

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ТЕРМООБРАБОТАННОЙ СТАЛИ 38ХС НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЕМ

© 2024 г. А.М. Матосян<sup>1,2,\*</sup>, А.П. Ничипурук<sup>1</sup>, А.Н. Сташков<sup>1</sup>, Е.Ю. Сажина<sup>1</sup>,  
Н.В. Гордеев<sup>1,2</sup>, С.В. Афанасьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН,  
Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19  
E-mail: \*matosian01@gmail.com

Поступила в редакцию 31.05.2024; после доработки 28.06.2024

Принята к публикации 28.06.2024

Установлено, что в отличие от отожженной малоуглеродистой стали, для конструкционной стали 38ХС на полевых зависимостях дифференциальной магнитной восприимчивости  $\chi_d(H)$  особенности в виде перегиба и второго максимума появляются только для образцов с  $\varepsilon=4\%$  и температурами отпуска 650 и 700 °С. Отсутствие таких особенностей на кривых  $\chi_d(H)$  для образцов с  $\varepsilon = 2\%$  и  $T_{\text{отп}} < 650$  °С по всей вероятности связано с высоким уровнем хаотично распределенных внутренних напряжений, оставшихся после термообработки и не позволяющим сформировать после пластической деформации растяжением магнитную текстуру типа «легкая плоскость».

**Ключевые слова:** конструкционная легированная сталь, закалка, отпуск, холодная пластическая деформация, остаточные механические напряжения, магнитные свойства, дифференциальная магнитная восприимчивость, магнитная текстура типа «легкая плоскость».

## CHARACTERISTIC OF THE CHANGES IN MAGNETIC PROPERTIES OF HEAT-TREATED STEEL AT THE EARLY STAGES OF COLD PLASTIC DEFORMATION BY TENSILE STRAIN

© 2024 А.М. Matosyan<sup>1,2,\*</sup>, А.Р. Nichipuruk<sup>1</sup>, А.Н. Stashkov<sup>1</sup>, Е.Ю. Sazhina<sup>1</sup>,  
N.V. Gordeev<sup>1,2</sup>, S.V. Afanasiev<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Russia 620002 Yekaterinburg, Mira str. 19, Russia  
E-mail: \*matosian01@gmail.com

The present work establishes alloy steel 38KhS exhibits distinct features such as an inflection point and a second peak in the field dependencies of differential magnetic susceptibility only in samples with  $\varepsilon = 4\%$  and tempering temperatures of 650 and 700 °C, unlike annealed low-carbon steel. The absence of such characteristics on the  $\chi_d(H)$  curves for samples with  $\varepsilon = 2\%$  and  $T_{\text{temp}} < 650$  °C is likely due to the high level of randomly distributed internal stresses remaining after heat treatment. These stresses prevent the formation of an «easy plane» magnetic texture after plastic deformation by stretching.

**Keywords:** structural alloy steel, hardening, tempering, cold plastic deformation, residual mechanical stresses, magnetic properties, differential magnetic susceptibility, magnetic texture of «light plane» type.

DOI: 10.31857/S0130308224090059

### ВВЕДЕНИЕ

Конструкционная легированная сталь 38ХС используется для изготовления деталей с высокими требованиями к прочности и износостойкости — шестерни, валы, пальцы, муфты, впускные клапаны двигателей [1]. В процессе изготовления для придания стальным деталям требуемого сочетания механических свойств они подвергаются закалке и последующему отпуску в диапазоне температур от 450 до 700 °С [2]. Механические и магнитные свойства термообработанной стали 38ХС известны и хорошо изучены на сегодняшний день [3, 4]. Например, известно, что коэрцитивная сила стали 38ХС практически не изменяется в интервале температур отпуска 600—700 °С, что затрудняет неразрушающий контроль с помощью коэрцитиметров. Контроль качества деталей из стали 38ХС при высокотемпературном отпуске проводят по начальной магнитной проницаемости, имеющей локальный минимум в районе 600—650 °С [4]. В работе [5] было установлено, что в стали 38ХС, по данным рентгеноструктурного анализа, а

также по результатам магнитных измерений и металлографических исследований, с увеличением температуры отпуска до 550 °С внутренние напряжения уменьшаются. Дальнейшее увеличение температуры отпуска приводит к росту напряжений, локальный максимум которых наблюдается при 650 °С. При нагреве от 650 до 750 °С напряжения уменьшаются. Такое изменение напряженного состояния не соответствует общепринятым представлениям, согласно которым с увеличением температуры отпуска напряжения в углеродистой стали должны уменьшаться.

Известно, что холодная пластическая деформация растяжением предварительно отожженных образцов малоуглеродистой стали приводит к возникновению магнитной текстуры типа «легкая плоскость» (после снятия внешней нагрузки) [6], перпендикулярной направлению предварительного растяжения. На полевых зависимостях дифференциальной и обратимой магнитной проницаемостей возникают перегибы или дополнительные максимумы [7—9]. Однако остается невыясненным вопрос, всегда ли возникает в пластически деформированных образцах стали 38ХС наведенная деформацией магнитная текстура и как она влияет на магнитные свойства? Как будут конкурировать между собой остаточные механические напряжения, вызванные термической обработкой, стали (хаотично распределенные в поликристалле) и холодной пластической деформацией (вызванные действием внешней силы, приложенной в одном из направлений).

Целью данной работы является установление влияния холодной пластической деформации растяжением предварительно закаленных и отпущенных при разных температурах образцов из стали 38ХС на ее магнитные свойства.

### ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Образцы в количестве 12 штук из стали 38ХС в форме параллелепипедов с исходными размерами 10×10×65 мм подвергались закалке от 900 °С в масло и последующему отпуску при температурах 500, 600, 650, 700 °С. После термообработки образцы утонялись до 4 мм и подвергались пластической деформации растяжением ( $\varepsilon = 2; 4\%$ ) в испытательной машине Instron 5982. Измерение магнитных свойств проводилось в средней части образцов на установке Remagraph C-500. Проведено дифференцирование петель магнитного гистерезиса и построены полевые зависимости дифференциальной магнитной восприимчивости.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1а представлены зависимости коэрцитивной силы от температуры отпуска для образцов без деформации ( $\varepsilon = 0$ ), а также для образцов с относительным удлинением 2 и 4 %. С увеличением  $\varepsilon$  коэрцитивная сила увеличивается во всем исследованном диапазоне температур отпуска, что свидетельствует об увеличении остаточных механических напряжений.

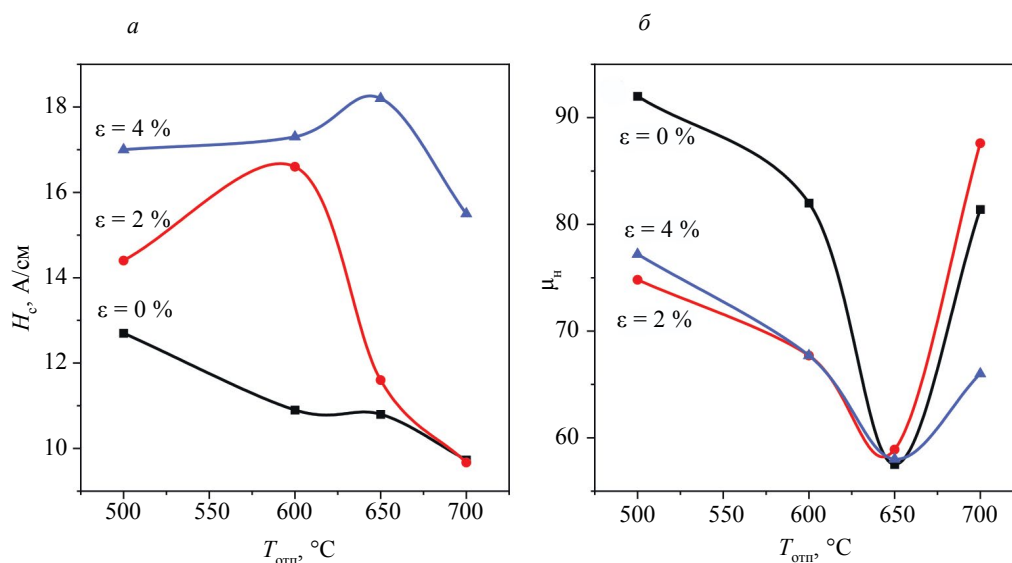


Рис. 1. Зависимости коэрцитивной силы (а) и начальной магнитной проницаемости (б) от температуры отпуска исходных и пластически деформированных образцов из стали 38ХС с относительными удлинениями 0, 2 и 4 %.

Однако характер изменения коэрцитивной силы в зависимости от температуры отпуска для недеформированных и подвергнутых деформационному воздействию образцов различен: для недеформированных образцов  $H_c$  монотонно уменьшается с увеличением  $T_{отп}$ , а для пластически деформированных образцов на зависимостях  $H_c(T_{отп})$  имеются локальные максимумы в районе  $600^\circ\text{C}$  для образца с  $\varepsilon = 2\%$  и в районе  $650^\circ\text{C}$  для образца с  $\varepsilon = 4\%$  (см. рис. 1а). Характер изменения начальной магнитной проницаемости  $\mu_n$  от  $T_{отп}$  не меняется с увеличением  $\varepsilon$  — как для недеформированного ( $\varepsilon = 0$ ), так и для пластически деформированных образцов на зависимостях  $\mu_n(T_{отп})$  наблюдаются минимумы в районе  $650^\circ\text{C}$  (см. рис. 1б). Деформация приводит к уменьшению значений  $\mu_n$  для всех  $T_{отп}$ , за исключением  $T_{отп} = 650^\circ\text{C}$ , где пластическая деформация не приводит к сколько бы то ни было существенному его изменению. Именно в районе  $T_{отп} = 650^\circ\text{C}$  у недеформированных образцов из стали 38ХС наблюдается локальный максимум внутренних микронапряжений, определенный в работе [5] по данным рентгеноструктурного анализа. По всей вероятности, после небольших пластических деформаций ( $\varepsilon \leq 4\%$ ) высокий уровень внутренних микронапряжений (хаотично распределенных) в закаленных и отпущенных образцах из стали 38ХС остается.

На рис. 2 приведены полевые зависимости дифференциальной магнитной восприимчивости  $\chi_d(H)$  для недеформированных и пластически деформированных образцов из стали 38ХС. Кривые  $\chi_d(H)$  для недеформированных закаленных и отпущенных образцов имеют единственный максимум в районе коэрцитивной силы. Пластическая деформация приводит к кардинальному изменению кривых. Из рис. 2 видно, что для образцов с удлинением  $2\%$  хотя и визуально различим единственный максимум, его амплитуда становится существенно меньше и наблюдается

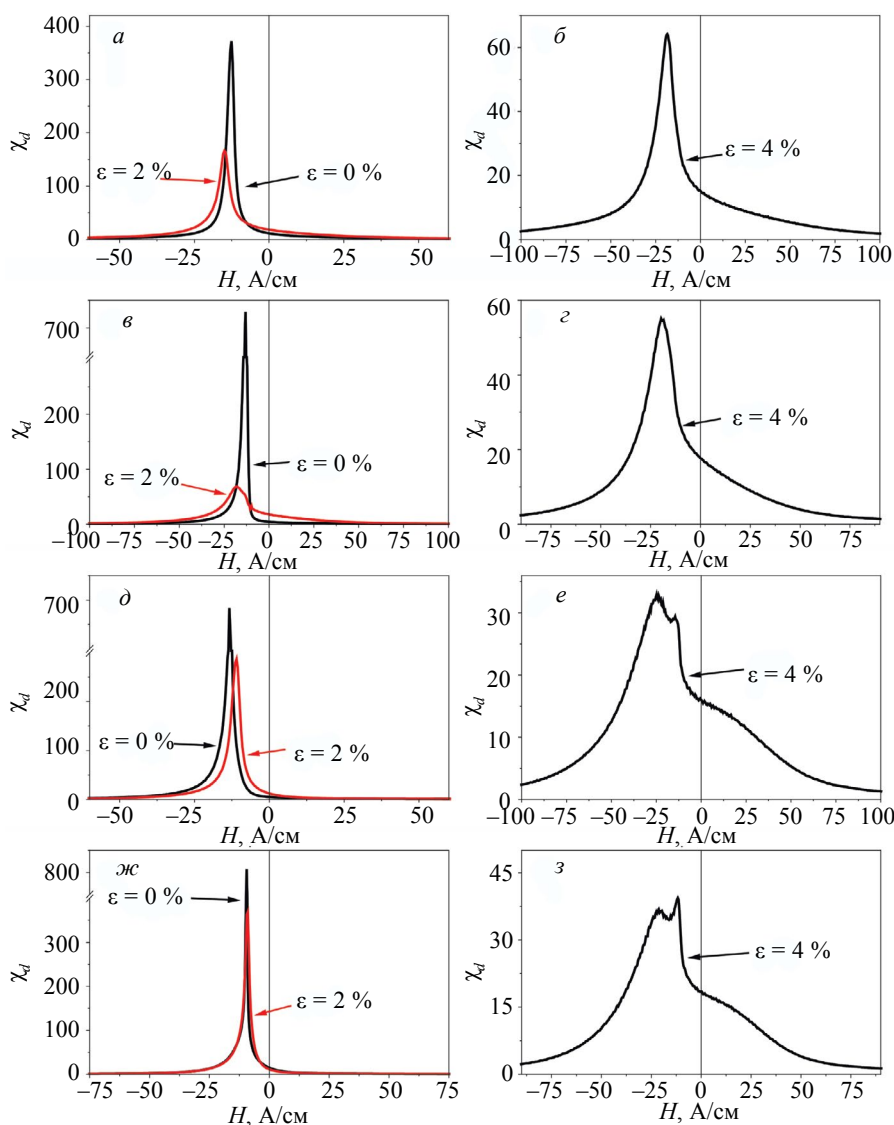


Рис. 2. Полевые зависимости дифференциальной магнитной восприимчивости, пластически деформированных образцов из стали 38ХС, предварительно закаленных и отпущенных при  $500^\circ\text{C}$  (а, б),  $600^\circ\text{C}$  (в, г),  $650^\circ\text{C}$  (д, е) и  $700^\circ\text{C}$  (ж, з).

его уширение. Наиболее выражено это происходит для образца с  $T_{\text{отп}} = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 2в). Еще более явные отличия на кривых  $\chi_d(H)$  наблюдаются для образцов с удлинением 4 %: для образцов с температурами отпуска  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 2б) и  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 2г) происходит еще большее уширение единственного пика, а для образцов с  $T_{\text{отп}} = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 2е) и  $T_{\text{отп}} = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 2з) на кривых появляется еще один максимум слева от основного и перегиб в положительном поле. Появление перегиба и дополнительного пика указывает на наличие в образцах магнитной текстуры типа «легкая плоскость», вызванной деформацией [7].

Характерно, что такая магнитная текстура в образцах из стали 38ХС не проявляется на начальном этапе пластической деформации ( $\varepsilon = 2\%$ ), как, например, в образцах отожженной малоуглеродистой стали СтЗсп [7]. Даже при  $\varepsilon = 4\%$  видимые перегибы и дополнительные максимумы отсутствуют на кривых  $\chi_d(H)$  для образцов с  $T_{\text{отп}} < 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это может быть вызвано изначально высокими хаотически распределенными остаточными механическими напряжениями после термообработки, конкуренция которых с остаточными напряжениями, вызванными одноосной пластической деформацией, не дает возможности образоваться магнитной текстуре.

## ВЫВОДЫ

Установлено, что после пластической деформации растяжением (при относительном удлинении 2 и 4 %) на зависимостях  $H_c(T_{\text{отп}})$  появляются локальные максимумы в районе  $600\text{—}650\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Локальный минимум на кривых  $\mu_n(T_{\text{отп}})$  наблюдается при  $T_{\text{отп}} = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ , его местоположение не меняется после пластической деформации образцов. На полевых зависимостях дифференциальной магнитной восприимчивости особенности в виде перегиба и второго максимума появляются только для образцов с  $\varepsilon = 4\%$  и температурами отпуска  $650$  и  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Вероятно, при температурах отпуска более  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  уровень внутренних микронапряжений снижается настолько, что вызванные пластической деформацией остаточные механические напряжения сжатия могут сформировать магнитную текстуру типа «легкая плоскость», что и приводит к появлению особенностей на кривых  $\mu_d(H)$ . Характерно, что в отличие от отожженной малоуглеродистой стали, никаких особенностей на кривых  $\mu_d(H)$  не наблюдается на начальной (при  $\varepsilon = 2\%$ ) стадии пластической деформации в исследованном интервале температур отпуска от  $500$  до  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрявцев И.В. Материалы в машиностроении. Выбор и применение. Т. 2. М.: Металлургия, 1968. 498 с.
2. Гуляев А.П. Металловедение / Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
3. Буда Г.В., Ничипурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 218 с.
4. Михеев М.Н., Морозова В.М., Вильданова Н.Ф., Гаврилова Л.Д., Захарова Г.Н., Ничипурук А.П., Ремез Н.В., Сингер К.Е., Чарикова Н.И. О возможности электромагнитного контроля качества закалки и отпуска изделий из стали 38ХС // Дефектоскопия. 1987. № 11. С. 38—44.
5. Ничипурук А.П., Горкунов Э.С., Кулеев В.Г., Чарикова Н.И. Влияние структурных изменений при отпуске на обратимые процессы намагничивания в конструкционных сталях // Дефектоскопия. 1990. № 8. С. 68—75.
7. 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—102402. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102398
8. Gupta Bhaawan, Uchimoto Tetsuya, Ducharme Benjamin, Sebald Gael, Miyazaki Takamichi, Takagi Toshiyuki. Magnetic incremental permeability non-destructive evaluation of 12 Cr-Mo-W-V steel creep test samples with varied ageing levels and thermal treatments // NDT & E International. 2019. V. 104. P. 42—50.
9. Nan Wang, Peng Li, Tuiyan Li, Yujue Wang, Cunfu He, Xiucheng Liu. Quantitative characterization of tensile stress in electroplated nickel coatings with a magnetic incremental permeability sensor. Sensors and Actuators // A: Physical. 2024. V. 368. P. 115082.

## REFERENCES

1. Kudryavcev I.V. Materialy v mashinostroenii. Vybory i primeneniye. T. 2. M.: Metallurgiya, 1968. 498 p.
2. Gulyaev A.P. Metallovedenie. Uchebnik dlya vuzov. 6-e izd., pererab. i dop. M.: Metallurgiya, 1986. 544 p.

3. Bida G.V., Nichipuruk A.P. Magnitnye svoystva termoobrabotannykh stalej. Ekaterinburg: UrO RAN, 2005. 218 p.
  4. Miheev M.N., Morozova V.M., Vil'danova N.F., Gavrilova L.D., Zaharova G.N., Nichipuruk A.P., Remez N.V., Singer K.E., Charikova N.I. O vozmozhnosti elektromagnitnogo kontrolya kachestva zakalki i otpuska izdelij iz stali 38HS // Defektoskopiya. 1987. No. 11. P. 38—44.
  5. Nichipuruk A.P., Gorkunov E.S., Kuleev V.G., Charikova N.I. Vliyanie strukturnykh izmenenij pri otpuske na obratimye processy namagnichivaniya v konstrukcionnykh stalyah // Defektoskopiya. 1990. No. 8. P. 68—75.
  6. 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—102402. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102398
  8. Bhaawan Gupta, Tetsuya Uchimoto, Benjamin Ducharne, Gael Sebald, Takamichi Miyazaki, Toshiyuki Takagi. Magnetic incremental permeability non-destructive evaluation of 12 Cr-Mo-W-V steel creep test samples with varied ageing levels and thermal treatments // NDT & E International. 2019. V. 104. P. 42—50.
  9. Nan Wang, Peng Li, Tuyen Li, Yujue Wang, Cunfu He, Xiucheng Liu. Quantitative characterization of tensile stress in electroplated nickel coatings with a magnetic incremental permeability sensor. Sensors and Actuators // A: Physical. 2024. V. 368. P. 115082.
-