https://doi.org/10.15350/17270529.2022.1.11

УДК 539.533+ 620.178.152.34

Сравнительный анализ физико-механических свойств поверхностных слоев до 200 нм чугунов марок СЧ 20, ВЧ 40

А. А. Шушков[1,2], П. Э. Яникаева[2], А. В. Вахрушев[1]

[1] Удмуртский федеральный исследовательский центр УРО РАН, Россия, 426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

[2] Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Россия, 426069, Ижевск, ул. Студенческая, 7

Аннотация. Проведено исследование и сравнительный анализ физико-механических свойств поверхностных слоев глубиной до 200 нм сплавов чугуна СЧ 20, ВЧ 40. На участках поверхности двух исследуемых образцов обнаружена фаза "сильно твердая" с одинаковыми значениями твердости. Среднее значение твердости исследуемой "сильно твердой" области образца ВЧ 40 $H_{ВЧ\ 40}$ = 34.71±12.23 ГПа, СЧ 20 $H_{СЧ\ 20}$ = 34.57±14.56 ГПа. Обнаружено, что среднее значение твердости образца СЧ 20 без учета областей с "сильно твердой" фазой $H_{СЧ\ 20}$ = 8.96±6.93 ГПа и является на 65 % выше среднего значения твердости образца ВЧ 40 $H_{ВЧ\ 40}$ = 5.43±2.57 ГПа, также без учета областей с "сильно твердой" фазой. Среднее значение индекса пластичности образца СЧ 20 без учета "сильно твердой" фазы $PI_{СЧ\ 20}$ = 0.66±0.15 ГПа, ВЧ 40 $PI_{ВЧ\ 40}$ = 0.72±0.11 ГПа. Таким образом, поверхность образца сплава чугуна ВЧ 40 немного более пластична на 9 %. Параметр упругого восстановления образца СЧ 20 без учета "сильно твердой" фазы $ERP_{СЧ\ 20}$ = 0.23±0.13 ГПа, выше, чем у образца ВЧ 40 $ERP_{ВЧ\ 40}$ = 0.17±0.08 ГПа.

Ключевые слова: твердость, приведенный модуль упругости, индекс пластичности, степень упрочнения, упругий параметр восстановления, наноиндентирование, чугун СЧ 20, ВЧ 40.

✉ *Андрей Шушков, e-mail: ligrim@mail.ru*

Comparative Analysis of the Physical and Mechanical Properties of Surface Layers up to 200 nm of Cast Iron Grades A48-30B, 60-40-18

Andrey A. Shushkov[1,2], Polina E. Yanikaeva[2], Alexander V. Vakhrushev[1]

[1] Udmurt Federal Research Center UB RAS (34, T. Baramzina St., Izhevsk, 426067, Russian Federation)

[2] Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya St., Izhevsk, 4260069, Russian Federation)

Summary. A study and comparative analysis of the physical and mechanical properties of the surface layers up to 200 nm deep of gray cast iron A48-30B with lamellar graphite and ductile iron 60-40-18 with nodular graphite were carried out. A "strongly hard" phase with the similar hardness values was found on the surface areas of the two samples under study. For the samples, the average value of the studied "strongly hard" area hardness was $H_{60\text{-}40\text{-}18}$ = 34.71±12.23 GPa and $H_{A48\text{-}30B}$ = 34.57±14.56 GPa. It was found that without taking into account the areas with the "strongly hard" phase, the A48-30B sample had the average value of hardness $H_{A48\text{-}30B}$ = 8.96±6.93 GPa, which was 65 % higher than the average value of the 60-40-18 sample hardness $H_{60\text{-}40\text{-}18}$ = 5.43±2.57 GPa. The sample A48-30B had the average value of the plasticity index $PI_{A48\text{-}30B}$ = 0.66±0.15 GPa without taking into account the "strongly hard" phase and the 60-40-18 sample had $PI_{60\text{-}40\text{-}18}$ = 0.72±0.11 GPa . Thus, the surface of the 60-40-18 alloy cast iron sample is 9 % more ductile. Without taking into account the "strongly hard" phase, the elastic recovery parameter of the A48-30B and 60-40-18 sample was $ERP_{A48\text{-}30B}$ = 0.23±0.13 GPa and $ERP_{60\text{-}40\text{-}18}$ = 0.17±0.08 GPa, respectively.

Keywords: hardness, reduced modulus of elasticity, plasticity index, degree of hardening, elastic recovery parameter, nanoindentation, cast iron A48-30B, alloy cast iron 60-40-18.

✉ *Andrey Shushkov, e-mail: ligrim@mail.ru*

ВВЕДЕНИЕ

Сплавы чугуна ВЧ 40 и СЧ 20 нашли широкое применение в отечественной и зарубежной промышленности [1]. СЧ 20 – серый чугун – сплав железа с углеродом, в котором присутствует графит в виде пластинчатых включений. ВЧ 40 – чугун с шаровидным графитом, применяется для изделий с высокой прочностью и удовлетворительной пластичностью. Физико-механические свойства чугунов марок ВЧ 40 и СЧ 20 на макроуровне хорошо исследованы [2]. Однако представляет собой интерес изучение их свойств на микро- и особенно наноуровне, на поверхности, так как во многих деталях, изделиях на основе чугунов марок ВЧ 40 и СЧ 20 именно поверхностный слой является рабочим, активным, наиболее подверженным износу и деформациям. Существует много способов поверхностного упрочнения деталей и механизмов [3 – 6].

Задачи увеличения прочности, твердости, пластичности, упругости, износостойкости, способности выдерживать длительные нагрузки, а также переменные ударные нагрузки, долговечности работы приповерхностных слоев, а также снижение массы изготавливаемых деталей являются приоритетными в РФ [7 – 10]. Для решения подобных задач используют добавление микро- и наноразмерных присадок в состав чугуна [11, 12], подобным образом с введением легирующих добавок из чугуна марки СЧ 20 был получен чугун марки ВЧ 40.

Однако, на наш взгляд, несмотря на то, что физико-механические свойства чугунов марок ВЧ 40 и СЧ 20 на макроуровне хорошо исследованы, изучению физических и особенно механических характеристик в приповерхностных слоях до 200 нм не уделено должного внимания. Наличие известных физико-механических характеристик чугунов марок ВЧ 40 и СЧ 20 в наномасштабе до 200 нм (желательно до 100 нм) позволит лучше изучить поверхностный слой изделий, в котором он является активным. Это может являться стимулом для расширения сферы применения указанных марок чугунов в деталях, используемых не только в макропромышленности, но и в области нанотехнологий. Поэтому данное исследование является актуальным.

Одним из известных и широко применяемых методов измерения физико-механических характеристик наноматериалов является метод наноиндентирования [13 – 18]. Возникновение направления развития разработки методов измерения физико-механических свойств приповерхностных слоев, микро- и особенно нанообъектов связано с явлением изменения (в большинстве случаев увеличения) механических характеристик наноструктур с уменьшением их размера [19]. Особенно большой интерес к их исследованию появился в связи с созданием нанокомпозиционных материалов с улучшенными, заранее прогнозируемыми механическими свойствами.

Поэтому целью настоящей работы является исследование изменения физико-механических характеристик (твердость, приведенный модуль упругости, жесткость, индекс пластичности и др.) поверхностных слоев до 200 нм чугунов марок ВЧ 40 и СЧ 20 методом наноиндентирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Чугун марок СЧ 20 и ВЧ 40 был выплавлен в индукционной печи в соответствии с ГОСТ 1412, 7293 на заводе высокоточного литья "Авангард" (г. Ижевск). Исследуемые образцы представляли собой цилиндры размером 30×30×10 мм, поверхность образцов механически полировалась. После полировки перед проведением испытаний методом индентирования образцы очищались под струей спирта. Параметр шероховатости поверхности составляет R_a = 23 нм для образца СЧ 20 и R_a = 26 нм – для образца ВЧ 40.

Измерения физико-механических характеристик чугунов марок СЧ 20 и ВЧ 40 проводились на комплексной системе измерений NanoTest 600 в микро- и наномасштабе. Нагрузка вдавливания производилась индентором Берковича (трехгранная алмазная пирамида с углом при вершине 65.3° и радиусом закругления около 200 нм) в соответствии с

ГОСТ Р 8.748-2011. По методике Оливера-Фарра [16] проведен расчет твердости и приведенного модуля упругости и других физико-механических свойств исследуемых образцов.

Исследованы образцы при максимальной заданной нагрузке 3 мН. При такой нагрузке максимальная глубина индентирования не превышала 170 нм. Проведено по 50 измерений методом индентирования каждого образца.

Время нагрузки и разгрузки точки индентирования – 10 с. Время задержки при максимальной силе нагружения – 10 с. Расстояние между точками проникновения алмазного наконечника – 50 мкм.

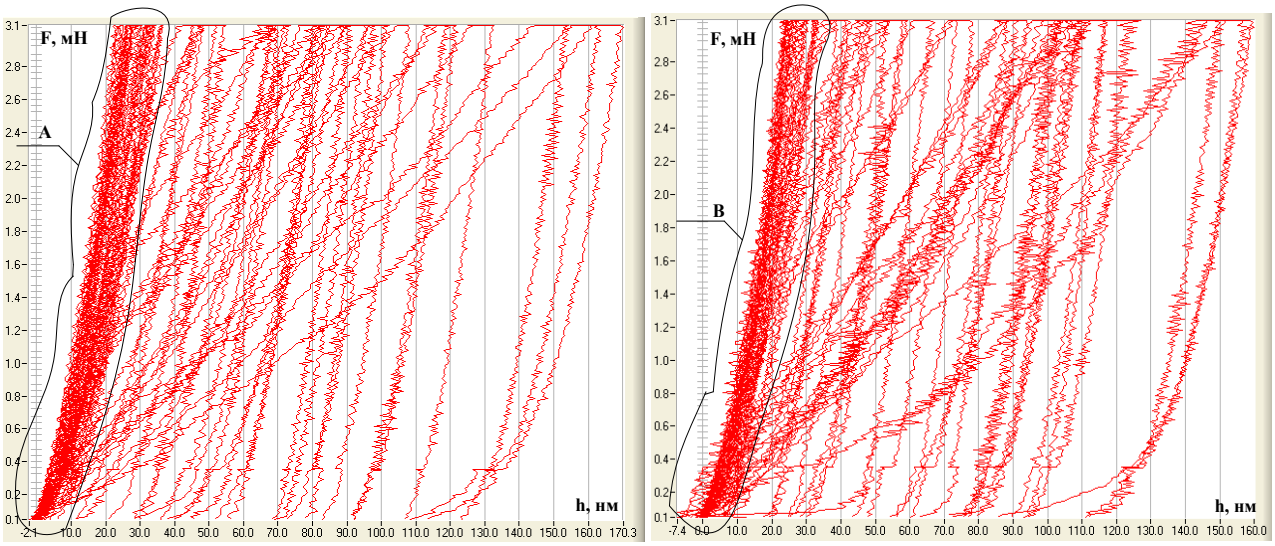
Индекс пластичности PI (Plasticity Index) рассчитывался как отношение величины работы, затрачиваемой на формирование пластической деформации W_{pl} к общей работе.

Параметр упругого восстановления ERP (Elastic Recovery Parameter) рассчитывался как отношение разности максимальной и пластической глубин к пластической глубине проникновения алмазного индентора.

Исследованы три области образца СЧ 20, в двух областях размером 450×50 мкм проведено по 20 испытаний индентированием, в одной линейной области размером 450 мкм проведено 10 испытаний с расстоянием между точками индентирования 50 мкм. Исследованы две линейные области, размером 550 мкм и 1700 мкм образца ВЧ 40, проведено соответственно 12 и 35 испытаний индентированием.

РЕЗУЛЬТАТЫ

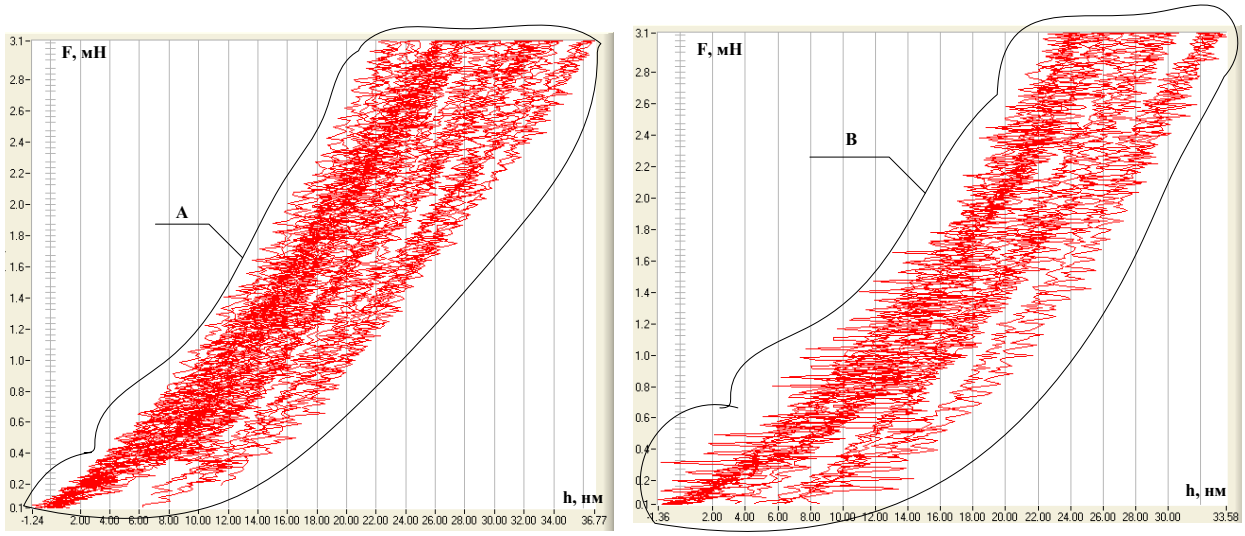
Приведены зависимости прикладываемой силы F, мН от глубины проникновения алмазного наконечника h, нм в образцы СЧ 20 и ВЧ 40 при заданной нагрузке 3 мН (рис. 1). Обнаружено, что на исследуемых поверхностях образцов СЧ 20 и ВЧ 40 присутствуют участки А и В (вторая область СЧ 20 и часть второй области ВЧ 40), где деформация носит обратимый характер – упругая деформация (рис. 2).



a) *b*)

Рис. 1. Зависимость прикладываемой силы F, мН от глубины проникновения алмазного наконечника h, нм в образец при нагрузке 3 мН; *a*) – образец СЧ 20, *b*) – образец ВЧ 40

Fig. 1. Dependence of the applied force F, mN on the depth of penetration of the diamond tip h, nm into the sample for a load of 3 mN; a) – sample A48-30B, b) – sample 60-40-18

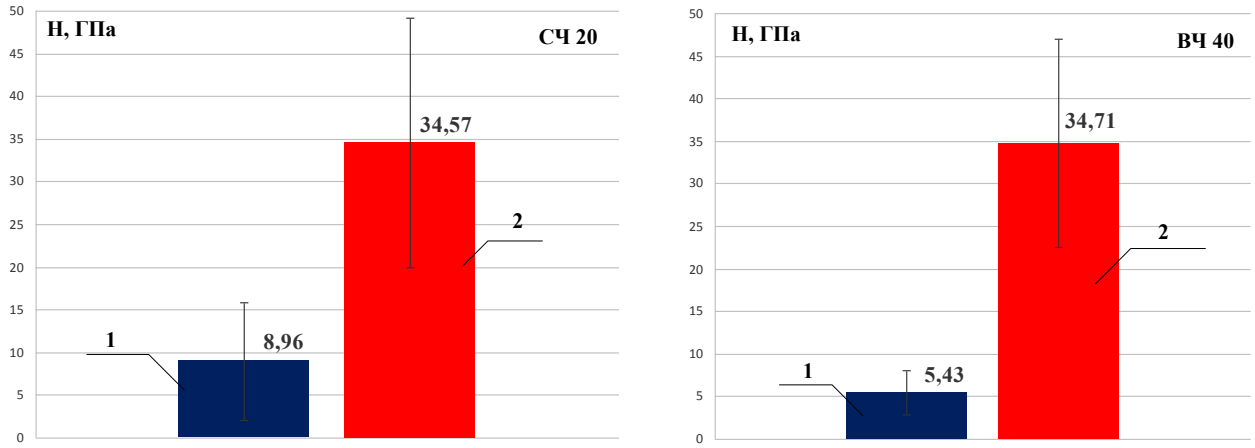


a) *b*)

Рис. 2. Зависимость прикладываемой силы F, мН от глубины проникновения алмазного наконечника h, нм в образец при нагрузке 3 мН. Область с "сильно твердой" фазой: *a*) – образец СЧ 20, *b*) – образец ВЧ 40

Fig. 2. Dependence of the applied force F, mN on the depth of penetration of the diamond tip h, nm into the A48-30B sample for a load of 3 mN. Area with a "strongly hard" phase: a) – sample A48-30B, b) – sample 60-40-18

Среднее значение твердости образца СЧ 20 по трем исследованным областям без учета "сильно твердой" фазы $H_{СЧ\ 20}$ = 8.96±6.93 ГПа и является на 65 % выше среднего значения твердости образца ВЧ 40 $H_{ВЧ\ 40}$ = 5.43±2.57 ГПа, также без учета "сильно твердой" фазы. Величина ошибки является среднеквадратичным отклонением и является достаточно большой вследствие малых глубин проникновения алмазного наконечника. Среднее значение твердости второй исследуемой области с "сильно твердой" фазой образца СЧ 20 $H_{СЧ\ 20\ ТВ}$ = 34.57±14.56 ГПа и является в 3.86 раза выше среднего значения твердости образца СЧ 20 без учета "сильно твердой" фазы (рис. 3, *a*). Среднее значение твердости исследуемой "сильно твердой" области образца ВЧ 40 $H_{ВЧ\ 40\ ТВ}$ = 34.71±12.23 ГПа и является в 6.4 раза выше среднего значения твердости образца ВЧ 40 $H_{ВЧ\ 40}$ = 5.43±2.57 ГПа без учета "сильно твердой" фазы (рис. 3, *b*).



a) *b*)

Рис. 3. Средние значения твердости H, (ГПа) образцов чугуна СЧ 20 (*a*) и ВЧ 40 (*b*): 1 – без учета значений "сильно твердой" фазы; 2 – с учетом значений только "сильно твердой" фазы

Fig. 3. Average values of hardness H, (GPa) of cast iron specimens A48-30B (a) and 60-40-18 (b):
1 – without taking into account the values of the "strongly hard" phase;
2 – taking into account the values of only the "strongly hard" phase

Таким образом, выявлено, что фазовый состав формируется неравномерно по исследуемой поверхности образцов СЧ 20 и ВЧ 40. Задача изучения фазового состава является дальнейшей задачей исследований. На участках поверхности двух исследуемых образцов обнаружена фаза "сильно твердая" с одинаковыми значениями твердости $H_{СЧ\ 20\ ТВ}$ = 34.57±14.56 ГПа, $H_{ВЧ\ 40\ ТВ}$ = 34.71±12.23 ГПа. В микроскоп с увеличением в 1000 раз визуально не заметны отличия областей с "сильно твердой" фазой по сравнению с другими участками.

Сложно сказать какое значение твердости исследуемых образцов с учетом "сильно твердой" фазы, так как разное число испытаний было проведено в эту фазу для образцов СЧ 20 и ВЧ 40. Поэтому говорить, о том какое значение твердости исследуемых образцов с учетом значений "сильно твердой" фазы нет смысла.

Средние значения приведенного модуля упругости образцов СЧ 20 и ВЧ 40, измеренные при максимальной силе вдавливания 3 мН без учета "сильно твердой" фазы практически одинаковы $E_{r\ СЧ\ 20}$ = 204.68±54.57 ГПа, $E_{r\ ВЧ\ 40}$ = 194.7±58.6 ГПа с разницей в 5 %.

Средние значения отношения твердости к приведенному модулю упругости образцов СЧ 20 и ВЧ 40, измеренные при максимальной силе вдавливания 3 мН без учета "сильно твердой" фазы $H/E_{r\ СЧ\ 20}$ = 0.041±0.024, $H/E_{r\ ВЧ\ 40}$ = 0.027±0.009. Таким образом, среднее значение отношения твердости к приведенному модулю упругости образца СЧ 20 выше в 1.5 раза, чем у образца ВЧ 40. Величина H/E_r является сравнительной характеристикой сопротивления материалов деформации при механическом нагружении [18].

Важную характеристику представляет собой параметр индекса пластичности, который характеризует степень пластичности материала. Среднее значение индекса пластичности образца СЧ 20 без учета "сильно твердой" фазы $PI_{СЧ\ 20}$ = 0.66±0.15 ГПа, ВЧ 40 $PI_{ВЧ\ 40}$ = 0.72±0.11 ГПа. Таким образом, поверхность образца чугуна ВЧ 40 более пластична на 9 % по сравнению с чугуном СЧ 20. Характеристикой пластичности материала может служить работа, затрачиваемая на пластическую деформацию в процессе вдавливания алмазного наконечника $W_{pl\ СЧ\ 20}$ = 0.1±0.045 ГПа, ВЧ 40 $W_{pl\ ВЧ\ 40}$ = 0.115±0.034 ГПа.

Среднее значение индекса пластичности "сильно твердой" фазы образца СЧ 20 $PI_{СЧ\ 20\ ТВ}$ = 0.158±0.087 ГПа, ВЧ 40 $PI_{ВЧ\ 40\ ТВ}$ = 0.205±0.037 ГПа. Степень пластичности "сильно твердой" фазы образца ВЧ 40 больше на 30 % образца СЧ 20.

Чем меньше размер отпечатка, тем выше параметр упругого восстановления. Большие значения параметра упругого восстановления являются следствием высокого сопротивления усталостному разрушению, высокой способностью запасать упругую энергию и под действием нагрузки упруго деформироваться без разрушения. Большим значениям параметра упругого восстановления соответствует высокая износостойкость материала [18]. Параметр упругого восстановления образца СЧ 20 без учета "сильно твердой" фазы $ERP_{СЧ\ 20}$ = 0.23±0.13 ГПа, ВЧ 40 $ERP_{ВЧ\ 40}$ = 0.17±0.08 ГПа.

Результаты исследования физико-механических характеристик чугунов СЧ 20 и ВЧ 40 без учета "сильно твердой" фазы представлены в таблице, где W_{el} – работа, затрачиваемая на упругую деформацию в процессе вдавливания алмазного наконечника, C – податливость контакта – обратная величина жесткости.

Результаты измерений твердости на наноуровне, а именно отношение твердости образца СЧ 20 к твердости образца ВЧ 40 $H_{СЧ\ 20}$ / $H_{ВЧ\ 40}$ = 8.96 / 5.43 = 1.65 практически совпадает с отношением твердости исследуемых образов, измеренных по Роквеллу на макроуровне при нагрузке 19620 Н $HRB_{СЧ\ 20}$ / $HRB_{ВЧ\ 40}$ = 105 / 59 = 1.78.

Таблица – Значения физико-механических характеристик исследуемых чугунов СЧ 20 и ВЧ 40 без учета значений "сильно твердой" фазы

Table – The values of the physical and mechanical characteristics of the investigated cast irons A48-30B and 60-40-18 without taking into account the values of the "strongly hard" phase

Значения характеристик Characteristic values	**Марка чугуна** / Cast iron grade	
	СЧ 20 / A48-30B	**ВЧ 40** / 60-40-18
H, ГПа	8.96±6.93	5.43±2.57
E_r, ГПа	204.68±54.57	194.79±58.60
H/E_r	0.041±0.024	0.027±0.009
PI	0.66±0.15	0.72±0.11
W_{pl}, нДж	0.1±0.045	0.115±0.034
W_{el}, нДж	0.045±0.009	0.042±0.007
ERP	0.23±0.13	0.17±0.08
C, нм/мН	6.99±1.6	6.12±1.1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено исследование и анализ физико-механических характеристик поверхностных слоев глубиной до 200 нм сплавов чугуна СЧ 20, ВЧ 40. На участках поверхности двух исследуемых образцов обнаружена "сильно твердая" фаза с одинаковыми значениями твердости H = 34.6 ГПа, но разной степенью пластичности.

Обнаружено, что среднее значение твердости образца СЧ 20 без учета областей с "сильно твердой" фазой $H_{СЧ\ 20}$ = 8.96±6.93 ГПа и является на 65 % выше среднего значения твердости образца ВЧ 40 $H_{ВЧ\ 40}$ = 5.43±2.57 ГПа, также без учета областей с "сильно твердой" фазой.

Выявлено, что среднее значение индекса пластичности образца СЧ 20 без учета "сильно твердой" фазы $PI_{СЧ\ 20}$ = 0.66±0.15 ГПа, ВЧ 40 $PI_{ВЧ\ 0}$ = 0.72±0.11 ГПа. Поверхность образца сплава чугуна ВЧ 40 немного более пластична на 9 %.

Обнаружено, что параметр упругого восстановления образца СЧ 20 без учета "сильно твердой" фазы $ERP_{СЧ\ 20}$ = 0.23±0.13 ГПа выше, чем у образца ВЧ 40 $ERP_{ВЧ\ 40}$ = 0.17±0.08 ГПа.

Установлено, что результаты измерений твердости на наноуровне, а именно отношение твердости образца СЧ20 к твердости образца ВЧ 40 совпадает с отношением, измеренным по Роквеллу на макроуровне при силе вдавливания 19620 Н.

Работа выполнена в рамках Государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ "Моделирование и процессов формирования и функционирования сверхпроводящих наноструктур".

The research was carried out within the framework of the State Assignments of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation "Modeling and processes of formation and functioning of superconducting nanostructures".

При выполнении исследований было использовано оборудование ЦКП "Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий" УдмФИЦ УрО РАН.

Studies were performed using equipment of Core shared research facilities "Center of physical and physical-chemical methods of analysis, investigations of properties and characteristics surface, nanostructures, materials and samples" of UdmFRC UB RAS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотарев В. А. Сравнение методик получения плотных отливок из высокопрочного чугуна на примере отливки корпуса турбины из сплава марки ВЧ 40 // Литейщик России. 2021. № 5. С. 22-30.

2. Веселовский А. А., Завалищин А. Н. Исследование микротвердости алюмованадированных слоев на серых чугунах, полученных термодиффузионным упрочнением // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 5 (29). С. 18-21.

3. Лобанов В. К., Пашкова Г.И. О закалке токами высокой частоты крупных коленчатых валов из высокопрочного чугуна // Високі технології в машинобудуванні: Збірн. наук. праць. Харків: НТУ "ХПІ", 2005. Вып. 1 (10). С. 44-48.

4. Лобанов В. К., Босин Е. Е., Пашкова Г. И. Комбинированное упрочнение - эффективный способ повышения долговечности коленчатых валов мощных транспортных дизелей // Резание и инструмент в технологических системах: международный науч.-техн. сборник. Харьков: НТУ "ХПИ", 2004. Вып. 66. С. 83-88.

5. Ри Э. Х., Кухаренко Е. Б., Ри Х. Влияние продолжительности облучения нано-секундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) на процессы кристаллизации и структурообразования, физико-механические и эксплуатационные свойства чугуна СЧ 20, модифицированного ферросилицием // Литейщик России. 2008. № 6. С. 29-33.

6. Михальченков А. М., Кузьменко И. В. Повышение износостойкости чугунных деталей антифрикционным натиранием // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1999. № 10. С. 27-28.

7. Шушков А. А., Воробьев В. Л., Вахрушев А. В., Быков П. В., Баянкин В. Я. Механические свойства углеродистой стали Ст. 3, облученной ионами аргона с различными плотностями ионного тока // Химическая физика и мезоскопия. 2012. Т. 14, № 1. С. 97-105.

REFERENCES

1. Zolotarev V. A. Sravnenie metodik polucheniya plotnykh otlivok iz vysokoprochnogo chuguna na primere otlivki korpusa turbiny iz splava marki VCh 40 [Comparison of methods for obtaining dense castings from high-strength cast iron on the example of casting the turbine body from the alloy of the VCh40 brand]. *Liteyshchik Rossii* [Foundry Worker of Russia], 2021, no. 5, pp. 22-30. (In Russian).

2. Veselovsky A. A., Zavalishchin A. N. Issledovanie mikrotverdosti alyumovanadirovannyh sloev na seryh chugunah, poluchennyh termodiffuzionnym uprochneniem [Research of microhardness of the aluminium-vanadium-treated layers on grey cast iron, received by thermal-diffusion strengthening]. *Uprochnyaya Tekhnologii i pokrytiy* [Hardening Technologies and Coatings], 2007, no. 5 (29). pp. 18-21 (In Russian).

3. Lobanov V. K., Pashkova G. I. O zakalke tokami vysokoj chastoty krupnyh kolenchatyh valov iz vysokoprochnogo chuguna [On high-frequency current hardening of large crankshafts made of high-strength cast iron]. *Visoki tekhnologiї v mashinobuduvanni* [High Technologies in Machine-Building], 2005, iss. 1(10). pp. 44-48. (In Russian).

4. Lobanov V. K., Bosin E. E., Pashkova G. I. Kombinirovannoe uprochnenie - effektivnyj sposob povysheniya dolgovechnosti kolenchatyh valov moshchnyh transportnyh dizelej [Combined hardening - an effective way to increase the durability of crankshafts of powerful transport diesel engines]. *Rezanie i instrument v tekhnologicheskih sistemah* [Cutting and Tools in Technological Systems], 2004, no. 66, pp. 83-88. (In Russian).

5. Ri E., Kukharenko E., Ri H. Vliyanie prodolzhitel'nosti oblucheniya nano-sekundnymi elektromagnitnymi impul'sami (NEMI) na processy kristallizacii i strukturoobrazovaniya, fiziko-mekhanicheskie i ekspluatacionnye svojstva chuguna SCH 20, modificirovannogo ferrosiliciem [Influence of the duration of irradiation with nano-second electromagnetic pulses (NEMI) on the processes of crystallization and structure formation, physical and mechanical and operational properties of cast iron SCh 20 modified with ferrosilicon]. *Litejshchik Rossii* [Foundry Worker of Russia], 2008, no. 6, pp. 29-33. (In Russian).

6. Mikhalchenkov A. M., Kuzmenko I. V. Povy`shenie iznosostojkosti chugunny`kh detalej antifrikczionny`m natiraniem [Improving the wear resistance of cast iron parts by antifriction rubbing], *Mekhanizacziya i e`lektrifikacziya sel`skogo khozyajstva* [Mechanization and Electrification of Industry], 1999, no. 10, pp. 27-28. (In Russian).

7. Shushkov A. A., Vorobyov V. L., Vakhrushev A. V., Bykov P. V., Bayankin V. Ya. Mekhanicheskie svojstva uglerodistoj stali St.3, obluchennoj ionami argona s razlichnymi plotnostyami ionnogo toka [Mechanical properties of carbon steel St.3 irradiated with argon ions with different ion current densities], *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mezoscopy], 2012, vol. 14, no. 1, pp. 97-105. (In Russian).

8. Воробьев В. Л., Быков П. В., Баянкин В. Я., Шушков А. А., Вахрушев А. В., Орлова Н. А. Изменение механических свойств углеродистой стали Ст. 3 в зависимости от средней плотности тока в пучке при импульсном облучении ионами аргона // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 6. С. 5-9.

8. Vorobyov V. L., Bykov P. V., Bayankin V. Ya., Shushkov A. A., Vakhrushev A. V., Orlova N. A. Izmenenie mekhanicheskikh svojstv uglerodistoj stali St. 3 v zavisimosti ot srednej plotnosti toka v puchke pri impul`snom obluchenii ionami argona [Changes in the mechanical properties of carbon steel St. 3 depending on the average current density in the beam during pulsed irradiation with argon ions]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Processing], 2012, no. 6, pp. 5-9. (In Russian).

9. Шушков А. А., Быков П. В., Воробьев В. Л., Вахрушев А. В., Баянкин В. Я. Исследование физико-механических свойств поверхностных слоев многослойных пленок Ti/Al после ионно-лучевого перемешивания // Химическая физика и мезоскопия. 2021. Т. 23, №2. С. 196-211. https://doi.org/10.15350/17270529.2021.2.18

9. Shushkov A. A., Bykov P. V., Vorobyov V. L., Vakhrushev A. V., Bayankin V. Ya. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svojstv poverkhnostny`kh sloev mnogoslojny`kh plenok Ti/Al posle ionno-luchevogo peremeshivaniya [Study of the physical and mechanical properties of the surface layers of Ti/Al multilayer films after ion-beam mixing]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2021, vol. 23, no. 2, pp. 196-211. (In Russian). https://doi.org/10.15350/17270529.2021.2.18

10. Bykov P. V., Bayankin V. Ya., Cherdyntsev V. V., Vorob'ev V. L., Pechina E. A., Sviridova T. A., Shushkov A. A., Chukavin A. I., Alexandrova S. S. Effect of Aluminum Ion Irradiation on Chemical and Phase Composition of Surface Layers of Rolled AISI 321 Stainless Steel // Metals, 2021, vol. 11, iss. 11, 1706, pp. 1-17. http://dx.doi.org/10.3390/met11111706

10. Bykov P. V., Bayankin V. Ya., Cherdyntsev V. V., Vorob'ev V. L., Pechina E. A., Sviridova T. A., Shushkov A. A., Chukavin A. I., Alexandrova S. S. Effect of Aluminum Ion Irradiation on Chemical and Phase Composition of Surface Layers of Rolled AISI 321 Stainless Steel. *Metals*, 2021, vol. 11, iss. 11, 1706, pp. 1-17. http://dx.doi.org/10.3390/met11111706

11. Головин Е. Д., Степанова Н. В., Чумаченко А. Ю., Самейщева Т. С., Лосинская А. А., Гонтаренко А. С., Кузнецов В. А. Применение нанопорошков для модифицирования серого чугуна СЧ 20 // В сб.: Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 9-й Всероссийской научно-практической конференции. 2011. С. 200-202.

11. Golovin E. D., Stepanova N. V., Chumachenko A. Yu., Sameishcheva T. S., Losinskaya A. A., Gontarenko A. S., Kuznetsov V. A. Primenenie nanoporoshkov dlya modificzirovaniya serogo chuguna SCh 20 [The use of nanopowders for the modification of gray cast iron SCH 20 (rus.)]. *V sbornike: Problemy` povy`sheniya e`ffektivnosti metalloobrabotki v promy`shlennosti na sovremennom e`tape* [Proc. Problems of Increasing the Efficiency of Metalworking in Industry at the Present Stage], 2011. pp. 200-202. (In Russian).

12. Рудницкий Ф. И., Куликов С. А., Шумигай В. А. Повышение прочности серого чугуна путем введения в расплав дисперсных добавок // Литье и металлургия. 2018. № 3 (92). С. 43-49. https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-3-43-49

12. Rudnitsky F. I., Kulikov S. A., Shumigai V. A. Povy`shenie prochnosti serogo chuguna putem vvedeniya v rasplav dispersny`kh dobavok [Increasing the strength of grey cast iron by introducing of dispersed additives into the melt]. *Litiyo i Metallurgiya* [Casting and Metallurgy], 2018, vol. 3 (92), pp. 43-49. (In Russian). https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-3-43-49

13. Гоголинский К. В. Средства и методы контроля геометрических параметров и механических свойств твердых тел с микро- и нанометровым пространственным разрешением: дисс. докт. техн. наук. СПб., 2015. 264 с.

13. Gogolinskiy K. V. *Sredstva i metody` kontrolya geometricheskikh parametrov i mekhanicheskikh svojstv tverdykh tel s mikro- i nanometrovy`m prostranstvennym razresheniem* [Means and methods of control of geometric parameters and mechanical properties of solids with micro- and nanometer spatial resolution]. Diss. dokt. tekhn. nauk. St. Petersburg, 2015. 264 p. (In Russian).

14. Шугуров А. Р., Панин А. В., Оскомов К. В.Особенности определения механических характеристик тонких пленок методом наноиндентирования // Физика твердого тела. 2008. Т. 50, № 6. С. 1007-1012.

14. Shugurov A. R., Panin A. V., Oskomov K. V. Specific features of the determination of the mechanical characteristics of thin films by the nanoindentation technique. *Physics of the Solid State*, 2008, vol. 50, no. 6, pp. 1050-1055. https://doi.org/10.1134/S1063783408060097

15. Панин А. В., Шугуров А. Р., Оскомов К. В. Определение твердости и модуля упругости твердых пленок Ti и TiO_2 // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9, № S1. С. 119-122.

15. Panin A. V., Shugurov A. R., Oskomov K. V. Opredelenie tverdosti i modulya uprugosti tverdy`kh plenok Ti i TiO_2 [Determination of hardness and elastic modulus of thin Ti and TiO_2 films], *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2006, vol. 9, no. S1, pp. 119-122. (In Russian).

16. Oliver W., Pharr G. An Improved Technique for Detemining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments // Journal of Materials Research, 1992, vol. 7, iss. 6, pp. 1564-1583. https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564

16. Oliver W., Pharr G. An Improved Technique for Detemining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments. *Journal of Materials Research*, 1992, vol. 7, iss. 6, pp. 1564-1583. https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564

17. Вахрушев А. В., Шушков А. А. Способ определения модуля упругости Юнга и коэффициента Пуассона материала микро- и наночастиц // Патент РФ № 2297617, 2007.

17. Vakhrushev A. V., Shushkov A. A. Sposob opredeleniya modulya uprugosti Yunga i koeffitsienta Puassona materiala mikro- i nanochastits [Method for determining Young's modulus of elasticity and Poisson's ratio of material of micro- and nanoparticles]. *Patent RU 2297617*, 2007.

18. Хохлова Ю. А., Ищенко Д. А., Хохлов М. А. Индентирование от макро- до нанометрового уровня и примеры исследований свойств материалов с особой структурой // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2017. № 1. С. 30-36. https://doi.org/10.15407/tdnk2017.01.05

18. Khokhlova Yu. A., Ishchenko D. A., Khokhlov M. A. Indentirovanie ot makro- do nano- i primery issledovanii svoistv materialov s osoboi strukturoi [Indentation from macro- to nanometer level and examples of investigation of properties of materials with a special structure]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchii control* [Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing], 2017, no. 1, pp. 30-36. (In Russian). https://doi.org/10.15407/tdnk2017.01.05

19. Шушков А. А., Вахрушев А. В. Методы определения механических свойств наноструктур // Химическая физика и мезоскопия. 2018. Т. 20, № 1. С. 57-71.

19. Shushkov A. A., Vakhrushev A. V. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv nanostruktur [Methods of nanostructures mechanical properties determination]. Khimicheskaya fizika i mezoskopiya [Chemical Physics and Mezoscopy], 2018, vol. 20, no. 1, pp. 57-71. (In Russian).

Поступила 10.03.2022; после доработки 21.03.2022; принята к опубликованию 08.04.2022
Received 10 March 2022; received in revised form 21 March 2022; accepted 08 April 2022

Информация об авторах

Шушков Андрей Александрович, *кандидат технических наук, старший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН; доцент, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: ligrim@mail.ru*

Яникаева Полина Эрнстовна, *магистрант, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация*

Вахрушев Александр Васильевич, *доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация*

Information about the authors

Andrey A. Shushkov, *Cand. Sci.(Eng.), Senior Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS; Assistant Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: ligrim@mail.ru*

Polina E. Yanikayeva, *Master Students, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation*

Alexander V. Vakhrushev, *Dr. Sci.(Phys.-Math.), Professor, Chief Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation*