

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА, СТРУКТУРУ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОРПУСНОЙ СТАЛИ

К. А. ЮЩЕНКО¹, А. В. МАЦ², И. М. НЕКЛЮДОВ², В. И. СОКОЛЕНКО², Н. А. ЧЕРНЯК²

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт».

61108, г. Харьков, ул. Академическая, 1. E-mail: vsokol@kipt.kharkov.ua

Ранее было установлено, что обработка сварных соединений реакторной корпусной стали 15X2НМФА переменным магнитным полем промышленной частоты существенно улучшает комплекс механических свойств в условиях одноосного растяжения, что сопровождается снижением уровня термических напряжений в зоне сварного шва. Целью настоящей работы являлось изучение влияния магнитной обработки на магнитные характеристики, структуру, уровень и распределение остаточных напряжений в сварном соединении. Об изменениях напряженно-деформированного состояния различных участков сварного соединения судили по данным рентгеноструктурных и электронно-микроскопических исследований. Показано, что в результате воздействия переменного магнитного поля происходит снижение уровня микронапряжений в переходном слое и выравнивание спектра этих напряжений по всей области термического влияния. Отмечена корреляция изменений начальной магнитной восприимчивости и микронапряжений в переходном слое и формирование выраженной магнитной текстуры в центральной части шва. Рассмотрены механизмы изменений магнитных свойств и структуры при магнитной обработке сварного соединения, связанные с активацией пластических микросдвигов и перераспределения дефектов. Приведенный способ магнитной обработки можно рассматривать как магнитный отпуск, обеспечивающий повышение однородности напряженно-деформированного состояния сварных соединений, что способствует увеличению их устойчивости к зарождению и распространению трещин. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: сварное соединение, корпусная сталь, магнитная обработка, структура, внутренние напряжения

При выполнении сварных соединений в элементах конструкций может возникать пространственно-неоднородное напряженное состояние с образованием локальных зон концентрации напряжений. Они предвещают начало пластической деформации при очень малых внешних нагрузках и в результате вызывают деградацию эксплуатационных характеристик, особенно в условиях статического, циклического и ударного нагружений. Известные способы снижения уровня остаточных напряжений и создания более однородного их распределения с целью предупреждения возникновения микро- и макронесплошностей предусматривают специальную термообработку, ультразвуковое, импульсное или вибрационное воздействие [1].

Ранее было показано, что обработка сварных образцов стали 15X2НМФА в напряженно-деформированном состоянии переменным магнитным полем существенно улучшает механические свойства в условиях одноосного растяжения, увеличивает ударную вязкость, снижает температуру вязко-хрупкого перехода и уровень напряжений I рода в зоне сварки и в области термического влияния [2]. Для сварного

соединения корпусной стали в результате магнитной обработки следует ожидать коррелированного изменения магнитных свойств, структуры и полей напряжений в силу взаимосвязи магнитной и решеточной подсистем, что характерно для магнитоупорядоченных материалов [3].

В связи с этим целью настоящей работы являлось изучение влияния эффективности магнитного воздействия на структуру, магнитные характеристики, уровень и распределение микронапряжений в сварных соединениях стали 15X2НМФА.

Материалы и методики исследований. Из массивной заготовки корпусной стали 15X2НМФА была изготовлена пластина размером 12×50×150 мм³ с канавкой глубиной 8 мм и шириной 10 мм, в которой методом аргонодуговой сварки с неплавящимся электродом был сформирован сварной шов. Скорость сварки составляла 6 м/ч, количество проходов — 13. Края пластины зажимались в захватах для предотвращения формоизменения при остывании шва. В таблице приведен химический состав стали и присадочной проволоки.

Химический состав стали и присадочной проволоки, мас. %

Материал	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Ni	Mo	V
15X2НМФА	0,13...0,18	0,17...0,37	0,3...0,6	0,012...0,013	<0,035	1,8...2,3	0,07	1,0...1,5	0,5...0,7	0,10...0,12
Св-08Г2С ($d = 1,2$ мм)	0,09	0,89	1,89	0,023	0,024	0,032	0,052	0,028	-	-

Из сварного соединения электроискровой резкой изготавливались образцы, структурное состояние которых соответствовало различным участкам сварного соединения — от центральной части шва до металла на расстоянии около 18 мм от нее. Схема «раскроя» сварного соединения представлена на рис. 1.

Магнитную обработку образцов проводили переменным магнитным полем частотой 50 Гц. Образцы располагались вдоль направления магнитного поля и охлаждались проточной водой для исключения дополнительного разогрева токами Фуко. Использованный режим воздействия магнитным полем соответствует режиму обработки деформированной корпусной стали, обеспечивающему эффект максимального изменения микротвердости [4].

Измерения магнитных характеристик осуществляли в замкнутой магнитной цепи по схеме пермеметра. По измеренным величинам начальной магнитной восприимчивости χ в образцах строилось ее распределение по сечению сварного соединения. Значения микронапряжений σ_{II} и размеров D областей когерентного рассеяния (ОКР) определялись по кривым отражений, снятых на дифрактометре ДРОН-4.1. Съемку дифрактограмм эталонного (отожженное армко-железо) и

исследуемых образцов проводили в неизменных условиях по точкам. Для анализа выбирались отражения (110) и (220) в фильтрованном K_{α} -излучении железного анода. Площадь облучаемого участка, находящегося в непосредственной близости от переходного слоя сварного шва, не превышала 4 мм². Для этих же областей были проведены электронно-микроскопические исследования тонкой структуры на микроскопе ЭМВ-100БР.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 2 представлено распределение нормированных величин χ/χ_{\min} начальной магнитной восприимчивости сварного соединения. Видно, что в исходном состоянии зависимость χ/χ_{\min} достигает минимального значения в зоне термического влияния вблизи переходного слоя, при этом для материала вблизи центра сварного шва и на расстоянии около 5,5 мм от переходного слоя к краю пластины χ/χ_{\min} возрастает приблизительно в 2 раза. В результате магнитной обработки произошло существенное изменение характера распределения: так, вблизи границы сварной шов-сталь наблюдается увеличение χ/χ_{\min} примерно на 40 %, тогда как для областей, удаленных от переходного слоя, происходит снижение этой величины примерно на 50 % в центре шва.

Рассмотрим возможные причины различного изменения начальной магнитной восприимчивости для различных участков сварного соединения. В рамках существующих представлений [5] начальная магнитная восприимчивость определя-

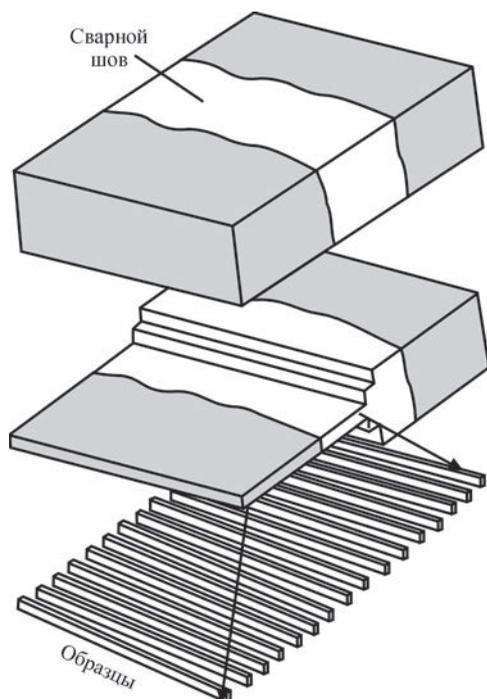


Рис. 1. Схема изготовления образцов из сварного соединения

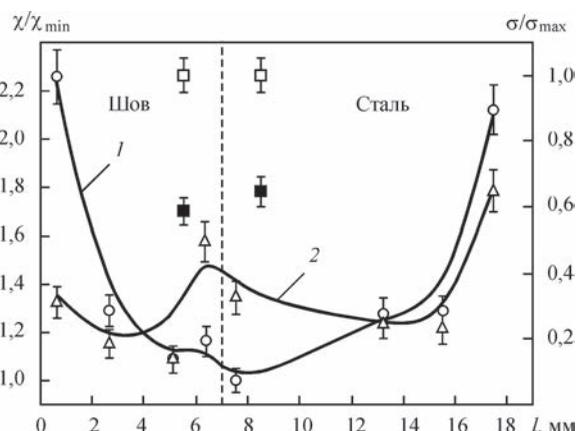


Рис. 2. Распределение приведенных значений начальной магнитной восприимчивости и микронапряжений (\square , \blacksquare) в сварном соединении: до магнитной обработки (1, \square) и после магнитной обработки (2, \blacksquare). χ_{\min} , σ_{\max} — минимальное и максимальное значения восприимчивости и микронапряжений, пунктир — граница шва

ется обратимыми малыми смещениями доменных границ в области слабых магнитных полей и зависит от распределения внутренних напряжений, соотношения концентрации различных магнитных фаз и ориентации намагниченности в кристалле. Наблюдаемый рост χ/χ_{\min} примерно в 2 раза соответствует снижению в той же мере средней амплитуды внутренних напряжений σ_i в силу соотношения $\chi \sim (\sigma_i \lambda_s)^{-1}$, где λ_s — константа магнитострикции [5].

Результаты рентгеновских исследований носительных изменений периода решетки позволяют судить о средней величине упругих деформаций и, соответственно, микронапряжений, в микрообъемах, связанных с характером дислокационного наклепа. Оказалось, что после магнитной обработки значения σ_{II} и D в шве на расстоянии до 2 мм от переходного слоя снизились от 650 до 380 МПа и от 0,13 до 0,083 мкм соответственно. На таком же расстоянии от переходного слоя в стали напряжения второго рода составляют 310 МПа, а размеры ОКР превышают верхнюю границу корректного определения D (около 2,5 мкм). Магнитная обработка привела к дроблению блоков ($D = 0,25$ мкм) и падению напряжений до 200 МПа. Таким образом, наблюдаемые в результате магнитной обработки изменения микронапряжений в зоне термического влияния на качественном уровне соответствуют изменениям начальной магнитной восприимчивости.

В центре сварного соединения в кристаллизовавшихся из расплава крупных зернах уровень внутренних напряжений будет существенно более низким и их изменение при магнитной обработ-

ке не может объяснить сильное уменьшение магнитной восприимчивости. В этом случае наиболее вероятно возникновение выраженной магнитной текстуры. На электронно-микроскопических изображениях участков вблизи границы шва (рис. 3, а, б) тонкие протяженные контуры классифицируются как области упругих изгибных деформаций решетки термического происхождения. Плотность таких образований в шве составляет $4 \cdot 10^8$ см⁻², что свидетельствует о высокой степени неоднородности напряженного состояния.

В результате магнитной обработки наблюдается генерация дислокаций в местах пиковых упругих напряжений и рассыпание дислокационных стенок с формированием хаотического ансамбля дислокаций, сходного со структурой отпуска (рис. 3, в, г). Подобное явление отмечается и в работе [6], где вследствие вибрационного воздействия снизились микронапряжения и увеличилась плотность дислокаций в пришовной зоне сварной стальной конструкции.

Остановимся на некоторых возможных механизмах изменения подвижности дислокаций и перемещения точечных дефектов в ходе магнитной обработки, вносящих взаимно дополняющие вклады в формирование полей напряжений. Магнитоупругие напряжения внутри доменной границы стали близки к значениям для железа $\sigma_m \approx 3$ МПа, такому условию соответствует движение дислокации, не закрепленной атомами примеси, под действием упругих деформаций внутри доменной границы [7]. Магнитостимулированный депиннинг (отрыв) участка дислокационной линии с атомов примеси предшествует элементарному акту микропла-

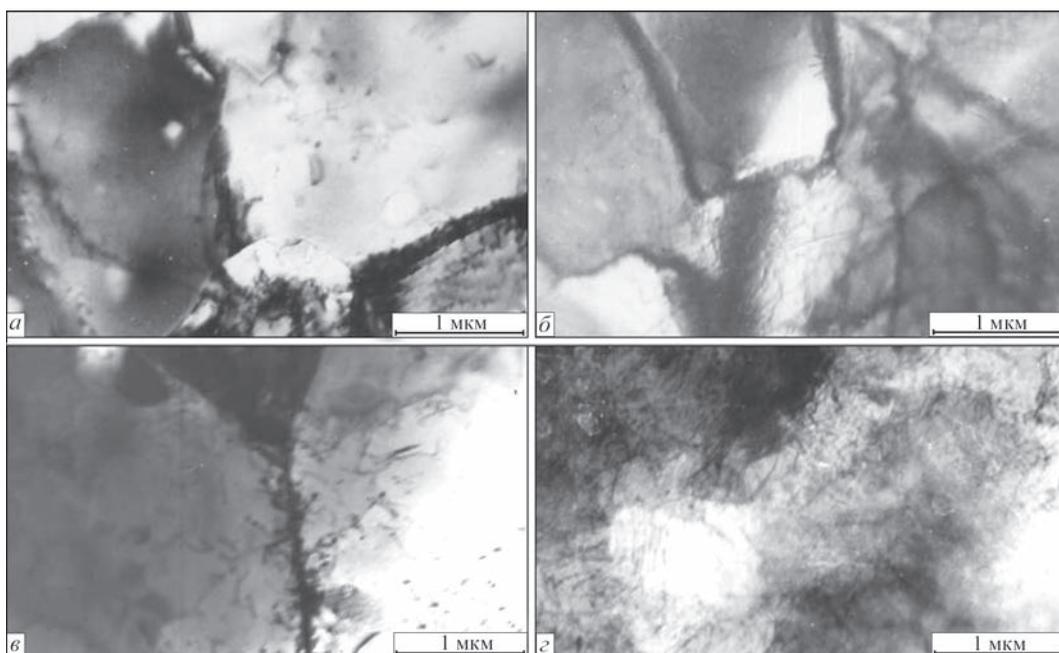


Рис. 3. Микроструктура сварного соединения стали 15X2НМФА до магнитной обработки (а, б) и после (в, г): а — сталь; б — шов

стической деформации. Концентрация примесей в сварном шве (3...4 мас. %) исключает возможность реализации контролирующего механизма деформации, связанного с преодолением дислокациями препятствий в виде примесных атомов или их скоплений. Известно, что существует возможность возникновения двойных перегибов при приложении внешних знакопеременных напряжений с амплитудой ниже напряжения Пайерлса [8]. Естественно предположить, что микродеформация материала будет контролироваться перемещением геометрических перегибов на краевых компонентах дислокаций. Движение перегиба вдоль дислокации под действием магнитоупругих волн в сочетании с внутренними напряжениями будет вызывать поперечное перемещение дислокационной линии.

Оценка магнитного вклада в свободную энергию, с использованием экспериментальных данных ($B \approx 0,1$ Т, $H \approx 40$ кА/м), показала, что ее величина близка к энергии магнитной анизотропии за счет устойчивого перемещения пар атомов внедрения и вакансий [9]. Направленное упорядочение точечных дефектов, по-видимому, является наиболее вероятным механизмом наведения магнитной анизотропии [10], что, в основном, ответственно за сильное изменение величины χ непосредственно в зоне шва.

В процессе магнитной обработки в поведении дислокаций и точечных дефектов в зоне термического влияния проявляются эффекты взаимовлияния и самосогласования. Суперпозиция динамических механизмов обуславливает развитие релаксационных процессов, диссипацию запасенной внутренней энергии, что приводит к необратимой перестройке дислокационной структуры и установлению более однородного распределения напряжений.

Список литературы

1. Махненко В. И., Григорьянц А. Г., Казимиров А. А. – Сварка в СССР. Т. 2: Теоретические основы сварки, прочности и проектирования. – М.: Наука, 1981. – С. 66–68.
2. Влияние магнитной обработки на механические характеристики и термические напряжения сварных соединений корпусной стали / И. М. Неклюдов и др. // Физика и химия обработки материалов. – 2011. – № 1. – С. 84–88.
3. Мицек А. И., Пушкарь В. Н. Реальные кристаллы с магнитным порядком. – Киев: Наукова думка, 1978. – 295 с.
4. Способ магнитной обработки изделий из магнитоупорядоченных металлических сплавов: пат. 94178; опубл. 11.04.2011.

5. Вонсовский С. В. Магнетизм. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
6. Релаксация остаточных напряжений металлов в поле упругих колебаний / Н. И. Носкова и др. // Проблемы прочности. – 1986. – № 9. – С. 67–72.
7. Мишин Д. Д. Магнитные материалы. – М.: Высшая школа, 1981. – 385 с.
8. Арсенюль Р. Дж. Микропластичность о.д.к. металлов и твердых растворов. Механизмы двойных переделов // Микропластичность. – М.: Металлургия, 1972. – С. 76–101.
9. Бернштейн М. Л. Термомагнитная обработка стали. – М.: Металлургия, 1968. – 95 с.
10. Лесник А. Г. Наведенная магнитная анизотропия. – Киев: Наукова думка, 1976. – 162 с.

К. А. Ющенко¹, О. В. Мац², І. М. Неклюдов²,
В. І. Соколенко², М. О. Черняк²

¹ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Національний науковий центр
«Харківський фізико-технічний інститут».

61108, м. Харків, вул. Академічна, 1.

E-mail: vsokol@kipt.kharkov.ua

ВПЛИВ ЗМІННОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ, СТРУКТУРУ І НАПРУЖЕНИЙ СТАН ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ КОРПУСНОЇ СТАЛІ

Раніше було встановлено, що обробка зварних з'єднань реакторної корпусної сталі 15X2НМФА змінним магнітним полем промислової частоти істотно покращує комплекс механічних властивостей в умовах одновісного розтягування, що супроводжується зниженням рівня термічної напруги в зоні зварного шва. Метою роботи було вивчення впливу магнітної обробки на магнітні характеристики, структуру, рівень і розподіл залишкової напруги в зварному з'єднанні. Зміни напружено-деформованого стану різних ділянок зварного з'єднання визначали за даними рентгеноструктурних і електронно-мікроскопічних досліджень. Показано, що в результаті дії змінного магнітного поля відбувається зниження рівня мікронапруг в перехідному шарі та вирівнювання спектру цієї напруги по усій області термічного впливу. Відмічена кореляція змін початкової магнітної сприйнятливості і мікронапруг в перехідному шарі і формування вираженої магнітної текстури в центральній частині шва. Розглянуто механізми змін магнітних властивостей і структури при магнітній обробці зварного з'єднання, пов'язаних з активацією пластичних мікродвигів і перерозподілу дефектів. Приведений спосіб магнітної обробки можливо розглядати як магнітний відпуск, що забезпечує зростання однорідності напружено-деформованого стану зварних з'єднань, що сприяє зростанню їх стійкості до зародження та розповсюдження тріщин. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: зварне з'єднання, корпусна сталь, магнітна обробка, структура, внутрішня напруга

Поступила в редакцію 21.02.2017