

Received: 15.10.2018

Revised: 07.11.2018

Accepted: 14.12.2018

DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.136-148

STUDYING THE EFFECT OF PLASTIC DEFORMATION ON THE MECHANICAL AND MAGNETIC CHARACTERISTICS OF HIGH-STRENGTH BIMETAL MATERIALS INTENDED FOR USE IN THE ARCTIC CLIMATE

E. A. Putilova^{a)*}, S. M. Zadvorkin^{b)}, E. S. Gorkunov^{c)}, and A. N. Mushnikov^{d)}

*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation*

- a)  <https://orcid.org/0000-0002-8508-8413>  tuevaevgenya@mail.ru;
b)  <https://orcid.org/0000-0002-7918-8207>  zadvorkin@imach.uran.ru;
c)  <https://orcid.org/0000-0003-1820-2746>  ges@imach.uran.ru;
d)  <https://orcid.org/0000-0001-7073-6476>  mushnikov@imach.uran.ru

*Corresponding author. E-mail: tuevaevgenya@mail.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russian Federation
Tel.: +7 (343) 362 30 29

The paper presents the results of investigation of the mechanical and magnetic properties of bimetal high-strength materials, produced by explosion welding and operating under arctic climate conditions, depending on the magnitude of cold rolling reduction. The main layer in the materials is made of the 15KhN4MDF high-strength steel and the clad layers are constituted by two different corrosion-resistant steels, 08Kh18N10 and 04Kh20N6G11M2AFB, with different austenite stabilities. Cold rolling with different reduction ratios is performed in order to simulate the effect of plastic deformation on the properties of high-strength bimetal materials and to estimate the applicability of nondestructive magnetic methods to the diagnostics of the state of such materials, as well as of their individual constituents. The mechanical and magnetic properties of the constituents (the hull steel and the corrosion-resistant steels with different austenite stabilities) are compared with those of the bimetals. It is reported that the values of microhardness near the welded joint increase in all the bimetals under investigation. The dependences of the strength characteristics on the values of the reduction ratio have been obtained. Informative magnetic parameters, uniquely varying with an increase in the rolling ratio, have been established. These parameters could later be used to develop nondestructive methods of testing the state of bimetallic materials under operation.

Keywords: clad steel, explosion welding, bimetal, strength, corrosion resistance, magnetic properties, differential magnetic permeability.

Acknowledgment

The work was financially supported by the RFBR, grant No. 16-38-60027. The equipment of the Plastometriya collective use center was used in the research.

References

1. Kalinin G.Yu., Mushnikova S.Yu., Fomina O.V., Kharkov O.A. Two-layered clad steel with elevated corrosion-erosion resistance. In: *V Mezhdunarodnaya konferentsiya-shkola po khimicheskoy tekhnologii* [The 5th International Conference on Chemical Technology ICCT'16: proceedings of the satellite conference of the 20th Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: in 3 volumes]. Volgograd, Volgogradskiy Gosudarstvennyi Tekhnicheskiy Universitet Publ., 2016, pp. 231–232. (In Russian).

2. Oryshchenko A.S., Malyshevsky V.A., Khlusova E.I. Modern structural steels for the Arctic. *Sudostroenie*, 2013, no. 3, pp. 46–49. (In Russian).
3. Khlusova E.I. Modern advances in the creation of cold-resistant structural steels for the Arctic applications. In: *Nauchno-tekhnicheskii progress v chernoy metallurgii* [Scientific and Technical Progress in the Steel Industry: Proceedings of the 2nd International Scientific and Technical Conference]. Cherepovets, Cherepovetskiy Gosudarstvennyi Universitet Publ., 2015, pp. 18–20. (In Russian).
4. Chernyshov E.A., Romanov A.D., Romanova E.A. High-strength shipbuilding steels and alloys. *Metallurg*, 2016, no. 2, pp. 59–63. (In Russian).
5. Sagaradze V.V., Kataeva N.V., Mushnikova S.Yu., Kalinin G.Yu., Kharkov O.A., Kostin S.K., Parmenova O.N. Structure and properties of two-layer steel used for Arctic vessels' hulls building. *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 7, iss. 6, pp 815–823. DOI: 10.1134/S2075113316060198.
6. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Povolotskaya A.M., Goruleva L.S., Veretennikova I.A., Kamantsev I.S. The application of magnetic structural phase analysis for the diagnostics of the state of a 08X18H10T Steel-CT 3 steel composite material and its components that were subjected to plastic deformation. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2012, vol. 48, no. 6, pp. 346–356. DOI: 10.1134/S1061830912060022.
7. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Putilova E.A. Magnetic estimation of stresses applied to a two-layer steel CT3-steel 08X18H10T composite material during elastoplastic deformation by uniaxial tension. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2012, vol. 48, no. 8, pp. 495–504. DOI: 10.1134/S1061830912080050.
8. Sagaradze V.V., Kataeva N.V., Mushnikova S.Y., Khar'kov O.A., Kalinin G.Yu., Yam-pol'skii V.D. Structural transformations in hull material clad by nitrogen stainless steel using various methods. *The Physics of Metals and Metallography*, 2014, vol. 115, no. 2, pp. 202–210. DOI: 10.1134/S0031918X1402015X.
9. Dhib Zina, Guermazi Noamen, Ktari Ahmed, Gasperini Monique, Haddar Nader. Mechanical bonding properties and interfacial morphologies of austenitic stainless steel clad plates. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 696, pp. 374–386. DOI: 10.1016/j.msea.2017.04.080.
10. Dhib Zina, Guermazi Noamen, Gaspřirini Monique, Haddar Nader. Cladding of low-carbon steel to austenitic stainless steel by hot-roll bonding: Microstructure and mechanical properties before and after welding. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 656, pp. 130–141. DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.088.
11. Kaya Yakup, Kahraman Nizamettin. An investigation into the explosive welding/cladding of Grade A ship steel/AISI 316L austenitic stainless steel. *Materials & Design*, 2013, vol. 52, pp. 367–372. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.05.033.
12. Corigliano Pasqualino, Crupi Vincenzo, Guglielmino Eugenio, Sili Andrea Mariano. Full-field analysis of AL/FE explosive welded joints for shipbuilding applications. *Marine Structures*, 2018, vol. 57, pp. 207–218. DOI: 10.1016/j.marstruc.2017.10.004.
13. Graham Gedge. Structural uses of stainless steel — buildings and civil engineering. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, vol. 64, no. 11, pp. 1194–1198. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.05.006.
14. Konovalov D.A., Veretennikova I.A. Study on mechanical properties of a bimetallic composite produced by explosion welding under incremental plastic deformation. *Letters on materials*, 2018, vol. 8, no. 2 (30), pp. 215–219. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-2-215-219.
15. Grudev A.P. *Teoriya prokatki* [Theory of Rolling]. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2001, 280 p. (In Russian).
16. Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Physical metallurgy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 648 p. (In Russian).
17. Gorkunov E.S., Putilova E.A., Zadvorkin S.M., Makarov A.V., Pecherkina N.L., Kalinin G.Y., Mushnikova S.Y., Fomina O.V. Investigation of the structure and properties of the material of various zones of the welded joint of the austenitic nitrogen-containing steel upon elastoplastic

deformation. *The Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, no. 11, pp. 1152–1162. DOI: 10.1134/S0031918X16110065.

18. Deryagin A.I., Zavalishin V.A., Sagaradze V.V., Kuznetsov A.R., Vil'danova N.F., Ivchenko V.A., Efros B.M. Effect of composition and temperature on the redistribution of alloying elements in Fe-Cr-Ni alloys during cold deformation. *The Physics of Metals and Metallography*, 2008, vol. 106, no. 3, pp. 291–301. DOI: 10.1134/S0031918X08090093.

19. Kondorsky E.I. The nature of the high coercive force of fine ferromagnets and the theory of single-domain structure. *Izv. AN SSSR: Seriya Fizicheskaya*, 1952, vol. XVI, no. 4, pp. 398–411. (In Russian).

20. Preobrazhensky A. A. *Magnitnye materialy i elementy* [Magnetic Materials and Elements]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1976, 336 p. (In Russian).

Подана в журнал: 15.10.2018

УДК 537.622

DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.136-148

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ РАБОТЫ В АРКТИЧЕСКОМ КЛИМАТЕ

Е. А. Путилова^{а)*}, С. М. Задворкин^{б)}, Э. С. Горкунов^{в)}, А. Н. Мушников^{г)}

ИМАШ УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

- ^{а)}  <https://orcid.org/0000-0002-8508-8413>  tuevaevgenya@mail.ru;
^{б)}  <https://orcid.org/0000-0002-7918-8207>  zadvorkin@imach.uran.ru;
^{в)}  <https://orcid.org/0000-0003-1820-2746>  ges@imach.uran.ru;
^{г)}  <https://orcid.org/0000-0001-7073-6476>  mushnikov@imach.uran.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: tuevaevgenya@mail.ru

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, 620049, Екатеринбург, Российская Федерация

Тел.: +7 (343) 362–30–29

В работе представлены результаты исследования механических и магнитных свойств двухслойных высокопрочных материалов, основной слой, в котором выполнен из корпусной высокопрочной стали 15ХН4МДФ, а плакирование – двумя разными коррозионностойкими сталями с разной стабильностью аустенита 08Х18Н10 и 04Х20Н6Г11М2АФБ, полученных по технологии сварки взрывом и эксплуатируемых в арктическом климате, в зависимости от величины обжатия при холодной прокатке. Холодную прокатку на разные степени обжатия проводили с целью моделирования влияния пластического деформирования на свойства высокопрочных биметаллических материалов и определения возможности применения неразрушающих магнитных методов для диагностики состояния таких материалов, а также отдельных компонентов в их составе. Проведено сравнение механических и магнитных свойств отдельных компонентов (корпусной и коррозионностойких сталей с разной стабильностью аустенита) с биметаллами, которые они образуют. Отмечено увеличение значений микротвердости вблизи сварного соединения во всех исследованных биметаллах. Получены зависимости прочностных характеристик от величины обжатия. Установлены информативные магнитные параметры, однозначно изменяющиеся с увеличением степени прокатки, и которые в дальнейшем можно было бы использовать при разработке методик неразрушающей диагностики состояния биметаллических материалов в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: плакированная сталь, сварка взрывом, биметалл, прочность, коррозионная стойкость, магнитные свойства, дифференциальная магнитная проницаемость.

1. Введение

Развитие современной промышленности тесно связано с созданием и внедрением как новых технологий, так и перспективных материалов, которые удовлетворяли бы постоянно повышающимся требованиям к их прочностным и технологическим свойствам, а также долговечности, надежности и экономичности конструкций. Одним из эффективных решений отмеченной проблемы является разработка и создание нового поколения металлических материалов с иерархически организованной структурой, к которым в частности относятся многокомпонентные или многослойные материалы. Слои или компоненты таких материалов по отдельности обладают разными комплексами требуемых свойств, но при их соединении возможно получение материала, который будет сочетать в себе преимущества каждого из слоев.

Так, например, двухслойные материалы, плакированные коррозионностойкими сталями, находят все более широкое применение в качестве материалов для несущих корпусных конструкций, работающих в условиях агрессивных сред. Двухслойные материалы в качестве корпусного материала начали применять еще во второй половине XX в. [1, 2] для обеспечения высокой коррозионной и коррозионно-эрозионной стойкости атомных ледоколов. В настоящее время развитие арктических регионов и осуществление масштабных проектов в северных широтах приводит к необходимости применения более мощных ледоколов, что приводит к большим ледовым нагрузкам и как следствие необходимости применения передовых коррозионностойких материалов, обладающих при этом еще и высокими прочностными характеристиками [1–5].

Однако при диагностике состояния подобных материалов возникают сложности, поскольку изменения под действием приложенных нагрузок могут происходить в разных сталях по-разному [6, 7]. В связи с этим исследование возможности применения неразрушающих магнитных методов для оценки изменений, происходящих в перспективных слоистых материалах, в особенности в их отдельных компонентах, под действием пластического или упругопластического деформирования является весьма актуальной задачей.

Конструкционные материалы, плакированные коррозионностойкими сталями по различным технологиям, уже активно изучаются исследователями из разных стран [5, 8–14]. В работе изучены изменение механических и магнитных свойств в зависимости от величины обжатия при холодной прокатке двухслойных материалов, полученных по технологии сварки взрывом, основной слой в которых представлен конструкционной сталью 15ХН4МДФ, а плакирование осуществляли сталями с разной стабильностью аустенита – стали 08Х18Н10 и 04Х20Н6Г11М2АФБ.

2. Материалы и методика

Образцы для исследований вырезали из листовых заготовок корпусной стали 15ХН4МДФ, коррозионностойкой стали 08Х18Н10 и азотсодержащей стали 04Х20Н6Г11М2АФБ. Химический состав исследованных сталей представлен в табл. 1. Двухслойные материалы для дальнейшего исследования (сталь 15ХН4МДФ – сталь 08Х18Н10 и сталь 15ХН4МДФ – сталь 04Х20Н6Г11М2АФБ) получали по технологии сварки взрывом в заводских условиях (ООО «Уралтехнопроект») и последующей холодной прокатки на разные степени деформации с целью исследовать возможность применения магнитных методов диагностики для оценки изменений, происходящих при пластической деформации в структуре, фазовом составе и физико-механических свойствах исследуемых двухслойных материалов. Отдельные компоненты подвергали такой же деформационной обработке, что и биметаллы. Для удобства обозначения в дальнейшем биметалл «сталь 15ХН4МДФ – сталь 08Х18Н10» будем обозначать как НК, а биметалл «сталь 15ХН4МДФ – сталь 04Х20Н6Г11М2АФБ» – АК.

Таблица 1 – Химический состав исследованной стали

Материал	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Nb+V	N
Сталь 04Х20Н6Г11М2АФБ	0,07	0,22	10,97	0,02	0,01	18,64	6,74	1,74	0,07	0,01	0,35	0,54
Сталь 08Х18Н10	0,06	0,58	0,98	0,04	0,01	19,04	7,84	0,08	0,05	0,01	0,18	–
Сталь 11ХН4МДФ	0,11	0,24	0,40	0,01	0,003	0,68	4,18	0,46	1,28	–	0,16	–

Прокатку осуществляли при комнатной температуре вдоль длинной оси заготовок на станке «ЦКБММ ДУО-200» с диаметром валков 250 мм. Скорость прокатки составляла примерно 40 мм/с. Степень деформации прокаткой оценивали по показателю

условное относительное обжатие (далее по тексту обжатие) ε_{np} , которое определяли по формуле [15]:

$$\varepsilon_{np} = \frac{h_0 - h_1}{h_0},$$

где h_0, h_1 – толщина заготовки до и после прокатки соответственно. Величина обжатия после холодной прокатки указана в табл. 2. Следует отметить, что степень деформации отдельных компонент в биметалле отличается от ε_{np} для пакета в целом.

Для оценки прочности соединения слоев в биметаллах после сварки взрывом проводили испытания на срез коррозионностойкого слоя на современной универсальной испытательной машине Tinius Olsen Super L-60. Схема образцов для проведения испытаний на срез представлена на рис. 1. После сварки взрывом прочность соединения для обоих исследованных биметаллов НК0 и АК0 составляет 560 МПа. Эти значения являются вполне достаточным для обеспечения прочного неразъемного соединения материалов подобного класса.

Таблица 2 – Величина обжатия биметалла и каждого слоя в пакете

АК ε_{np}	0	0,20	0,31	0,41	0,49
Сталь 04X20H6Г11М2АФБ $\varepsilon_{азот}$	0	0,10	0,20	0,30	0,38
Сталь 11ХН4МДФ $\varepsilon_{корп}$	0	0,24	0,40	0,46	0,53
НК ε_{np}	0	0,20	0,30	0,41	0,51
Сталь 08X18H10 $\varepsilon_{нерж}$	0	0,21	0,31	0,40	0,51
Сталь 11ХН4МДФ $\varepsilon_{корп}$	0	0,18	0,36	0,45	0,54

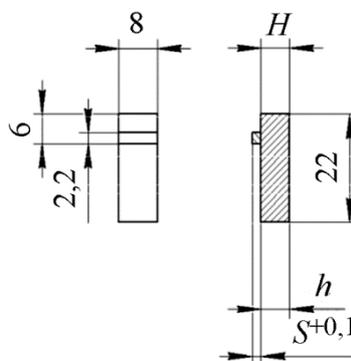


Рис. 1. Образец для испытаний на срез

Количество образовавшейся в процессе холодной прокатки ферромагнитной фазы в коррозионностойкой стали 08X18H10 определяли методом гомологических пар по результатам рентгеноструктурного анализа, проведенного на рентгеновском дифрактометре SHIMADZU XRD-7000.

Микротвердость по Виккерсу в поперечном сечении полученных материалов определяли на микротвердомере SHIMADZU при нагрузке на индентор 0,49 Н.

Измерение магнитных характеристик проводили в замкнутой магнитной цепи на магнитоизмерительном комплексе REMAGRAPH С-500. Намагничивание образцов осуществляли вдоль продольной оси. В условиях замкнутой магнитной цепи напряженность внутреннего магнитного поля достигала 550 А/см. Из петель магнитного гистерезиса определяли коэрцитивную силу H_c , остаточную индукцию B_r и намагниченность насыщения M_s .

Погрешность измерения поля и индукции не превышала 3 %. Из основной кривой намагничивания определяли максимальную магнитную проницаемость $\mu_{\text{макс}}$. При помощи дифференцирования нисходящих ветвей петель магнитного гистерезиса получали полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}$ (далее на рис. 6 приведены только те участки полевых зависимостей $\mu_{\text{диф}}$, на которых формируются максимумы проницаемости). В ходе проведения экспериментов было установлено, что петли магнитного гистерезиса для всех исследованных материалов, за исключением коррозионностойких сталей, близки к предельным, т. е. величина $M_{\text{макс}}$ близка к намагниченности насыщения M_s . По виду петель гистерезиса образцов из стали 08X18H10 [6] видно, что в образцах из этой стали в использованном нами диапазоне магнитных полей не достигается состояние технического насыщения, и, следовательно, $M_{\text{макс}} < M_s$. Поэтому в дальнейшем используется термин максимальная намагниченность или намагниченность в максимальном приложенном поле и обозначается $M_{\text{макс}}$. Величина максимальной намагниченности пропорциональна величине намагниченности насыщения материала. В работе приведены значения максимальной намагниченности в единицах Тл, при этом она обозначается как $\mu_0 M_{\text{макс}}$, где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

3. Результаты и их обсуждение

В поперечном сечении полученных двухслойных образцов было проведено измерение микротвердости. На рис. 2 а представлены распределения микротвердости для биметалла НК, прокатанного с разными степенями обжатия, а на рис. 2 б – для сравнения представлены распределения микротвердости для биметаллов АК20 и НК20, т. е. с одинаковой величиной обжатия. Для всех исследованных образцов вблизи границы раздела двух материалов (т. е. в зоне сварного шва) наблюдаются более высокие значения микротвердости. Возможно, это обусловлено деформационным упрочнением материалов в процессе сварки взрывом, и дальнейшая холодная прокатка не может привести к полному выравниванию свойств по сечению. Из рис. 2 а хорошо видно, что с увеличением обжатия микротвердость стали 08X18H10 увеличивается примерно от HV_{0,05} 300 до HV_{0,05} 500 (для сравнения брали значения с внешней стороны образца). Столь интенсивный рост микротвердости обусловлен протеканием фазового превращения в процессе холодной деформации с образованием в стали 08X18H10 α' -мартенсита деформации. Результаты проведенного рентгенофазового анализа подтвердили наличие новообразовавшейся фазы в слое из стали 08X18H10, причем с увеличением величины обжатия, количество мартенсита деформации растет (рис. 3). Следует отметить, что до значений обжатия $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,30$ как количество мартенсита деформации, так и значения микротвердости растут более интенсивно, при больших величинах обжатия интенсивность роста этих значений снижается.

На рис. 2 б для сравнения представлены распределения микротвердости для биметаллов АК и НК, прокатанных с одинаковыми степенями обжатия $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,20$. Для слоя из стали 15XH4MДФ значения микротвердости в составе биметалла АК немного выше, чем в биметалле НК. Возможно, это объясняется тем, что при одинаковой величине обжатия биметаллов, обжатие именно этого слоя в составе АК выше, чем в составе биметалла НК. Азотсодержащая сталь 04X20H6Г11M2АФБ изначально обладает более высокими значениями прочностных свойств по сравнению со сталью 08X18H10.

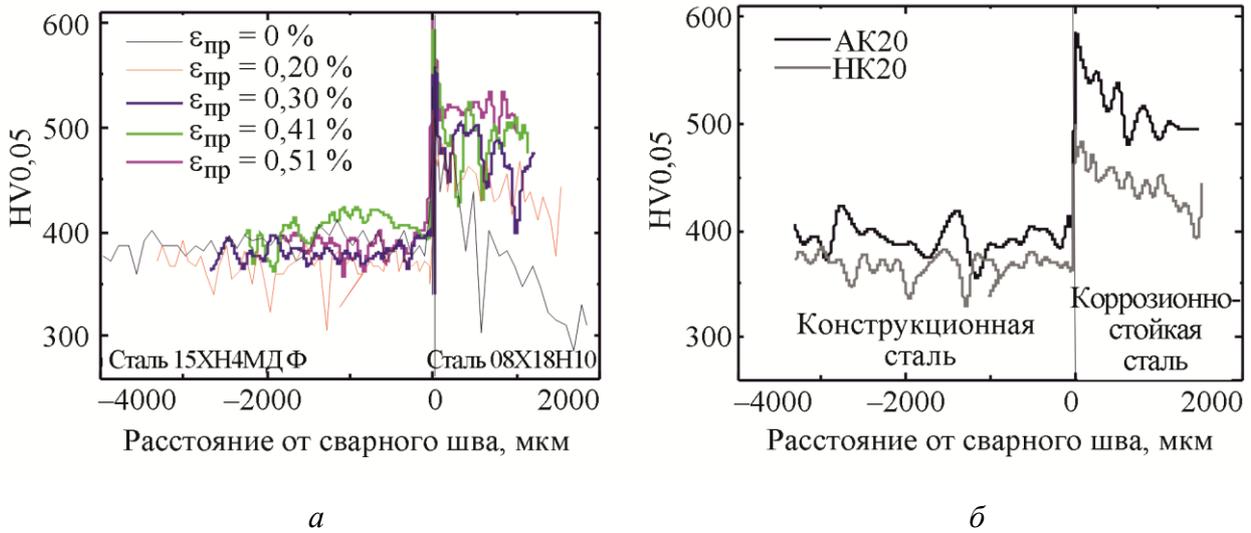


Рис. 2. Распределение микротвердости в поперечном сечении исследованных биметаллических образцов

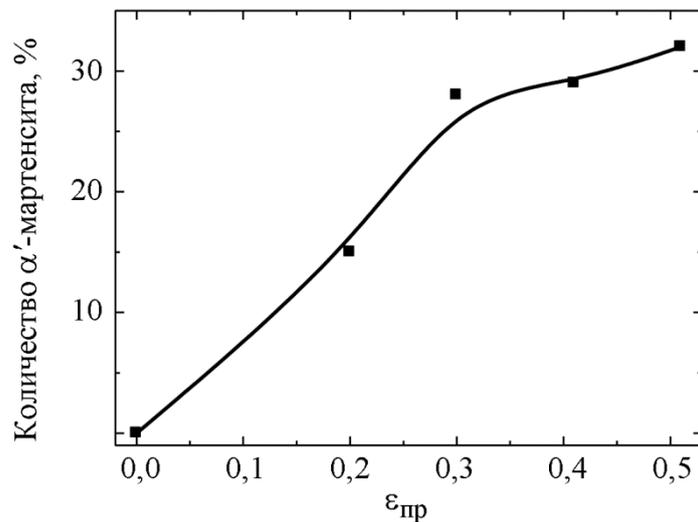


Рис. 3. Зависимость количества мартенсита деформации, определенного методом рентгенофазового анализа, от величины обжатия

Зависимости прочностных характеристик (условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ и временного сопротивления σ_B) в зависимости от величины обжатия исследованных материалов представлены на рис. 4. В исходном состоянии наибольшими значениями прочностных свойств обладают полученные сваркой взрывом биметаллы, основной вклад в формирование свойств которых вносит слой из высокопрочной корпусной стали. Однако наибольшие значения деформационного упрочнения вследствие холодного деформирования прокаткой обладают коррозионностойкие стали 08X18H10 и 04X20H6Г11M2АФБ. Упрочнение в первой в основном происходит за счет протекания фазового превращения и образования в структуре более прочной фазы – мартенсита деформации [16] (рис. 3), а во второй – за счет увеличения плотности дислокаций в сочетании с наличием в структуре мелкодисперсных нитридов [17].

Пластическая деформация приводит к возрастанию значений условного предела текучести и временного сопротивления разрыву всех исследованных материалов. При значениях обжатия $\epsilon_{пр} = 0,20$ и выше наибольшие прочностные свойства демонстрирует азотсодержащая сталь 04X20H6Г11M2АФБ. Если сравнить два полученных биметалла, то наибольшей

способностью к деформационному упрочнению обладает биметалл НК, чем АК. Рост прочностных показателей НК с увеличением обжатия составляет 35 %, а для АК – не больше 15 %. И если в исходном состоянии уровень прочностных свойств биметалла АК был выше, то при деформации $\varepsilon_{пр} > 0,20$ наибольшие значения характерны для биметалла НК.

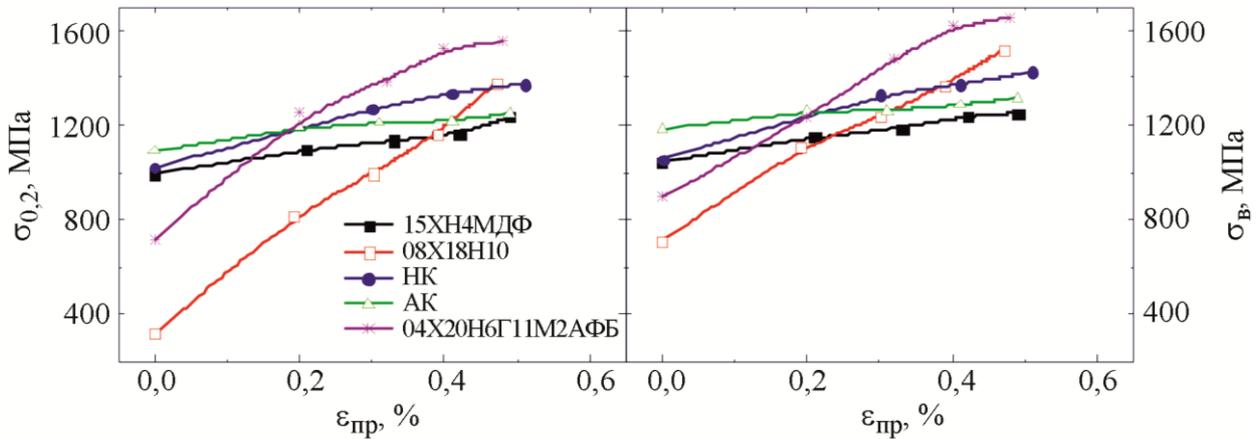


Рис. 4. Зависимости условного предела текучести и временного сопротивления разрыву от величины обжатия

На рис. 5 представлены результаты измерений магнитных характеристик сталей 18XН4МДФ и 08X18Н10 и биметаллов НК и АК в зависимости от величины обжатия $\varepsilon_{пр}$. Для азотсодержащей стали характеристики не представлены, так как эта сталь, как в исходном состоянии, так и после максимального обжатия остается парамагнетиком, и изменения ее магнитных характеристик не происходят. Для стали 08X18Н10 видно, что для коэрцитивной силы характерна неоднозначная зависимость от степени обжатия. До деформации $\varepsilon_{пр} = 0,20$ наблюдается увеличение H_c . Это может быть обусловлено, во-первых, увеличением плотности дислокаций при прокатке. Во-вторых, согласно литературным данным [18], выделения ферромагнитной фазы, образовавшиеся в Fe-Cr-Ni сплавах на начальных стадиях деформации, достаточно мелкие – примерно 8 нм. Это намного меньше критического размера однодоменного состояния сплавов на основе железа (около 50 нм [19, 20]). Для однодоменного состояния характерны высокие значения коэрцитивной силы, часто сопоставимые по величине с полем магнитокристаллической анизотропии (для чистого железа – 400 А/см [19]). При величине обжатия больше 0,20 значения коэрцитивной силы снижаются, хотя плотность дислокаций увеличивается. Это, возможно, объясняется тем, что количество и размер выделений магнитоупорядоченной фазы (в нашем случае мартенсита) увеличиваются и энергетически выгодным становится многодоменное состояние магнитоупорядоченной фазы. Поэтому можно сделать вывод о том, что фактор изменения размера выделений α' -фазы превагирующе влияет на процессы перемагничивания и, соответственно, на величину коэрцитивной силы стали 08X18Н10. Коэрцитивная сила стали 15XН4МДФ при обжатии $\varepsilon_{пр} = 0,40$ изменяется незначительно, практически в пределах погрешности измерения. Однако при $\varepsilon_{пр} > 0,40$ заметно снижение H_c примерно на 9 %. Коэрцитивная сила биметалла НК практически не изменяется с увеличением обжатия. Для биметалла АК коэрцитивная сила меняется с минимумом в районе величины обжатия 0,35.

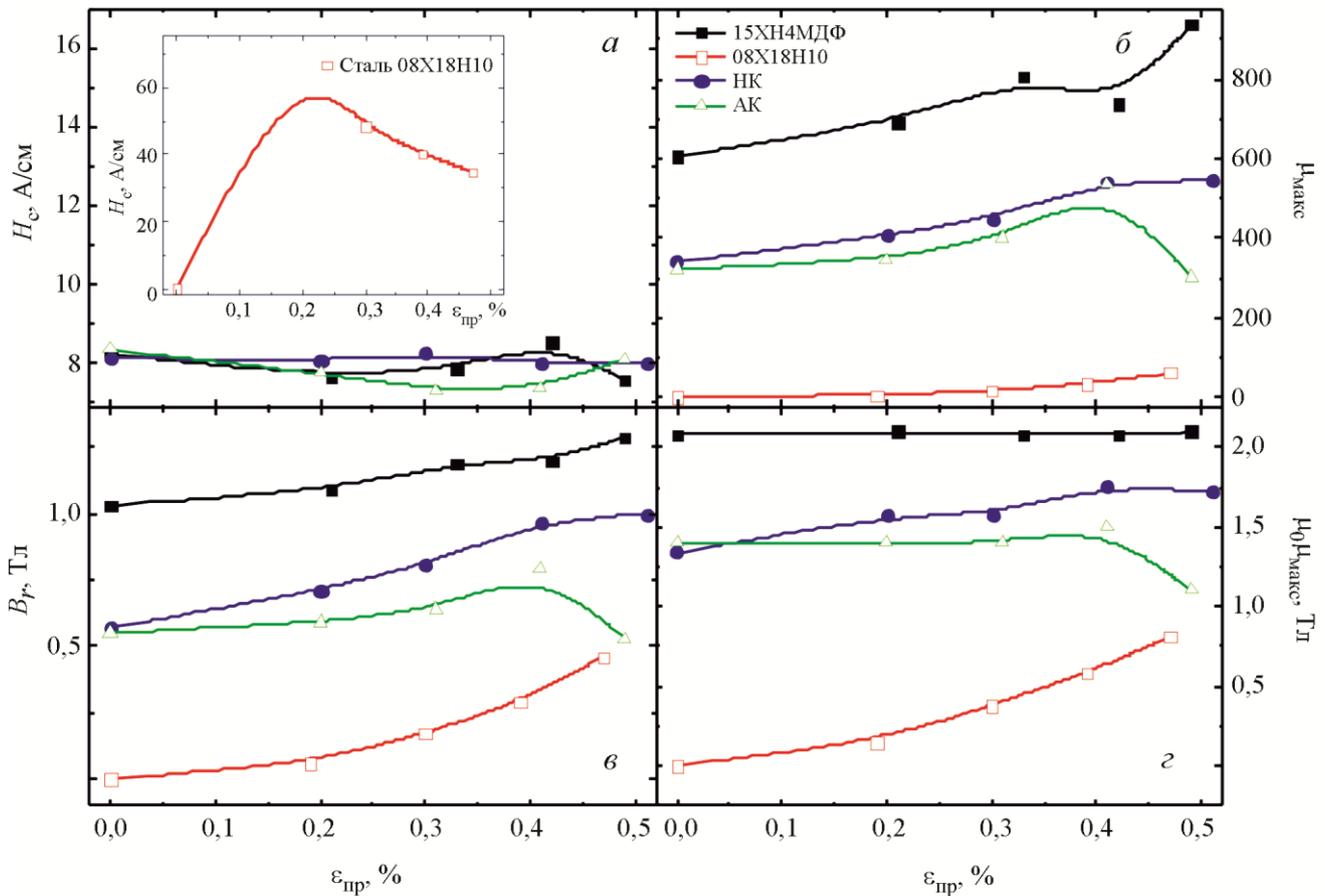


Рис. 5. Изменение магнитных характеристик (коэрцитивной силы (а), максимальной магнитной проницаемости (б), остаточной индукции (в) и намагниченности в максимальном приложенном поле (з)) сталей 18ХН4МДФ и 08Х18Н10 и биметаллов НК и АК в зависимости от величины обжатия $\epsilon_{пр}$

Значения остаточной индукции, максимальной магнитной проницаемости для сталей 18ХН4МДФ и 08Х18Н10 и биметалла НК изменяются однозначно во всем интервале величин обжатия. Для биметалла АК эти изменения однозначны до величин обжатия $\epsilon_{пр} = 0,41$. Это позволяет использовать их в качестве информативных параметров при разработке методик неразрушающего контроля оценки степени пластического деформирования материала.

Намагниченность в максимальном приложенном поле для корпусной стали 15ХН4МДФ и для биметалла АК (до $\epsilon_{пр} = 0,40$) остается неизменной. Для коррозионностойкой стали 08Х18Н10 и биметалла НК, плакированного этой сталью, характерно монотонное возрастание значений намагниченности в максимальном приложенном поле. Это обусловлено образованием новой ферромагнитной фазы – мартенсита деформации.

Следует отметить, что для образца АК49 (с максимальной величиной обжатия $\epsilon_{пр} = 0,49$) наблюдается снижение значений намагниченности в максимальном приложенном поле. Возможно, это обусловлено тем, что при больших степенях деформации увеличивается способность атомов легирующих элементов (азота) одной стали (в нашем случае азотсодержащей стали 04Х20Н6Г11М2АФБ) диффундировать в менее легированную сталь (корпусную 15ХН4МДФ) с образованием в ней твердых растворов внедрения, которые могут приводить к снижению намагниченности материала в целом.

На рис. 6 приведены полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости для биметаллов АК (рис. 6 а) и НК (рис. 6 б), прокатанных с разными степе-

нями обжата, а также только те участки полевых зависимостей $\mu_{\text{диф}}$, на которых формируются максимумы проницаемости. Количество пиков на полевых зависимостях дифференциальной магнитной проницаемости позволяет судить о количестве ферромагнитных фаз в исследуемом материале. Для биметалла АК видно, что на полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости формируется один пик, соответствующий ферриту в слое из стали 15ХН4МДФ. Азотсодержащая сталь имеет чисто аустенитную структуру даже при максимальных величинах обжата. Для биметалла НК на полевой зависимости в более сильных полях происходит формирование второго пика, соответствующего новообразовавшейся ферромагнитной фазе – мартенситу деформации. На рис. 6 а также приведено изменение поля пика в зависимости от величины обжата. Характер изменения поля пика аналогичен характеру изменения коэрцитивной силы материала. Что же касается коррозионностойких метастабильных сталей, то по значению максимума можно оценивать, протекают ли в стали фазовые превращения и интенсивность их протекания.

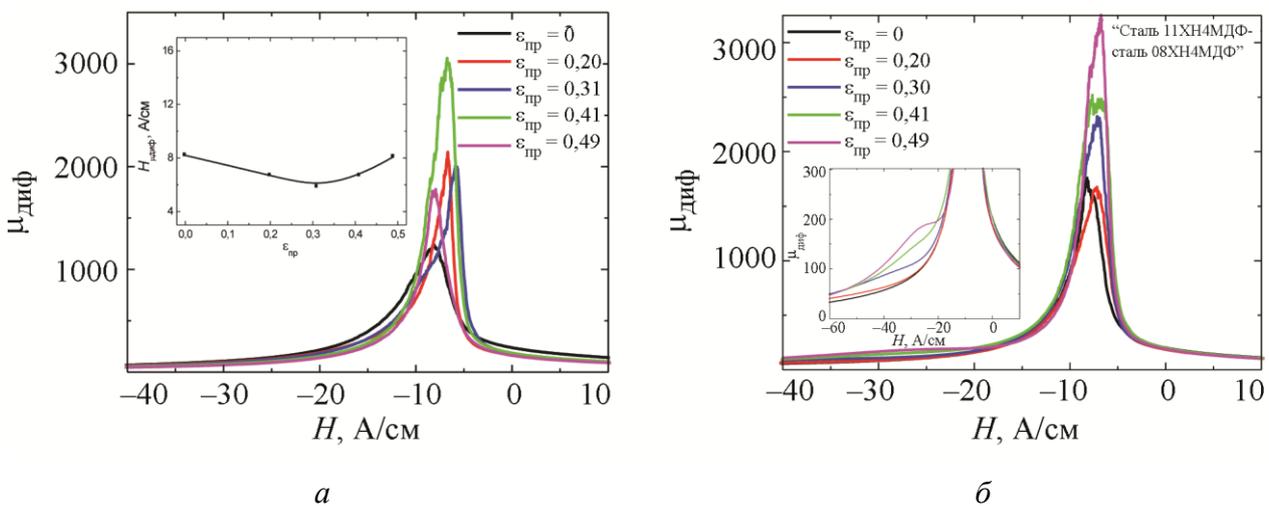


Рис. 6. Полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости для биметаллов АК (а) и НК (б), прокатанных с разными степенями обжата

Такие магнитные характеристики как коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость дают интегральное представление обо всем исследуемом материале в целом. Соответственно они не позволяют получить информацию об изменениях, происходящих в одном из слоев. Так, например, в исследуемых коррозионностойких материалах необходимо отслеживать образование мартенсита деформации в структуре, так как оно влечет за собой снижение стойкости к межкристаллитной коррозии и как следствие – ухудшение эксплуатационных свойств материала в целом. В данном случае использование для оценки изменений, происходящих при пластическом деформировании в высокопрочных биметаллических материалах, полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости является оправданным, т. к. можно получить информацию о состоянии отдельных слоев.

4. Заключение

Для всех двухслойных образцов «сталь 15ХН4МДФ – сталь 08Х18Н10» и «сталь 15ХН4МДФ – сталь 04Х20Н6Г11М2АФБ», прокатанных с разной величиной обжата, установлено увеличение микротвердости в зоне соединения слоев, что обусловлено деформационным упрочнением материала в процессе сварки взрывом.

В исходном состоянии наибольшие значения прочностных характеристик характерны для биметаллов «сталь 15ХН4МДФ – сталь 08Х18Н10» и «сталь 15ХН4МДФ – сталь 04Х20Н6Г11М2АФБ», а не компонентов их составляющих. Наибольшее деформационное упрочнение при пластической деформации холодной прокаткой наблюдается у коррозионно-стойких сталей 08Х18Н10 и 04Х20Н6Г11М2АФБ. При величине обжатия 0,20 и выше сталь 04Х20Н6Г11М2АФБ обладает наибольшими значениями условного предела текучести и временного сопротивления разрыву среди всех исследованных материалов. При максимальных величинах деформации прокаткой прочностные свойства биметаллов «сталь 15ХН4МДФ – сталь 08Х18Н10» и «сталь 15ХН4МДФ – сталь 04Х20Н6Г11М2АФБ» имеют промежуточные значения между коррозионно-стойкими сталями и корпусной сталью.

Остаточная индукция, максимальная магнитная проницаемость для сталей 18ХН4МДФ и 08Х18Н10 и биметалла НК при увеличении величины обжатия при холодной прокатке ведут себя однозначно, что позволяет использовать их для оценки степени пластической деформации подобных материалов.

Значения максимумов на полевых зависимостях дифференциальной магнитной проницаемости слоистых материалов могут служить параметрами для диагностики образования новой магнитно-упорядоченной фазы и ее количества, образующейся в процессе пластической деформации. Значения полей, при которых формируются максимумы на зависимостях дифференциальной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля слоистых материалов и их отдельных компонентов, могут быть использованы для оценки степени деформации прокаткой.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №16-38-60027. При выполнении работы использовано оборудование ЦКП «Пластометрия».

Литература

1. Двухслойная плакированная сталь с повышенной коррозионно-эрозионной стойкостью / Г. Ю. Калинин, С. Ю. Мушникова, О. В. Фомина, О. А. Харьков // V Международная конференция-школа по химической технологии ХТ'16 : сборник тезисов докладов сателлитной конференции XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 3-х томах. – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2016. – С. 231–232. (In Russian).
2. Орыщенко А. С., Малышевский В. А., Хлусова Е. И. Современные конструкционные стали для Арктики // Судостроение. – 2013. – № 3. – С. 46–49.
3. Хлусова Е. И. Современные достижения в создании хладостойких конструкционных сталей для Арктики // Научно-технический прогресс в черной металлургии : материалы II Международной научно-технической конференции. – Череповец : Череповецкий государственный университет, 2015. – С. 18–20.
4. Чернышов Е. А., Романов А. Д., Романова Е. А. Высокопрочные судостроительные стали и сплавы // Металлург. – 2016. – № 2. – С. 59–63.
5. Структура и свойства плакированной двухслойной стали для корпусов арктических судов / В. В. Сагарадзе, Н. В. Катаева, С. Ю. Мушникова, Г. Ю. Калинин, О. А. Харьков, С. К. Костин, О. Н. Парменова // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 3 (83). – С. 14–25.
6. The application of magnetic structural phase analysis for the diagnostics of the state of a 08X18N10T Steel-CT 3 steel composite material and its components that were subjected to plastic deformation / E. S. Gorkunov, S. M. Zadvorkin, E. A. Putilova, A. M. Povolotskaya, L. S. Goruleva, I. A. Veretennikova, I. S. Kamantsev // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2012. – Vol. 48. – No. 6. – P. 346–356.

7. Gorkunov E. S., Zadvorkin S. M., Putilova E. A. Magnetic estimation of stresses applied to a two-layer steel CT3-steel 08X18H10T composite material during elastoplastic deformation by uniaxial tension // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2012. – Vol. 48, no. 8. – P. 495–504. – DOI: 10.1134/S1061830912080050.
8. Structural transformations in hull material clad by nitrogen stainless steel using various methods / V. V. Sagaradze, N. V. Kataeva, S. Yu. Mushnikova, O. A. Khar'kov, G. Yu. Kalinin, V. D. Yampol'skii // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2014. – Vol. 115, no. 2. – P. 202–210. – DOI: 10.1134/S0031918X1402015X.
9. Mechanical bonding properties and interfacial morphologies of austenitic stainless steel clad plates / Zina Dhib, Noamen Guermazi, Ahmed Ktari, Monique Gasperini, Nader Haddar // *Materials Science and Engineering: A*. – 2017. – Vol. 696. – P. 374–386. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.04.080.
10. Cladding of low-carbon steel to austenitic stainless steel by hot-roll bonding: Microstructure and mechanical properties before and after welding / Zina Dhib, Noamen Guermazi, Monique Gasperini, Nader Haddar // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 656. – P. 130–141. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.088.
11. Yakup Kaya, Nizamettin Kahraman. An investigation into the explosive welding/cladding of Grade A ship steel/AISI 316L austenitic stainless steel // *Materials & Design*. – 2013. – Vol. 52. – P. 367–372. – DOI: 10.1016/j.matdes.2013.05.033.
12. Full-field analysis of AL/FE explosive welded joints for shipbuilding applications / Pasqualino Corigliano, Vincenzo Crupi, Eugenio Guglielmino, Andrea Mariano Sili // *Marine Structures*. – 2018. – Vol. 57. – P. 207–218. – DOI: 10.1016/j.marstruc.2017.10.004.
13. Graham Gedge. Structural uses of stainless steel – buildings and civil engineering // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2008. – Vol. 64, no. 11. – P. 1194–1198. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.05.006.
14. Konovalov D. A., Veretennikova I. A. Study on mechanical properties of a bimetallic composite produced by explosion welding under incremental plastic deformation // *Letters on materials*. – 2018. – Vol. 8, no. 2 (30). – P. 215–219. – DOI: 10.22226/2410-3535-2018-2-215-219.
15. Грудев А. П. Теория прокатки. – М. : Интермет Инжиниринг, 2001. – 280 с.
16. Гуляев А. П. Металловедение. – М. : Металлургия, 1978. – 648 с.
17. Investigation of the structure and properties of the material of various zones of the welded joint of the austenitic nitrogen-containing steel upon elastoplastic deformation / E. S. Gorkunov, E. A. Putilova, S. M. Zadvorkin, A. V. Makarov, N. L. Pecherkina, G. Yu. Kalinin, S. Yu. Mushnikova, O. V. Fomina // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2016. – Vol. 117, no. 11. – P. 1152–1162. – DOI: 10.1134/S0031918X16110065.
18. Effect of composition and temperature on the redistribution of alloying elements in Fe-Cr-Ni alloys during cold deformation / A. I. Deryagin, V. A. Zavalishin, V. V. Sagaradze, A. R. Kuznetsov, N. F. Vil'danova, V. A. Ivchenko, B. M. Efros // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2008. – Vol. 106, no. 3. – P. 291–301. – DOI: 10.1134/S0031918X08090093.
19. Кондорский Е. И. Природа высокой коэрцитивной силы мелкодисперсных ферромагнетиков и теория однодоменной структуры // *Изв. АН СССР, серия «Физическая»*. – 1952. – Т. XVI, № 4. – С. 398–411.
20. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы: учеб. для вузов. – М. : «Высшая школа», 1976. – 336 с.