

УДК 620.179.14

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА ОТДЕЛЬНЫХ ЗОН СВАРНОЙ ТРУБЫ С РАЗЛИЧНЫМ ИСХОДНЫМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ПРИ УПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Э. С. ГОРКУНОВ, А. М. ПОВОЛОЦКАЯ, С. М. ЗАДВОРКИН
ФГБУН «Институт машиноведения Уральского отделения РАН»
Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14

PECULIARITIES OF MAGNETIC BEHAVIOR IN THE ELASTIC DEFORMATION OF METAL IN INDIVIDUAL ZONES OF WELDED PIPE WITH DIFFERENT INITIAL STRESS-STRAIN STATES
E. S. GORKUNOV, A. M. POVOLOTSKAYA, S. M. ZADVORKIN

Аннотация

Изучено влияние величины предварительной пластической деформации, моделирующей исходное напряженно-деформированное состояние (НДС) изделия, на поведение магнитных характеристик металла различных зон сварной трубы при последующем упругом растяжении и сжатии. Измерения магнитных характеристик образцов проводили как в условиях замкнутой магнитной цепи, так и с применением накладных преобразователей вдоль и поперек направления приложения нагрузки.

Предыстория в виде пластической деформации одноосным растяжением сказывается на закономерностях изменения магнитных параметров материалов различных участков сварной трубы при последующем упругом деформировании как следствие вносимых пластической деформацией остаточных напряжений различного уровня, что свидетельствует о необходимости учета исходного НДС металлоконструкций при разработке магнитных методов определения параметров их НДС в процессе эксплуатации.

Ключевые слова:

предварительная пластическая деформация, упругое одноосное растяжение/сжатие, коэрцитивная сила.

Abstract

The effect of the value of preliminary plastic deformation viewed as an initial stress-strain state on the magnetic behavior of metal in different zones of welded pipe under subsequent elastic uniaxial tension/compression. Magnetic characteristics were measured both in a closed magnetic circuit and with the use of attached transducers along the direction of applied loading. The plastic deformation history affects the magnetic behavior of the material in different zones of welded pipe during subsequent elastic deformation, as plastic strain induces various residual stresses, and this necessitates taking into account the initial stress-strain state of products when developing magnetic techniques for the determination of their stress-strain parameters in operation.

Key words: preliminary plastic deformation, elastic uniaxial tension/compression, coercive force.

В настоящее время активно ведутся работы по созданию неразрушающих методов оценки изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) изделия при эксплуатационных нагрузках, но практически во всех работах не принимается во внимание то, что еще на стадии изготовления, а также при транспортировке изделия к месту монтажа и непосредственно при монтаже изделие может претерпевать дополнительную пластическую деформацию.

В сварных конструкциях, как правило, выделяют три зоны: основной металл, сварной шов и околошовная зона (ОШЗ). При этом, поскольку перечисленные зоны отличаются по структуре, физико-механическим свойствам, а также уровню остаточных напряжений, материал различных участков сварных конструкций в процессе изготовления, при транспортировке, монтаже и в процессе эксплуатации будет по-разному реагировать на действие приложенных нагрузок. Соответственно, и предварительная пластическая деформация будет по-разному сказываться на поведении магнитных характеристик металла различных участков сварного соединения трубы при их последующей упругой деформации.

В настоящей работе в целях определения возможностей магнитных методов для оценки параметров напряженно-деформированного состояния материала отдельных участков сварных металлоконструкций, с учетом их предыстории, было проведено исследование влияния предварительной пластической деформации на поведение магнитных характеристик металла различных зон сварной трубы при последующей упругой деформации.

Объектом исследования служили три группы плоских разрывных образцов, вырезанных соответственно из основного металла, ОШЗ и сварного шва трубы диаметром 1420 мм, изготовленной из стали контролируемой прокатки класса прочности X70. Образцы вырезали вдоль направления прокатки штрипса, который использовали для изготовления трубы. На первом этапе исследований три группы образцов подвергали одноосному растяжению до определенных значений упругопластической деформации, которым соответствовали величины пластической деформации (δ) 0,08; 0,23; 0,49 и 1,65 % для основного металла и величины (δ) 0,23 и 1,65 % для материала сварного шва и ОШЗ. На втором этапе предварительно пластически растянутые образцы подвергали упругому растяжению (сжатию) и последующему разгрузению с одновременным измерением их магнитных характеристик как в замкнутой магнитной цепи по схеме пермеметра, так и с использованием накладных преобразователей вдоль направления приложения нагрузки.

На рис. 1 (*I, II, III*) приведены зависимости магнитных характеристик от величины растягивающих напряжений, полученные на стадии пластической деформации до определенного уровня, образцов, вырезанных из основного металла, материала ОШЗ и металла сварного шва соответственно. Зависимости $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\max}(\sigma)$ для трех групп испытанных образцов, подвергнутых упругопластическому растяжению и последующему разгрузению, качественно подобны. Под действием растягивающей нагрузки со-





гласно современным представлениям о процессах, происходящих в магнитной структуре сталей при силовом воздействии, $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\max}(\sigma)$ изменяются неоднозначно, с образованием экстремумов. При разгрузке образцов после их пластической деформации происходят необратимые изменения магнитных характеристик, причиной которых являются вносимые пластической деформацией значительные остаточные напряжения. Наибольшие необратимые изменения магнитных характеристик при разгрузке после упругопластической деформации происходят в материале основного металла, а наименьшие – в металле сварного шва.

Для наглядного сравнения влияния пластической деформации на магнитные характеристики образцов из металла различных зон трубы на рис. 2 показаны зависимости значений магнитных характеристик после снятия нагрузки, приведенные к значениям в ненагруженном состоянии, $H_{c, \text{разгр}}/H_{c,0}$, $B_{r, \text{разгр}}/B_{r,0}$ и $\mu_{\max, \text{разгр}}/\mu_{\max,0}$ от величины пластической деформации. С ростом пластической деформации наблюдается монотонное изменение магнитных характеристик испытанных образцов всех трех групп. Однозначный характер изменения рассмотренных магнитных характеристик с увеличением пластической деформации позволяет использовать данные параметры для определения деформированного состояния различных участков сварного соединения трубы, которое сформировалось в процессе изготовления, при транспортировке и монтаже и которое необходимо учитывать в дальнейшем, при контроле напряженно-деформированного состояния отдельных участков сварной трубы в процессе эксплуатации.

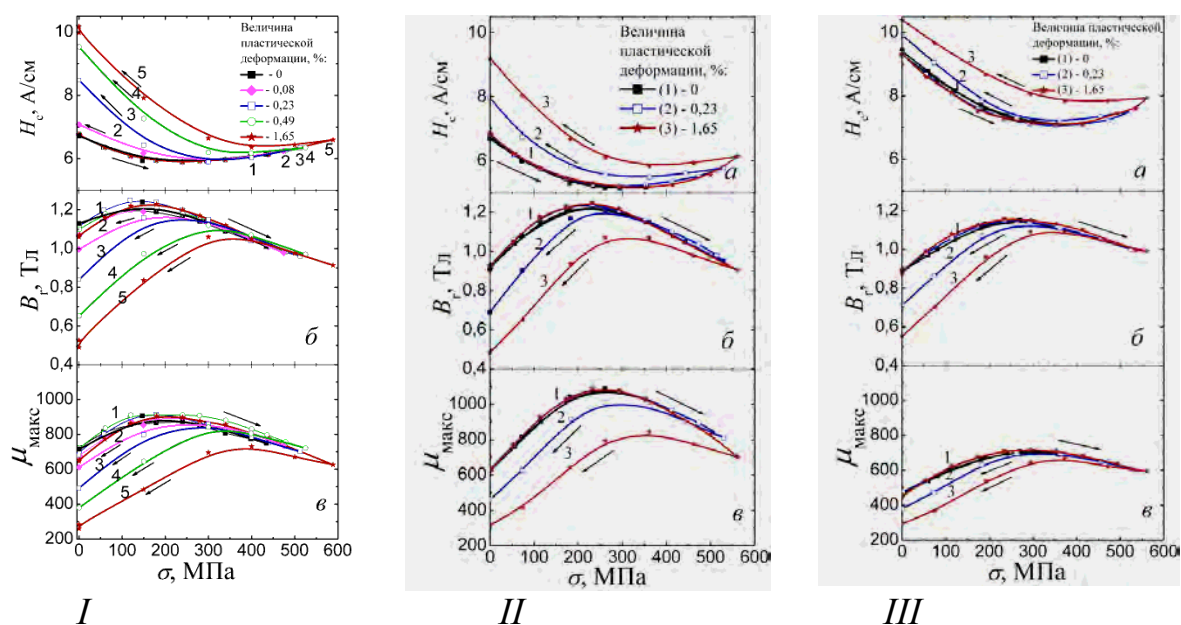


Рис. 1. Зависимости H_c (а), B_r (б) и μ_{\max} (в) от величины растягивающих напряжений при нагружении до различных величин пластической деформации с последующим разгрузением: I – основного металла, δ : 1 – 0; 2 – 0,08 %; 3 – 0,23 %; 4 – 0,49 %; 5 – 1,65 %; II, III – материал ОШЗ и металл сварного шва соответственно, δ : кривые 1 – 0; 2 – 0,23 %; 3 – 1,65 %

На втором этапе предварительно пластически растянутые на разные степени образцы, вырезанные из различных участков трубы, подвергали упругому растяжению (сжатию) и последующему разгрузению с одновременным измерением их магнитных характеристик. На рис. 3 (I, II, III) показаны зависимости магнитных характеристик образцов, изготовленных из основного металла, материала ОШЗ и сварного шва соответственно, от приложенных напряжений при упругом растяжении/сжатии после предварительного пластического растяжения на разные степени. Измерения проведены в замкнутой магнитной цепи.

При растяжении характер изменения магнитных характеристик для образцов с различным исходным НДС одинаков. Магнитные характеристики при увеличении значений растягивающих напряжений изменяются немонотонно – с образованием экстремумов. Чем больше величина предварительной пластической деформации образцов, тем больше величины напряжений, которым соответствуют эти экстремумы. Величины напряжений, при которых наблюдаются минимумы значений коэрцитивной силы (и соответственно максимумы на зависимостях $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\max}(\sigma)$), связаны с частичным уравниванием внешними растягивающими напряжениями части остаточных сжимающих напряжений. Очевидно, чем больше величина предварительной пластической деформации, тем выше уровень остаточных сжимающих напряжений, а значит, большая величина приложенных напряжений, при которых наблюдаются экстремумы магнитных характеристик. Следует отметить, что зависимости магнитных характеристик от приложенных напряжений, измеренные в процессе упругого растяжения, в пределах погрешности измерений совпадают с аналогичными зависимостями, полученными при снятии нагрузки. Причем обратимый характер изменений магнитных параметров свойственен для всех образцов независимо от величины их предварительной пластической деформации.

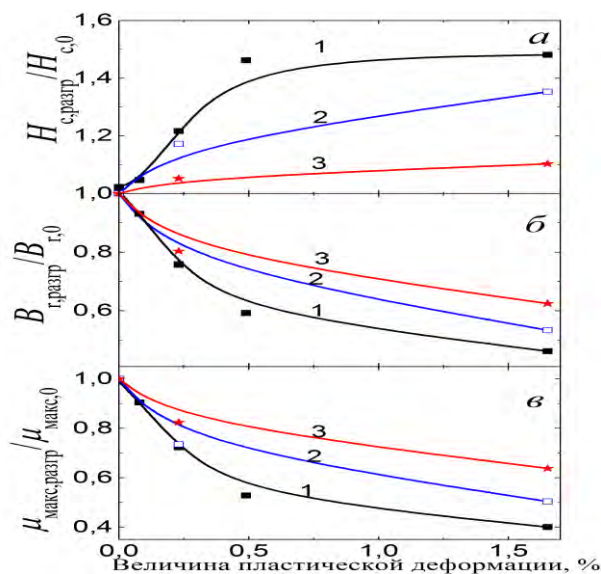


Рис. 2. Относительные изменения магнитных параметров после разгрузки от величины пластической деформации: кривые 1 – основной металл; 2 – материал ОШЗ; 3 – металл сварного шва



При упругом сжатии зависимости магнитных характеристик образцов, предварительно пластически деформированных растяжением на небольшие величины, менее 0,23 %, сохраняют монотонный характер во всем интервале сжимающих напряжений. При сжатии образцов с величинами предварительной пластической деформации 0,23 % и выше и, соответственно, с более высоким уровнем остаточных сжимающих напряжений, на зависимостях $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\max}(\sigma)$ наблюдаются нехарактерные для случая упругого деформирования сжатием экстремумы. Кроме того, для этих образцов наблюдаются необратимые изменения магнитных параметров при снятии нагрузки после упругого сжатия. Необратимые изменения магнитных характеристик образцов с большими величинами предварительной пластической деформации обусловлены, возможно, переходом в область развитой пластической деформации тех областей металла, где внешние сжимающие напряжения накладываются на остаточные напряжения сжатия, в результате чего суммарные напряжения превышают предел текучести. Также следует учитывать уменьшение предела текучести при испытаниях на сжатие исследованных образцов, подвергнутых предварительному пластическому растяжению (так называемый эффект Баушингера). При пластическом сжатии происходит разрушение магнитной текстуры типа «плоскость легкого намагничивания» и, соответственно, облегчение процессов перемагничивания вдоль направления сжатия. Последнее, в свою очередь, приводит к снижению значений коэрцитивной силы, вследствие чего кривая $H_c(\sigma)$, соответствующая процессу разгрузки после сжатия, расположена ниже аналогичной кривой, полученной при нагружении.

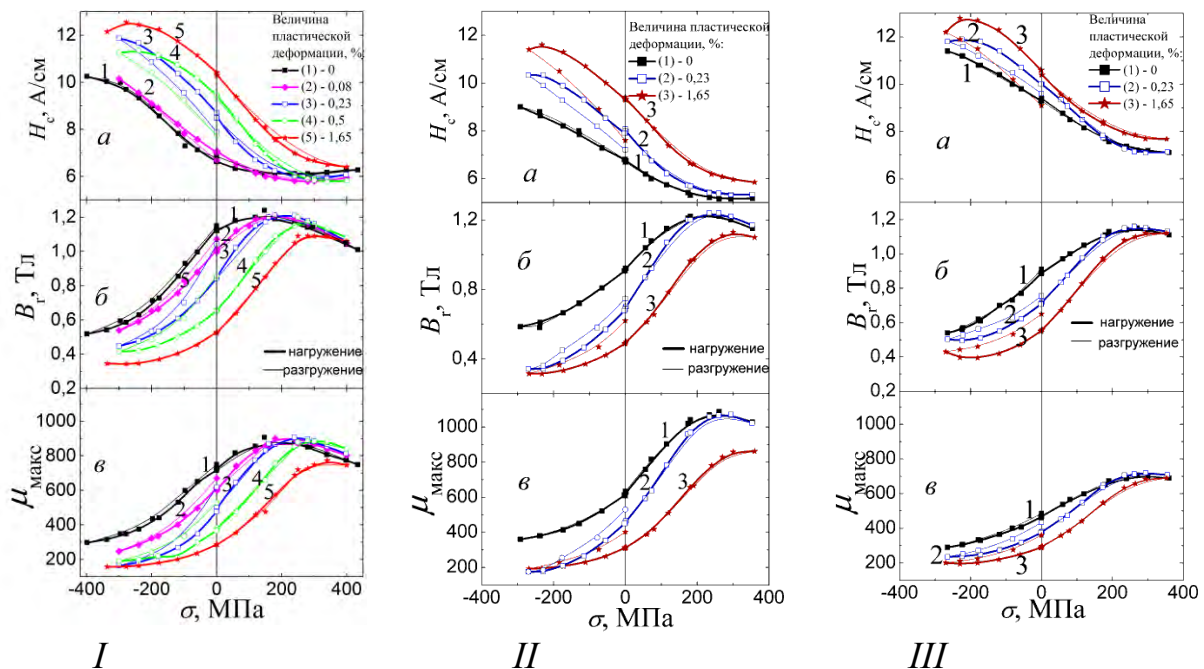


Рис. 3. Зависимости от внешних приложенных напряжений значений H_c (а), B_r (б) и μ_{\max} (в), измеренных в замкнутой магнитной цепи: I – основной металл, δ : 1 – 0; 2 – 0,08 %; 3 – 0,23 %; 4 – 0,49 %; 5 – 1,65 %; II, III – материал ОШЗ и металл сварного шва соответственно, δ : кривые 1 – 0; 2 – 0,23 %; 3 – 1,65 %

На рис. 4 (*I, II, III*) представлены результаты исследований, проведенных с использованием накладных преобразователей: зависимости от приложенных нормальных напряжений значений коэрцитивной силы H_{c3} , а также среднеквадратичных значений напряжения U магнитных шумов Баркгаузена для образцов, изготовленных соответственно из основного металла, материала ОШЗ и сварного шва.

В интервале приложенных упругих напряжений примерно от -200 до 120 МПа магнитные характеристики всех исследованных образцов, изготовленных из различных зон сварного соединения и подвергнутых предварительной пластической деформации различной степени, изменяются монотонно и могут быть использованы для контроля действующих упругих напряжений в отдельных зонах сварной трубы. При этом необходимо отметить, что указанный интервал приложенных упругих напряжений перекрывает диапазон рабочих давлений в трубопроводе.

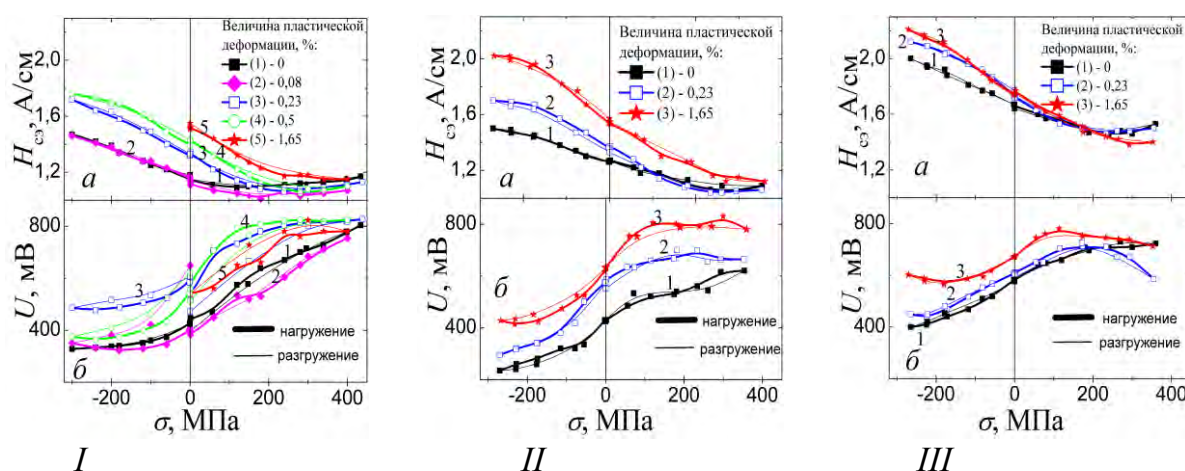


Рис. 4. Зависимости от внешних приложенных напряжений значений коэрцитивной силы H_{c3} (*a*) и среднеквадратичных значений напряжения U (*б*), измеренных с помощью приставных датчиков: *I* – основной металл, δ : 1 – 0; 2 – 0,08 %; 3 – 0,23 %; 4 – 0,49 %; 5 – 1,65 %; *II, III* – материал ОШЗ и металл сварного шва соответственно, δ : кривые 1 – 0; 2 – 0,23 %; 3 – 1,65 %

Таким образом, установлена корреляция между магнитными характеристиками металла различных зон сварной трубы большого диаметра из стали класса прочности X70 и степенью пластической деформации этих материалов. Определены зависимости магнитных характеристик основного металла, материалов сварного шва и околошовной зоны трубы большого диаметра от приложенных упругих напряжений одноосновного растяжения/сжатия, с учетом предыстории материалов в виде пластической деформации на различные степени.

Показано, что в диапазоне приложенных упругих одноосных напряжений от -200 до 120 МПа магнитные характеристики исследованных материалов изменяются однозначно, что позволяет использовать их для оценки напряженно-деформированного состояния отдельных зон сварных труб из стали класса прочности X70.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета исходного НДС металлоконструкций при разработке магнитных методов определения параметров их НДС.

E-mail: us@imach.uran.ru