивающего поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены измеренные полевые зависимости обратимой магнитной проницаемости образцов литой и СЛС-сталей 09Г2С до и после термической обработки. Все кривые имеют единственный максимум в области отрицательных полей. Наибольшее поле максимума имеет образец из СЛС-стали 09Г2С после гомогенизирующего отжига 350 °С, 3 ч. Коэрцитивная сила такого образца также максимальная среди всех образцов. Дополнительная нормализация при 980 °С (время выдержки 30 мин) привела к тому, что полевые зависимости для СЛС и литого образцов стали схожи.

На рис. 4 представлены графики зависимости относительного удлинения (δ) образцов литой и СЛС-сталей 09Г2С от количества циклов (N) при испытаниях на малоцикловую усталость. Для каждого образца рассчитывалась нагрузка, исходя из предварительно определенных в рамках

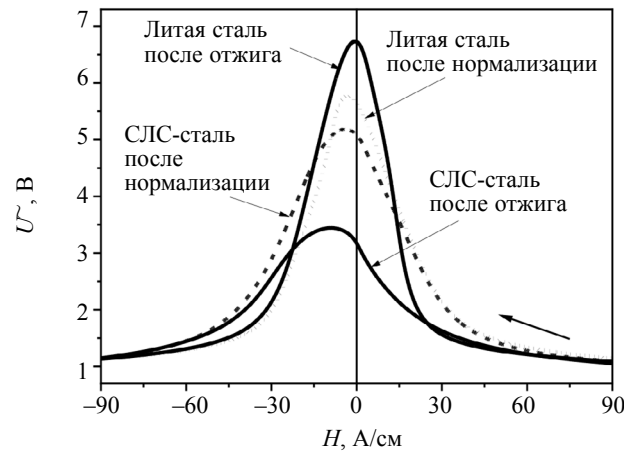


Рис. 3. Полевые зависимости обратимой магнитной проницаемости образцов литой и СЛС-сталей 09Г2С до циклических испытаний. Стрелкой показано направление перемангничивания.

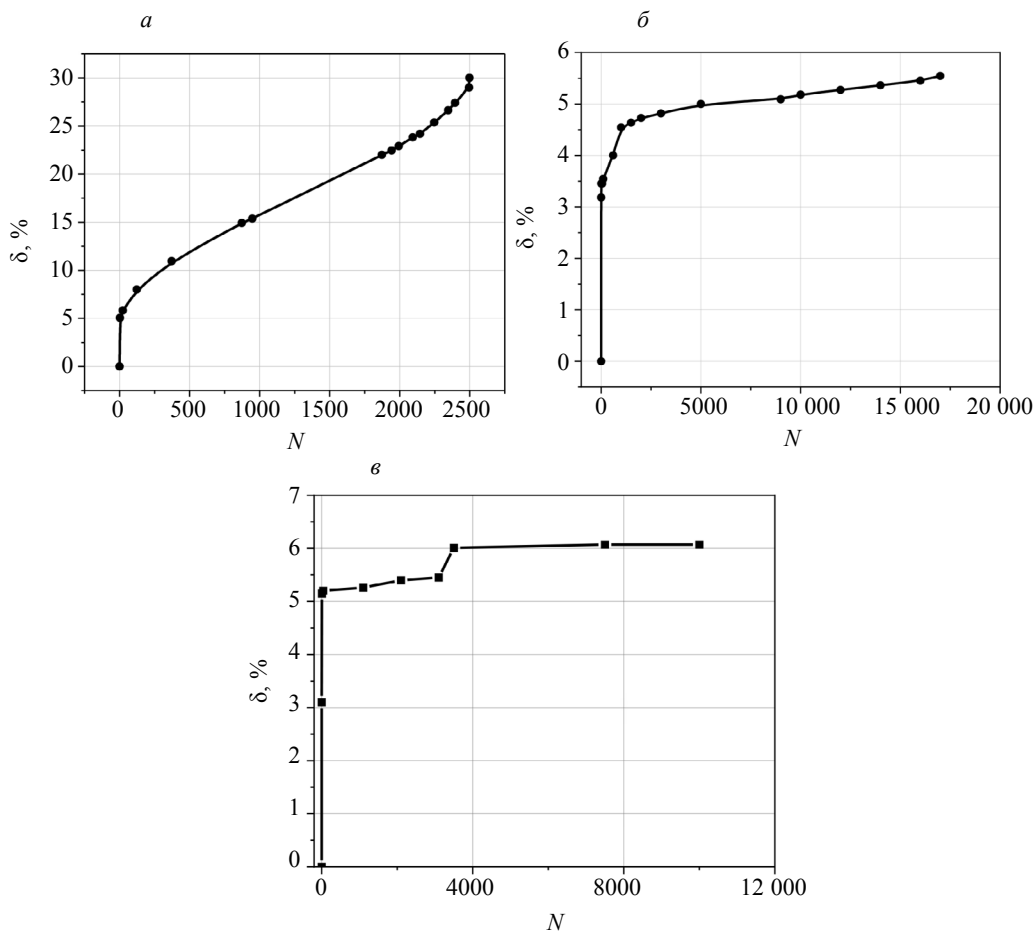


Рис. 4. Графики зависимостей относительного удлинения (δ) образцов литой и СЛС-сталей 09Г2С от количества циклов (N) при испытаниях на малоцикловую усталость: литой образец после отжига (а); литой образец после нормализации (б); напечатанный (СЛС) образец после нормализации (в).

статических механических испытаний пределов упругости $\sigma_{0,2}$ и прочности σ_B . Превышение предела упругости составило от 20 до 70 %. Для отожженного СЛС-образца даже незначительное превышение предела упругости привело к его разрушению, поэтому испытания на малоцикловую усталость не проводились. Наибольшее превышение предела упругости (на 70 %) было для литого отожженного образца, наименьшее — для СЛС-нормализованного образца (на 22 %). Несмотря на это, литой отожженный образец выдержал до разрушения 2500 циклов. Из рис. 4 видно, что он был самым пластичным среди всех исследованных образцов, его относительное удлинение у которого в ходе испытаний достигло 30 %, при этом удлинение было монотонным и равномерным. Два других образца (литой нормализованный и СЛС-нормализованный) значительно удлинились на первых циклах испытаний, дальнейший рост относительного удлинения был от 3,5 до 5,5 % для литого нормализованного и от 5,1 до 6,4 % для СЛС-нормализованного образцов. Небольшая ступенька в районе 3000 циклов для СЛС образца (рис. 4в) связана с увеличением прикладываемых напряжений с $(1,1 \cdot \sigma_{0,2})$ до $(1,2 \cdot \sigma_{0,2})$. Нормализация литого образца привела к его упрочнению по сравнению с отожженным образцом. Более подробные структурные исследования приведены в работе [6].

На рис. 5 представлены результаты измерения коэрцитивной силы H_c , остаточной магнитной индукции B_r и максимальной магнитной проницаемости μ_{max} образцов из литой и СЛС-стали 09Г2С на разных стадиях циклических испытаний (при разном относительном количестве циклов N/N^* , где N^* — максимальное количество циклов до разрыва). Из рис. 5а и 5б видно, что начальные значения магнитных свойств образцов различаются. Наименьшая коэрцитивная сила (см. рис. 5а) наблюдается у исходного литого отожженного образца, наибольшая — у СЛС-нормализованного. Обратная тенденция имеется для максимальной магнитной проницаемости: наибольшее значение — у литого отожженного образца, наименьшее — у СЛС-нормализованного. После нескольких циклов нагружения—разгрузки коэрцитивная сила и максимальная обратимая проницаемость становятся близки, кривые $H_c(N/N^*)$ и $\mu_{max}(N/N^*)$ идут рядом параллельно оси абсцисс. Значения остаточной магнитной индукции B_r (рис. 5б) циклически деформированных образцов различаются (минимальные значения — у литого отожженного образца), однако чувствительности к количеству циклов нет, т.е. кривые $B_r(N/N^*)$ после нескольких циклов деформации идут параллельно оси абсцисс.

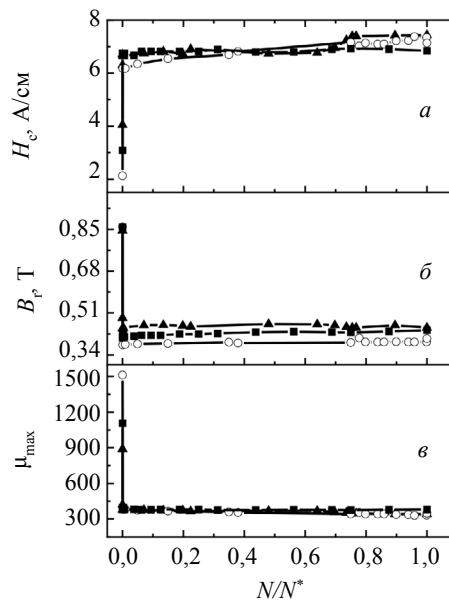


Рис. 5. Графики зависимостей коэрцитивной силы H_c (а), остаточной магнитной индукции B_r (б) и максимальной магнитной проницаемости μ_{max} (в) литой и СЛС-стали 09Г2С от относительного количества циклов при испытаниях на малоцикловую усталость: (○) — литая отожженная сталь; (■) — литая нормализованная сталь; (▲) — СЛС-нормализованная сталь.

На рис. 6 представлены полевые зависимости сигнала измерительной катушки $U(H)$ нормализованных образцов из литой и СЛС-стали 09Г2С, измеренные до и после малоцикловых испыта-

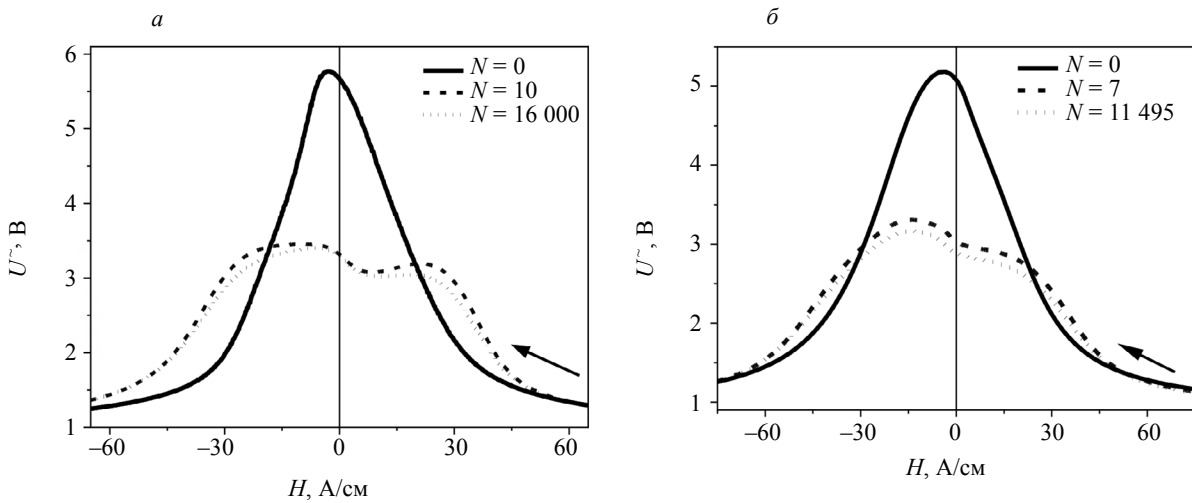


Рис. 6. Полевые зависимости сигнала измерительной катушки $U^{\sim}(H)$ литой (а) и СЛС (б) стали 09Г2С, измеренные до и после малоцикловых испытаний.

ний. Из рис. 6 видно, что на кривых $U^{\sim}(H)$ для образцов в исходном состоянии кривые имеют единственный максимум. Уже после первого цикла нагружения кривые видоизменяются, на них появляется максимум (или перегиб) в области положительных полей, а левый максимум смещается влево. Чем больше количество циклов, тем дальше максимумы друг от друга. Это связано с постепенным удлинением образца и накоплением уровня остаточных механических напряжений в стали с увеличением количества циклов.

Исходные экспериментальные зависимости $U^{\sim}(H)$, представленные на рис. 6, были обработаны с помощью функций псевдо-Фойгта [18]. Каждая зависимость $U^{\sim}(H)$ была описана тремя кривыми с единственными максимумами в различных полях, определены поля левого H_1 и правого H_2 максимумов и рассчитаны магнитоупругие поля H_{σ} . Для примера на рис. 7 представлен результат аппроксимации экспериментальной кривой $U^{\sim}(H)$ для СЛС-нормализованной стали после 10000 циклов нагружения—разгрузки. Из рис. 7 видно, что результатом аппроксимации является получение трех кривых с единственными максимумами в разных полях. Максимум средней кривой находится в области коэрцитивной силы. Появление максимума в области положительных полей, как было описано в [16, 17], связано с наведенной напряжением магнитной анизотропии типа

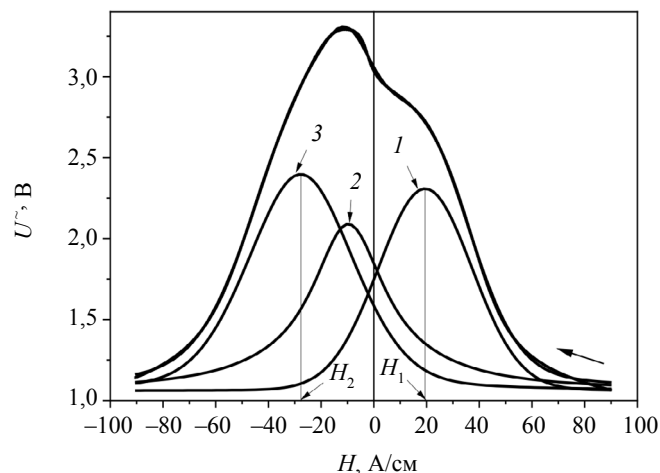


Рис. 7. Результат аппроксимации экспериментальной кривой $U^{\sim}(H)$ функциями псевдо-Фойгта для СЛС-нормализованной стали после 10000 циклов нагружения—разгрузки.

«легкая плоскость» в пластически деформированных образцах во время циклических испытаний. Именно благодаря наличию магнитной текстуры типа «легкая плоскость» появляется возможность разделения вклада в процессы перемагничивания 90- и 180-градусных доменных границ. Вклад 90° доменных границ, наиболее чувствительных к механическим напряжениям, характеризуют кривые 1 и 3 на рис. 7 [16], максимумы которых находятся в полях H_1 и H_2 . Среднее арифметическое этих полей — магнитоупругое поле H_σ .

Графики зависимостей магнитоупругого поля H_σ для нормализованных образцов из литой и СЛС-стали 09Г2С от относительного количества циклов N/N^* представлены на рис. 8. Из рис. 8 видно, что кривые для $H_\sigma(N/N^*)$ для литой и СЛС-сталей значительно различаются. Рост магнитоупругого поля для СЛС-стали наблюдается на всех участках изменения количества циклов, но основное изменение происходило на первых циклах испытаний. Величина магнитоупругого поля H_σ возрастает на 30 % от начала испытаний до разрыва СЛС-образца. Для литого нормализованного образца незначительные изменения магнитоупругого поля H_σ (см. рис. 8) наблюдались только на начальном участке кривой $H_\sigma(N/N^*)$.

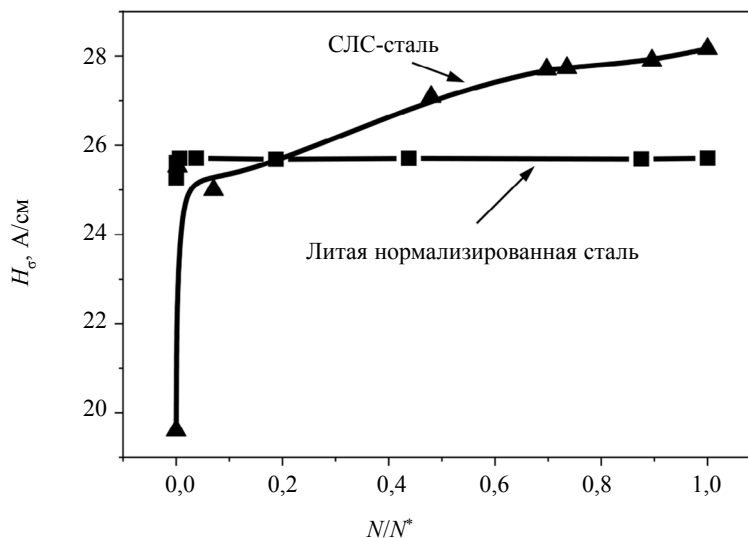


Рис. 8. Графики зависимостей магнитоупругого поля H_σ литой и СЛС-стали 09Г2С от относительного количества циклов N/N^* при испытаниях на малоцикловую усталость.

В случае малоцикловых испытаний при превышении предела упругости материала параметр H_σ (см. рис. 8) пропорционален накопленным остаточным механическим напряжениям [16]. Хотя в СЛС и литой сталях 09Г2С уровень механических напряжений резко возрастает на начальном этапе испытаний (за несколько циклов), последующие нагружения и разгрузки на протяжении тысяч и десятков тысяч циклов, по всей вероятности, не приводят к заметному изменению напряженно-деформированного состояния для литой стали 09Г2С. В силу монотонного роста величины H_σ для СЛС-стали 09Г2С предполагаем, что в материале накапливаются внутренние механические напряжения по мере увеличения количества циклов вплоть до разрушения образцов. Неразрушающий контроль уровня остаточных механических напряжений, как и в случае холодной пластической деформации растяжением, при статических испытаниях [16, 17] возможен по параметру H_σ .

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что СЛС-сталь 09Г2С после изготовления на лазерном 3D-принтере имеет большую прочность ($\sigma_b = 1057$ МПа) и низкую пластичность ($\delta = 6$ %), что нехарактерно для стали 09Г2С, изготовленной литьем и прокаткой. Испытания на малоцикловую усталость СЛС-стали (при превышении предела текучести) невозможны из-за близких значений пределов упругости и прочности.

2. Нормализация при 980 °С (1 ч) снижает предел прочности СЛС-стали 09Г2С в 2 раза ($\sigma_b = 502$ МПа) и увеличивает относительное удлинение почти в 6 раз ($\delta = 34,6$ %), приближая эту сталь по механическим свойствам к литой стали 09Г2С.

3. Основные изменения магнитных свойств (H_c , B_r , μ_{max}) как литой, так и СЛС-сталей наблюдаются на начальном этапе малоцикловых испытаний, дальнейшее увеличение количества циклов (вплоть до разрушения испытываемых образцов) не приводит к существенному изменению магнитных свойств. Характерно, что, несмотря на разницу магнитных свойств недеформированных сталей, в конце малоцикловых испытаний значения магнитных свойств литой и СЛС-сталей 09Г2С становятся практически равны.

4. Характер изменения магнитоупругого поля H_σ , определенного из экспериментальных полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости, во время малоцикловых испытаний для литой и СЛС-сталей кардинально различается: для литой стали 09Г2С магнитоупругое поле H_σ практически не меняется с увеличением числа циклов вплоть до разрушения образца, тогда как для стали 09Г2С, изготовленной с помощью селективного лазерного сплавления, на первых циклах испытаний наблюдается резкое возрастание величины H_σ на 30 %, что скорее всего связано с возрастанием остаточных механических напряжений. Дальнейший рост H_σ не столь существенен (около 8 %).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-58-00015 Бел а в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № г.р. 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / Под ред. В.В. Клюева. М., 2005.
2. Yusuf S.M., Cutler S., Gao N. Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry // *Metals*. 2019. V. 9. P. 1286.
3. Gisario A., Kazarian M., Martina F., Mehrpouya M. Metal Additive Manufacturing in the Commercial Aviation Industry: A Review // *Journal of Manufacturing Systems*. 2019. V. 53. P. 124—149.
4. Bhavar V., Kattire P., Patil V., Khot S., Gujar K., Singh R. A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing / *Additive Manufacturing Handbook*. CRC Press, 2017.
5. Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., Brooks M., Pitot J., Lopez E., Leary M., Berto F., du Plessis A. Metal Additive Manufacturing in Aerospace: A Review // *Materials & Design*. 2021. V. 209. P. 110008.
6. Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Щанова Е.А., Казанцева Н.В., Макарова М.В. Структура и магнитные свойства стали 09Г2С, полученной методом селективного лазерного сплавления // *Физика твердого тела*. 2021. Т. 63. Вып. 11. С. 1719—1724.
7. Masoomi M., Shamsaei N., Winholtz R.A., Milner J.L., Gnäupel-Herold T., Elwany A., Mahmoudi M., Thompson S.M. Residual stress measurements via neutron diffraction of additive manufactured stainless steel 17-4 PH // *Data in Brief*. 2017. V. 13. P. 408—414.
8. Ronneberg T., Davies C.M., Hooper P.A. Revealing relationships between porosity, microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion 316L stainless steel through heat treatment // *Materials and Design*. 2020. V. 189. P. 108481.
9. Park J.M., Choe J., Kim J.G., Bae J.W., Moon J., Yang S., Kim K.T., Yu J.H., Kim H.S. Superior tensile properties of 1%С-CoCrFeMnNi high-entropy alloy additively manufactured by selective laser melting // *Materials Research Letters*. 2020. V. 8. P. 1—7.
10. Zhu Z.G., An X.H., Lu W.J., Li Z.M., Ng F.L., Liao X.Z., Ramamurty U., Nai S.M.L., Wei J. Selective laser melting enabling the hierarchically heterogeneous microstructure and excellent mechanical properties in an interstitial solute strengthened high entropy alloy // *Materials Research Letters*. 2019. V. 7. No. 11. P. 453—459.
11. Elangeswaran Chola, Cutolo Antonio, Muralidharan Gokula Krishna, Vanmeensel Kim, Van Hooreweder Brecht. Microstructural analysis and fatigue crack initiation modelling of additively manufactured 316L after different heat treatments // *Materials and Design*. 2020. V. 194. P. 108962.
12. Cui Luqing, Jiang Fuqing, Deng Dunyong, Xin Tongzheng, Sun Xiaoyu, Taherzadeh Mousavian Reza, Lin Peng Ru, Yang Zhiqing, Moverare Johan. Cyclic response of additive manufactured 316L stainless steel: The role of cell structures // *Scripta Materialia*. 2021. V. 205. P. 114190.
13. Li Yajing, Yuan Yutong, Wang Dexin, Fu Sichao, Song Danrong, Vedani Maurizio, Chen Xu. Low cycle fatigue behavior of wire arc additive manufactured and solution annealed 308 L stainless steel // *Additive Manufacturing*. 2022. V. 52. P. 102688.
14. Murav'eva Olga, Murav'ev Vitaly, Volkova Ludmila, Kazantseva Nataliya, Nichipuruk Alexander, Stashkov Alexey. Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology // *Additive Manufacturing*. 2022. V. 51. P. 102635.

15. *Огнева М.С., Ничипурук А.П., Сташков А.Н.* Локальное определение поля наведенной магнитной анизотропии и уровня остаточных механических напряжений в деформированных растяжением объектах из малоуглеродистых сталей // Дефектоскопия. 2016. № 11. С. 3—9.

16. *Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V.* Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // NDT & E International. 2021. V. 118. P. 102398.

17. *Stashkov A.N., Schapova E.A., Afanasiev S.V., Stashkova L.A., Nichipuruk A.P.* Estimation of residual stresses in plastically deformed eutectoid steel with different perlite morphology via magnetic parameters // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2022. V. 546. P. 168850.

18. *Wertheim G.K., Butler M.A., West K.W., Buchanan D.N.* Determination of the Gaussian and Lorentzian content of experimental line shapes // Review of Scientific Instruments. 1974. V. 45 (11). P. 1369—1371.
