

УДК 620.179.1

DOI: 10.37890/jwt.vi75.382

Влияние пластической деформации на структуру и свойства стали 20ХГСА, полученной методом аддитивного электродугового выращивания

А.А. Хлыбов¹

Д.А. Рябов¹

А.А. Соловьев¹

М.С. Аносов¹

Ю.И. Матвеев²

¹*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия*

²*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния степени деформации при одноосном растяжении на структуру и физико-механические свойства стали 20ХГСА, полученной методом 3D-печати электродуговой наплавкой.

Показано, что аддитивные технологии производства материалов и изделий получили широкое распространение. В частности, технологии электродугового выращивания (WAAM метод) представляют особый интерес. Несомненным достоинством метода WAAM является относительно малая стоимость оборудования и наплавляемого материала (в сравнении с лазерным или электронно-лучевым оборудованием), а также возможность получения крупногабаритных заготовок с наименьшим количеством дефектов. Проведен сравнительный анализ влияния направления наплавки на свойства образцов при механических испытаниях. Установлено, что деструктуризация материала происходит более интенсивно в образце, вырезанном перпендикулярно направлению наплавки. Предложены неразрушающие способы оценки деформированного состояния стали 20ХГСА при одноосном растяжении. Показано, что одним из наиболее чувствительных неразрушающих методов оценки деформированного состояния металлических материалов является ультразвуковой эхо-импульсный метод контроля, который является полезным количественным инструментом для контроля состояния материала благодаря своей простоте и надежности. Высокой чувствительностью к деформациям обладает магнитный метод контроля. Показана зависимость магнитных свойств металлов (в частности, коэрцитивной силы H_c) от степени деформации материала.

Ключевые слова: 3D-печать металлами, микроструктура, ультразвуковой контроль, магнитный контроль, деформация.

The effect of plastic deformation on the structure and properties of 20CRMNSI steel obtained by additive electric arc cultivation

A.A. Khlybov¹

D.A. Ryabov¹

A.A. Solovyov¹

M.S. Anosov¹

Yu.I. Matveev²

¹*Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseeva, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The paper presents the results of a study of the influence of the degree of deformation under uniaxial tension on the structure and physico-mechanical properties of

20KHGSA steel obtained by 3D printing by electric arc surfacing. It is shown that additive technologies for the production of materials and products have become widespread. In particular, the technologies of electric arc cultivation (WAAM method) are of particular interest. The undoubted advantage of the WAAM method is the relatively low cost of equipment and surfaced material (in comparison with laser or electron beam equipment), as well as the possibility of obtaining large-sized blanks with the least number of defects. A comparative analysis of the influence of the direction of surfacing on the properties of samples during mechanical tests is carried out. It is established that the destruction of the material occurs more intensively in the sample cut perpendicular to the direction of surfacing. Non-destructive methods for estimating the deformed state of 20KHGSA steel under uniaxial tension are proposed. It is shown that one of the most sensitive non-destructive methods for assessing the deformed state of metallic materials is the ultrasonic echo-pulse control method, which is a useful quantitative tool for monitoring the state of the material due to its simplicity and reliability. The magnetic control method has a high sensitivity to deformations. The dependence of the magnetic properties of metals (in particular, the coercive force H_c) on the degree of deformation of the material is shown.

Keywords: 3D printing with metals, microstructure, ultrasonic inspection, magnetic inspection, deformation.

Введение

В настоящее время активно развиваются экспериментальные и промышленные аддитивные технологии производства материалов и изделий [1-4]. Среди существующих вариантов аддитивных технологий электродуговое выращивание (WAAM метод) представляет особый интерес [3, 4]. Это обусловлено уникальными технологическими возможностями получения заготовок сложных форм и возможностью восстанавливать изношенные компоненты конструкций [5].

Выращивание металлических слоев и изготовление объемных деталей различной геометрической формы осуществляется за счет наплавления проволоки [3]. Несомненным достоинством метода WAAM является относительно малая стоимость оборудования и наплавляемого материала (в сравнении с лазерным или электронно-лучевым оборудованием), а также возможность получения крупногабаритных заготовок с наименьшим количеством дефектов [6].

Несмотря на наличие большого количества исследований, посвящённых технологиям WAAM производства, структура и физико-механические свойства различных конструкционных материалов изучены недостаточно. В частности, нет достоверных сведений о влиянии пластической деформации на структуру и механические свойства получаемых изделий из стали 20ХГСА. Выбор данной стали связан с ее широким применением в машиностроении.

Известно, что одним из наиболее чувствительных неразрушающих методов оценки деформированного состояния металлических материалов является ультразвуковой эхо-импульсный метод контроля, который является полезным количественным инструментом для контроля состояния материала [7, 8] благодаря своей простоте и надежности. Высокой чувствительностью к деформациям обладает также магнитный метод контроля. Зависимость магнитных свойств металлов (в частности, коэрцитивной силы H_c) от степени деформации материала была показана в ряде работ [9, 10, 11, 12] и признана надежным и информативным методом контроля состояния материала. Именно поэтому в качестве информативных параметров в настоящей работе были выбраны ультразвуковой и магнитный методы контроля.

Для оценки повреждения поверхности целесообразно использовать металлографический метод, поскольку он позволяет непосредственно наблюдать изменения микроструктуры, которые можно оценить количественно [13, 14].

Материалы и методы исследования

В качестве материала для исследования была выбрана конструкционная сталь 20ХГСА. Химический состав данного сплава приведен в табл. 1. Образцы для исследования были получены на специальном стенде для 3D-печати электродуговой наплавкой на станке с ЧПУ в среде защитного газа (20% Ar + 80% CO₂) [15].

Таблица 1

Химический состав стали 20ХГСА, мас. %

Марка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
20ХГСА	0,21	0,85	0,78	0,02	0,01	0,89	0,01	0,1	ост.

Для оценки влияния направления наплавки на свойства стали 20ХГСА из выращенной стенки вырезали пропорциональные плоские образцы с сечением 10x5 мм для испытаний на растяжение (ГОСТ 1497-84) вдоль и поперек направления наплавки. Растяжение образцов проводили на разрывной силовой машине УМЭ-10ТМ, оборудованной цифровыми интеллектуальными датчиками силы и перемещения от ZETLAB, при скорости нагружения 5 мм/мин при T = 20°C.

Растяжение исследуемых образцов проводили в несколько этапов. Каждый этап включал в себя растяжение образца до заданного значения деформации. После деформирования образцы подвергали изучению, используя различные методы контроля (исследование микроструктуры с привязкой по геометрии зоны контроля, измерение микротвердости, ультразвуковой и магнитный контроль).

В точке проведения контроля микроструктуры после каждого этапа нагружения измеряли скорости распространения упругих волн в м/с по формуле (1).

$$C_i = \frac{2h}{\tau_i}, \quad (1)$$

где h – толщина образца, м; τ_i – время распространения ультразвуковых импульсов, с.

Для измерения времени распространения ультразвуковых (УЗ) импульсов использовался акустический измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) «АСТРОН». Для измерения использовались сдвиговые и продольные с частотой 5 МГц, а также волны Рэлея с частотой 5 МГц.

По полученным скоростям распространения УЗ волн рассчитывался акустический диагностический параметр Dc (формула (2)), который используется для оценки степени структурной деградации материала [11, 16, 17]:

$$Dc = \frac{C_t^{\parallel} + C_t^{\perp}}{C_l}, \quad (2)$$

где C_t^{\parallel} , м/с – скорость распространения сдвиговой волны с поляризацией вдоль образца; C_t^{\perp} , м/с – скорость распространения сдвиговой волны с поляризацией поперек образца; C_l , м/с – скорость распространения продольной волны.

Использование параметра Dc позволяет исключать из исследования толщину контролируемого материала, что является особенно актуальным при проведении измерений на конструкциях, где измерение толщины невозможно.

Для описания анизотропии упругих свойств образцов в процессе поэтапного пластического деформирования пользовались параметром, величина которого определяется с помощью объемных ультразвуковых волн, формула (3):

$$A = \frac{2(C_t^{\parallel} - C_t^{\perp})}{(C_t^{\parallel} + C_t^{\perp})} \quad (3)$$

Использование параметра акустической анизотропии также позволяет исключить из исследования толщину образцов.

Для определения величины коэрцитивной силы H_c использовали магнитный анализатор МА-412ММ. База для измерений, соответствующая расстоянию между контактными площадками – 30 мм. Измерения проводили не менее 5 раз с точной геометрической привязкой к исследуемой зоне.

В качестве информационного параметра структурной деградации также использовали микротвердость. Измерения проводили на микротвердомере ИТВ-1-АМ при нагрузке 1 кгс.

Металлографический анализ образцов проводили по стандартной схеме: шлифовка, полировка и последующее травление в 4%-ом растворе азотной кислоты в течение 10-15 с. Изображения микроструктур после каждого этапа деформирования получали с применением оптического металлографического микроскопа «KEYENCE VHX-1000».

Экспериментальные исследования. Анализ экспериментальных исследований.

По результатам статических механических испытаний были определены значения прочностных и пластических характеристик исследуемого материала (табл. 2).

Таблица 2

Значения прочностных и пластических характеристик исследуемого материала

Направление вырезки	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
Вдоль	26,5	481	699
Поперек	21,4	451	678

После определения основных механических характеристик было проведено испытание на поэтапное одноосное растяжение. По результатам эксперимента была получена зависимость предела текучести исследуемых образцов от степени деформации (рис. 1).

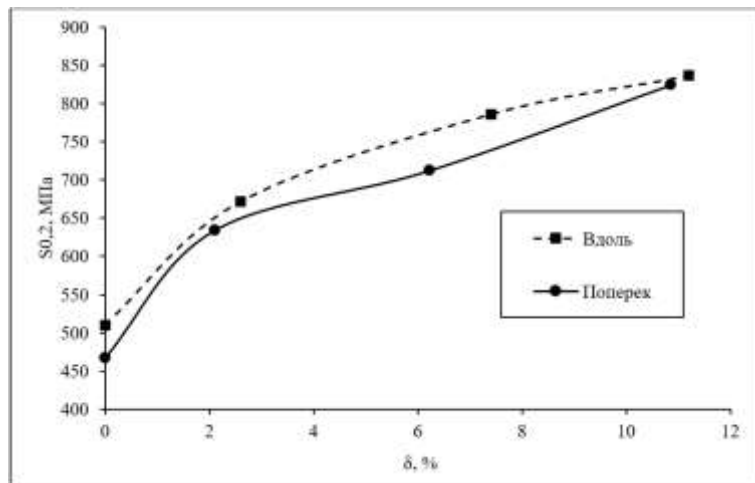


Рис. 1. Зависимость предела текучести при растяжении от значений относительного удлинения

Эксперимент показал, что образец, полученный путем 3D-печати и вырезанный в продольном направлении относительно наплавки имеет большее значение предела текучести ($S_{0,2}$) и деформируется на большую величину (δ) по сравнению с образцом, вырезанным поперек направления наплавки.

Эволюция микроструктуры образцов, полученных методом WAAM из стали 20ХГ и вырезанных вдоль и поперек направления наплавки, представлены на рис. 2 и рис. 3 соответственно.

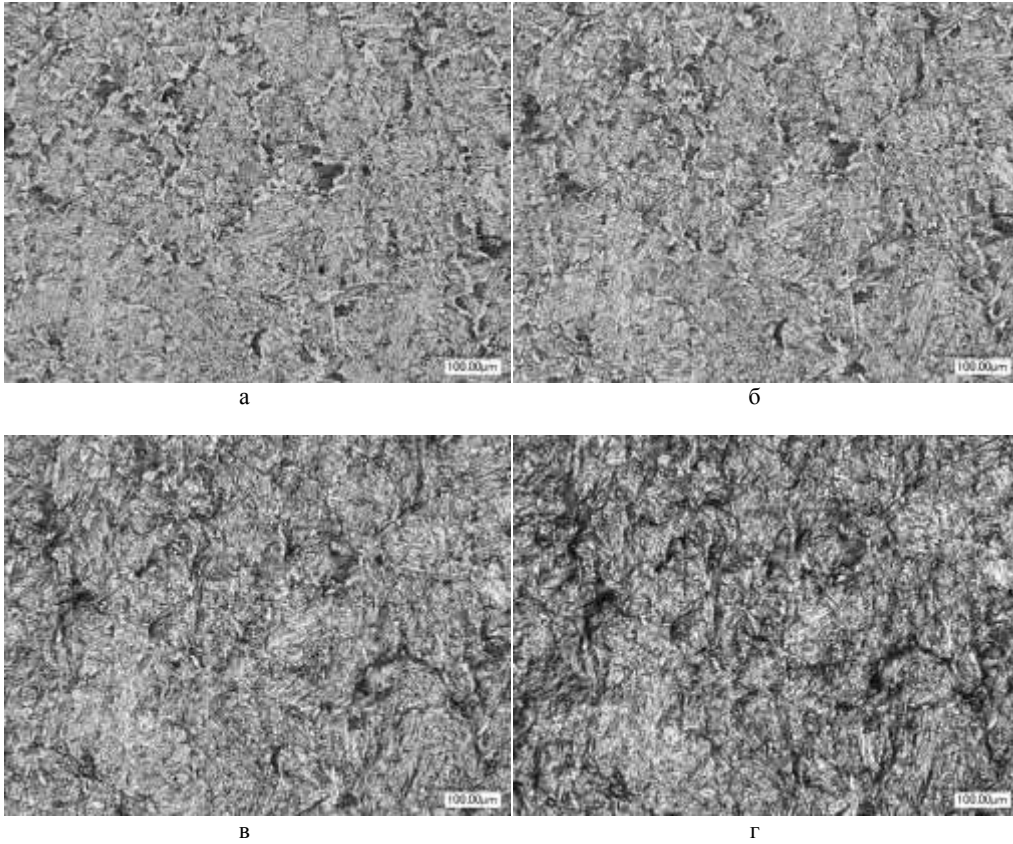
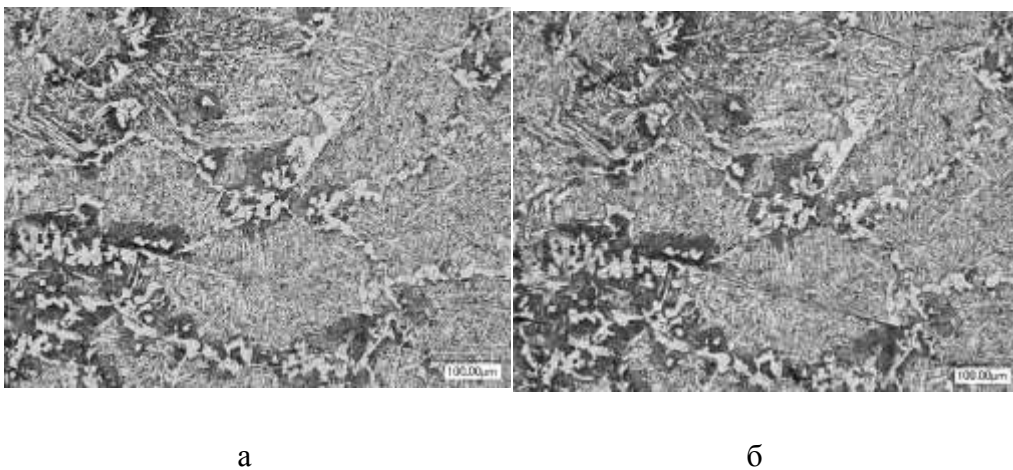
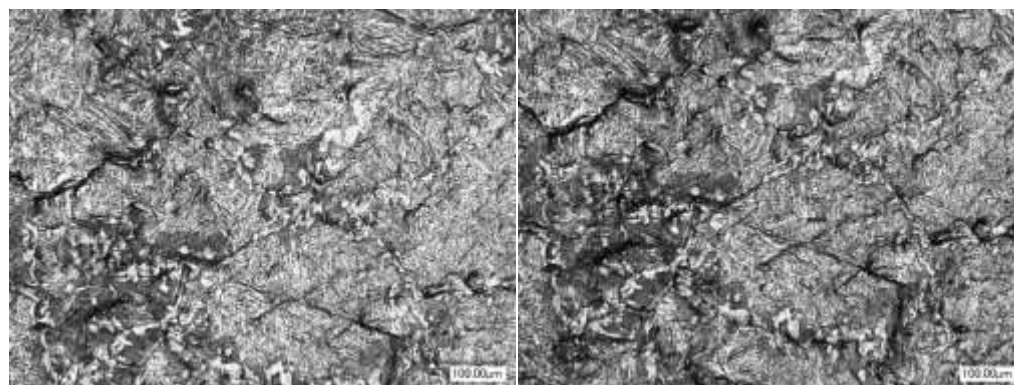


Рис. 2. Структурные изменения продольно-вырезанного образца из стали 20ХГСА в процессе поэтапного растяжения (x500):

а – относительное удлинение 0%; б – относительное удлинение 2,6%; в – относительное удлинение 7,4%; г – относительное удлинение 11,2





В

Г

Рис. 3. Структурные изменения поперечно-вырезанного образца из стали 20ХГСА в процессе поэтапного растяжения (x500):

а – относительное удлинение 0%; б – относительное удлинение 2,1; в – относительное удлинение 6,23%; г – относительное удлинение 10,86%

Анализ представленных микроструктур после поэтапного растяжения показал, что уже на начальных этапах деформирования наблюдается появление большого количества устойчивых полос скольжения в отдельных зернах феррита в виде тонких линий. При пластической деформации энергия расходуется не только на накопление микродефектов, но и на формирование текстуры деформации, то есть происходит стесненный поворот и фрагментация зерен. Вдоль грубых полос скольжения, представляющих собой экструзии, образуются интрузии – микротрещины, которые являются источником макротрещин, образующихся на поверхности и в приповерхностном слое порядка нескольких размеров зерен, что особенно заметно на образце, вырезанном поперек направления наплавки (рис. 3в, г).

В ходе исследования был проведен анализ микротвердости образцов из стали 20ХГСА, полученных методом WAAM. Результаты замеров приведены на рис. 4.

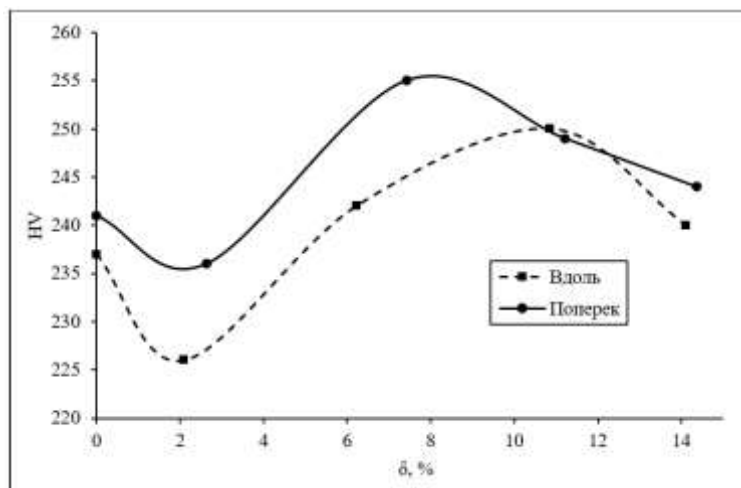


Рис. 4. Зависимость микротвердости образцов из стали 20ХГСА от степени деформации

В ходе эксперимента было установлено, что микротвердость образцов, вырезанных вдоль и поперек направления наплавки, изменяется схожим образом. Снижение твердости на начальных этапах деформирования связано с компенсацией сжимающих структурных и термических напряжений, которые возникли при наплавке образцов по методу WAAM. Дальнейшее увеличение твердости связано с интенсификацией деформационных процессов (значительный наклеп и повышение плотности дислокаций). При достижении степени деформации свыше 8% для образца, вырезанного поперек направления наплавки, наблюдается монотонное снижение микротвердости, что говорит о начале разрушения материала образца. Начинают образовываться и развиваться системы микротрещин, которые приводят к скоплению несплошностей. При увеличении степени деформации несплошности начинают сливаться, что приводит к образованию макротрещин в объеме материала, что хорошо согласуется с микроструктурными исследованиями. Образец, вырезанный вдоль направления наплавки, ведет себя схожим образом. Микротвердость начинает снижаться при достижении степени деформации свыше 10%.

В результате исследований была установлена связь между параметрами ультразвуковых волн и степени деформации образцов из стали 20ХГ, полученных методом WAAM. Зависимость акустического параметра D_c от степени деформации образцов из стали 20ХГСА, вырезанных вдоль и поперек направления наплавки, представлена на рис. 5.

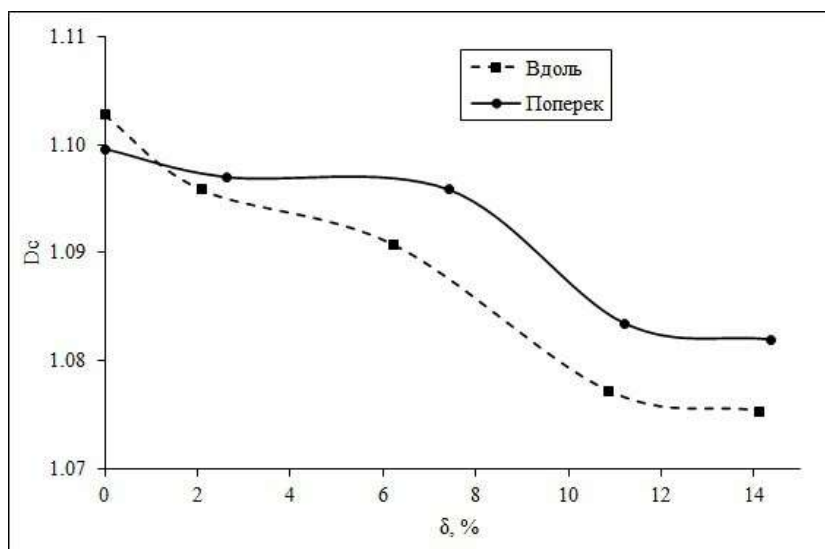


Рис. 5. Зависимость акустического параметра D_c от степени деформации образцов, изготовленных по методу WAAM

Анализируя приведенную зависимость акустического параметра D_c , можно сделать вывод, что при статическом нагружении образцов, вырезанных вдоль и поперек направления наплавки из стали 20ХГСА, наблюдается две стадии изменения значений D_c . До степени деформации $\sim 11\%$ наблюдается снижение значений акустического параметра для обоих образцов. При этом для образца, вырезанного поперек направления наплавки, снижение D_c происходит более монотонно. Снижение параметра обусловлено интенсификацией появления и слиянием структурных дефектов. Такое поведение связано с развитием систем микротрещин при статическом нагружении образцов из стали 20ХГСА, что приводит к снижению скоростей упругих волн и параметр D_c начинает снижаться.

На рис. 6 представлена зависимость параметра акустической анизотропии A от степени деформации образцов из стали 20ХГСА.

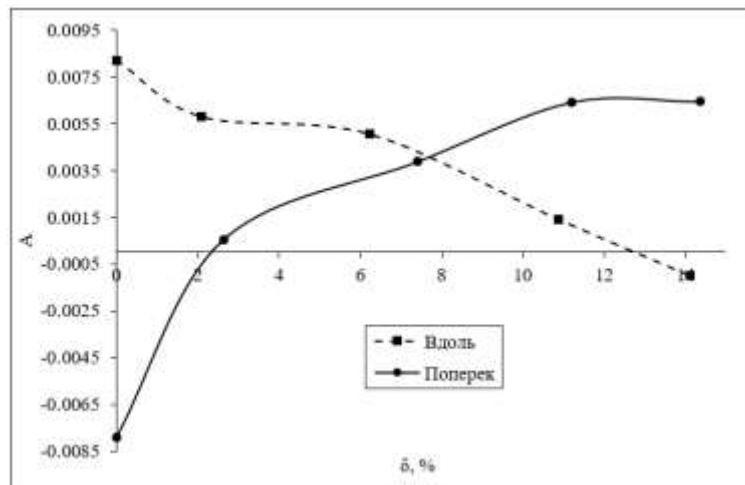


Рис. 6. Зависимость параметра акустической анизотропии от степени деформации образцов, изготовленных по методу WAAM

Полученная зависимость отражает чувствительность параметра акустической анизотропии к направлению наплавки образцов из стали 20ХГСА. При увеличении степени деформации образца, вырезанного поперек направления наплавки, происходит рост значений акустического параметра. Известно, что изменение параметра A связано с изменением кристаллографической текстуры в процессе деформирования. При одноосном растяжении наблюдается фрагментация и стесненный поворот зерен относительно приложенной нагрузки, что приводит к росту значений акустического параметра. При растяжении образца, вырезанного вдоль направления наплавки, наблюдается монотонное снижение параметра акустической анизотропии. Образование преимущественно ориентированных дефектов приводит к уменьшению параметра акустической анизотропии.

Рассмотрим влияние пластической деформации на коэрцитивную силу H_c образцов из стали 20ХГСА, вырезанных вдоль и поперек направления наплавки. Как видно на рис. 7, коэрцитивная сила образца, вырезанного вдоль направления наплавки, возрастает с увеличением степени деформации. Возрастание значений коэрцитивной силы H_c характеризуется затруднением протекания процесса намагничивания и перемагничивания. Причинами возрастания значений H_c являются повышение степени искаженности кристаллической решетки при поэтапном растяжении, а также явления наклепа, сопровождающегося увеличением плотности дефектов с более высокими значениями критических полей взаимодействия доменных границ с дефектами структуры сплава.

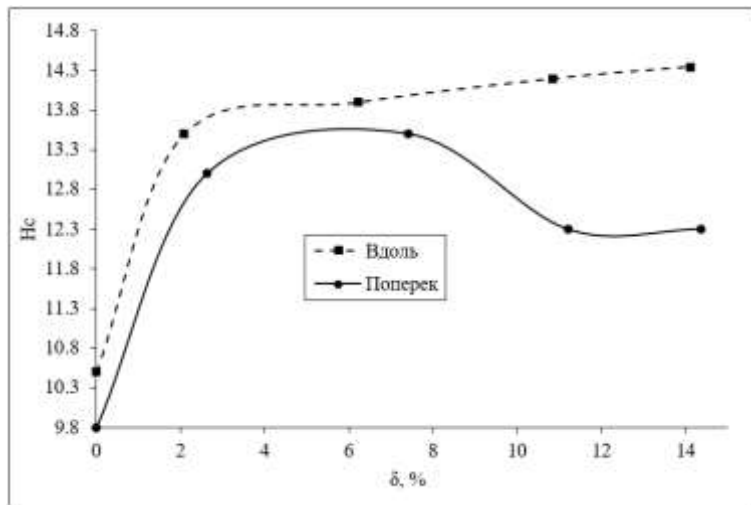


Рис. 7. Зависимость коэрцитивной Зависимость образцов из стали 20ХГСА, вырезанных вдоль и поперек направления наплавки

Коэрцитивная сила образца, вырезанного поперек направления наплавки до степени деформации ~6%, также возрастает по причинам, описанным выше. Однако дальнейшее увеличение степени деформации приводит к снижению значений коэрцитивной силы Hc. Это объясняется тем, что увеличение степени деформации в объеме материала приводит к образованию большого количества макротрещин, наступает разрушение образца и значение коэрцитивной силы снижаются.

Зависимость времени распространения рэлеевских (поверхностных) волн от степени деформации образцов стали 20ХГСА, вырезанных вдоль и поперек направления наплавки, представлена на рис. 8.

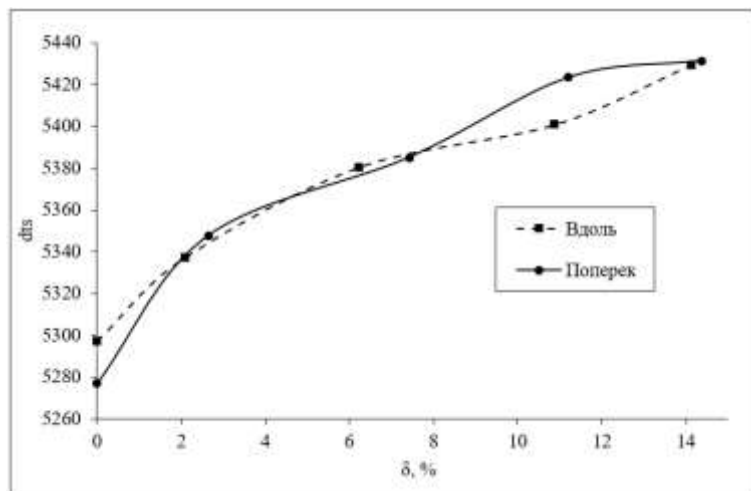


Рис. 8. Зависимость времени распространения рэлеевских волн от степени деформации образцов, изготовленных по методу WAAM

Описанная на рис. 8 зависимость характеризует чувствительность распространяющейся в образцах из стали 20ХГСА поверхностной волны к увеличению степени деформации. Повышение уровня структурных несовершенств (фрагментация и стесненный поворот зерен, микротрещины, рыхлости) приводит к

увеличению времени распространения акустического импульса в исследуемых поверхностных слоях. Изменение времени распространения такого типа волн в образцах из стали 20ХГСА, полученных по методу WAAM после поэтапного деформирования свидетельствует о возможности их применения для оценки и прогнозирования ресурса деталей и конструкций, изготовленных с помощью аддитивных технологий.

Таким образом, структурочувствительные акустические параметры D_s , A и распространяющаяся в приповерхностном слое рэлеевская волна, а также значения коэрцитивной силы H_c могут быть применены в задачах диагностики преждевременного разрушения и мониторинга наиболее нагруженных зон конструкций из стали 20ХГСА, полученной методом WAAM.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-19-00332-П «Разработка научно-обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в Арктических условиях»

Список литературы

1. Herzog D., Additive manufacturing of metals / D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann // *Acta Mater.* – 2016. – Vol. 117. pp. 371-392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
2. Жуков В.В., Аддитивное производство металлических изделий (обзор) / В.В. Жуков, Г.М. Григоренко, В.А. Шаповалов // *Автоматическая сварка.* – 2016. – № 5-6. – С. 148-153.
3. Wu B., A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement / B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, J. Xu, J. Norrish // *J. Manuf. Process.* – 2018. – Vol. 35. – Pp. 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>
4. Ding D., Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests / D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2015. – Vol. 81. Pp. 465-481. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
5. Исследование влияния режимов 3D-печати на структуру и хладостойкость стали 08Г2С / Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Рябов Д.А., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Киселев А.В. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* – 2021. – №4. – С. 64-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70>
6. Ron T., Environmental behavior of low carbon steel produced by a wire arc additive manufacturing process / T. Ron, G.K. Levy, O. Dolev, A. Leon, A. Shirizly, E. Aghion. *Metals.* – 2019. – Vol. 9. Pp. 888-900. <https://doi.org/10.3390/met9080888>
7. Szelążek J., New samples with artificial voids for ultrasonic investigation of material damage due to creep / J. Szelążek, S. Mackiewicz, Z. Kowalewski // *NDT & E Int.* – 2009. – Vol. 42. – Is. 2. Pp. 150-156. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.11.004>
8. Makowska K., Prediction of the mechanical properties of P91 steel by means of magneto-acoustic emission and acoustic birefringence / K. Makowska, L. Piotrowski, Z.L. Kowalewski // *Nondestruct. Journal of Nondestructive Evaluation.* – 2017. – Vol. 36. – Is. 2. Pp. 36-43. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0421-9>
9. Новиков В.Ф., Зависимость коэрцитивной силы малоуглеродистых сталей от одноосных напряжений / В.Ф. Новиков, Т.А. Яценко, М.С. Бахарев // *Дефектоскопия.* – 2001. – №11. – С. 51-57.
10. Изменение магнитных свойств метастабильной аустенитной стали при упругопластическом деформировании / Э.С. Горкунов, С.М. Задворкин, С.Ю. Митропольская, Д.И. Вичужанин, К.Е. Соловьев // *МиТОМ.* – 2009. – №9. – С. 15-21.
11. Мисухин С.А., Об использовании коэрцитивной силы в качестве индикаторного параметра при неразрушающем контроле механических напряжений / С.А. Мисухин, В.Ф. Новиков, В.Н. Борисенко // *Дефектоскопия.* – 1987. – №9. – С. 57-60.

12. Бида Г.В., Влияние упругой деформации на магнитные свойства сталей с различной структурой / Г.В. Бида, В.Г. Кулеев // Дефектоскопия. – 1998. – № 11. – С. 12-26.
13. Gonchar A.V., Estimation of structural degradation of the heat affected zone of the welded joint under fatigue / A.V. Gonchar, M.S. Anosov, D.A. Ryabov // Russ. J. Nondestruct. – 2022. – Vol. 58. – Is. 9. Pp. 790-799. <https://doi.org/10.1134/S1061830922090066>
14. Danilov V.A., On the quantitative assessment of corrosion damages of aluminium at the early stages using confocal laser scanning microscopy / V.A. Danilov, D.L. Merson // Lett. Mater. – 2022. – Vol. 12. – Is. 3. Pp. 261-265. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2022-3-261-265>
15. Kabaldin Y.G., Microstructure, phase composition and mechanical properties of a layered bimetallic composite ER70S-6-ER309LSI obtained by the WAAM method / Y.G. Kabaldin, D.A. Shatagin, D.A. Ryabov, A.A. Solovyov, A.A. Kurkin // Metals. – 2023. – Vol. 13. – Is. 5. Pp. 818-851. <https://doi.org/10.3390/met13050851>
16. Кабалдин Ю. Г., Оценка влияния термической обработки на параметры структуры и хладостойкость металлов, полученных аддитивным электродуговым выращиванием/ Кабалдин Ю. Г., Аносов М.С., Рябов Д. А., Шатагин Д. А., Хлыбов А.А., Матвеев Ю. И.// Вестник ВГАВТ Научные проблемы водного транспорта, - 2022. -№70, С.30-38
17. Хлыбов А. А., Исследование связи скорости ультразвука в металлах с их ударной вязкостью и твердостью в условиях пониженных температур/ Хлыбов А. А., Кабалдин Ю. Г., Рябов Д. А., Матвеев Ю. И.// Вестник ВГАВТ Научные проблемы водного транспорта, - 2020. -№65, С.60-67

References

1. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. “Additive manufacturing of metals” Acta Mater 117 (2016): 371-392 <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
2. ZHukov V.V., Grigorenko G.M., SHapovalov V.A. “Additivnoe proizvodstvo metallicheskih izdelij (obzor)” Avtomaticheskaya svarka 5-6 (2016): 148-153.
3. Wu B., Pan Z., Ding D., Cuiuri D., Li H., Xu J., Norrish J. “A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement” J. Manuf. Process 35 (2018): 127-139 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>
4. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. “Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests” Int. J. Adv. Manuf. Technol 81 (2015): 465-481 <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
5. Yu.G. Kabaldin, M.S. Anosov, D.A. Ryabov, P.V. Kolchin, D.A. SHatagin, A.V. Kiselev. “Issledovanie vliyaniya rezhimov 3D-pechati na strukturu i hladostojkost' stali 08G2S” Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova 4 (2021): 64-70 <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70>
6. Ron T., Levy G.K., Dolev O., Leon A., Shirizly A., Aghion E. “Environmental behavior of low carbon steel produced by a wire arc additive manufacturing process” Metals 9 (2019): 888-900 <https://doi.org/10.3390/met9080888>
7. Szelażek J., Mackiewicz S., Kowalewski Z. “New samples with artificial voids for ultrasonic investigation of material damage due to creep” NDT & E Int 42/2 (2009): 150-156 <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.11.004>
8. Makowska K., Piotrowski L., Kowalewski Z.L. “Prediction of the mechanical properties of P91 steel by means of magneto-acoustic emission and acoustic birefringence” Nondestruct. Journal of Nondestructive Evaluation 36/2 (2017): 36-43 <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0421-9>
9. Novikov V.F., YAcenko T.A., Baharev M.S. “Zavisimost' koercitivnoj sily malouglerodistyh stalej ot odnoosnyh napryazhenij” Defektoskopiya 11 (2001): 51-57.
10. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Mitropol'skaya S.Yu., Vichuzhanin D.I., Solov'ev K.E. “Izmenenie magnitnyh svojstv metastabil'noj austenitnoj stali pri uprugoplasticheskom deformirovanii” MiTOM 9 (2009): 15-21.
11. Misuhin S.A., Novikov V.F., Borisenko V.N. “Ob ispol'zovanii koercitivnoj sily v kachestve indikatornogo parametra pri nerazrushayushchem kontrole mekhanicheskikh napryazhenij” Defektoskopiya 9 (1987): 57-60.
12. Bida G.V., Kuleev V.G. “Vliyanie uprugoj deformacii na magnitnye svojstva stalej s razlichnoj strukturoj” Defektoskopiya 11 (1998): 12-26.

13. Gonchar A.V., Anosov M.S., Ryabov D.A. "Estimation of structural degradation of the heat affected zone of the welded joint under fatigue" Russ. J. Nondestruct 58/9 (2022): 790-799 <https://doi.org/10.1134/S1061830922090066>
14. Danilov V.A., Merson D.L. "On the quantitative assessment of corrosion damages of aluminium at the early stages using confocal laser scanning microscopy" Lett. Mater 12/3 (2022): 261-265 <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2022-3-261-265>
15. Y.G. Kabaldin, D.A. Shatagin, D.A. Ryabov, A.A. Solovyov, A.A. Kurkin "Microstructure, phase composition and mechanical properties of a layered bimetallic composite ER70S-6-ER309LSI obtained by the WAAM method" Metals 13/5 (2023): 818-851 <https://doi.org/10.3390/met13050851>
16. Kabaldin Yu. G., Assessment of the effect of heat treatment on the structure parameters and cold resistance of metals obtained by additive electric arc cultivation/ Kabaldin Yu. G., Anosov M.S., Ryabov D. A., Shatagin D. A., Khlybov A.A., Matveev Yu. I.// Vestnik VGAVT Scientific problems of water transport, - 2022. -No.70, pp.30-38
17. Khlybov A. A., Investigation of the relationship of ultrasound velocity in metals with their toughness and hardness at low temperatures/ Khlybov A. A., Kobaldin Yu. G., Ryabov D. A., Matveev Yu. I.// Vestnik VGAVT Scientific problems of water transport, - 2020. -No.65, pp.60-67

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Анатольевич Хлыбов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: hlybov_52@mail.ru

Дмитрий Александрович Рябов, ассистент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: riabov.da@nntu.ru

Александр Александрович Соловьев, техник кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: solovev.aa@nntu.ru

Максим Сергеевич Аносов, к.т.н., доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: anosov-maksim@list.ru

Юрий Иванович Матвеев, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатации судовых энергетических установок», Волжский государственный университет водного

Alexander A. Khlybov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950

Dmitry A. Ryabov, Assistant of the Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950

Alexander A. Solovyov, Technician of the Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950

Maksim S. Anosov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment for Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950

Yuri I. Matveev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Operation of Ship Power Plants, Volga State University of

транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Water Transport, 603951
Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail:
matveeveseu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03.05.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.
Received 03.05.2023; published online 20.06.2023.