



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-118-124>
УДК 669.13.017: 620.18

Поступила 17.09.2020
Received 17.09.2020

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ В ВЫСОКОПРОЧНОМ ЧУГУНЕ ПРИ ЕГО ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

М. С. КОВАЛЬКО, А. Т. ВОЛОЧКО, А. В. ЗИЗИКО, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», ул. Купревича, 10, г. Минск, Беларусь. E-mail: kovalko.m@mail.ru
В. В. РУБАНИК, ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», пр. Генерала Лядникова, 13, г. Витебск, Беларусь

В работе рассмотрена возможность интенсификации процессов изотермической выдержки при закалке высокопрочных чугунов за счет использования внешнего источника физического воздействия в виде ультразвуковых волн. Для экспериментальной оценки данного эффекта в условиях лаборатории МиАМ ФТИ НАН Беларуси в тигельной индукционной печи ИСВ 0,004 были отлиты опытные образцы из высокопрочных чугунов. В качестве жидкой охлаждающей среды при закалке использовалась смесь солей NaNO_2 и KNO_3 в соотношении 1:1. Ультразвуковую обработку расплава соли при охлаждении образцов проводили с помощью генератора УЗГ-20–15 совместно с ИТА НАН Беларуси. Механические свойства и структуру обработанных чугунов определяли как в литом состоянии, так и после изотермической закалки.

Для исследования влияния ультразвуковой обработки закалочной ванны на формирование структуры и свойств высокопрочных чугунов при их изотермической закалке был проведен ряд сравнительных экспериментов, заключающихся в охлаждении образцов с 910 до 350 °С с подводом и без использования динамических волн к ванне. С помощью металлографического анализа, измерений твердости и коэффициента трения показано благоприятное воздействие ультразвуковой обработки охлаждающей среды на структуру и свойства, что отражается в повышении равномерности распределения твердости по сечению чугуна и его износостойкости, а также сокращении времени изотермической выдержки до 2 раз.

Ключевые слова. Высокопрочный чугун, ультразвук, изотермическая закалка, аусферрит, превращение, коэффициент трения.
Для цитирования. Ковалько, М. С. Формирование структуры и свойств в высокопрочном чугуне при его изотермической закалке с использованием ультразвука / М. С. Ковалько, А. Т. Волочко, А. В. Зизико, В. В. Рубаник // *Литье и металлургия*. 2020. № 4. С. 118–124. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-118-124>.

STRUCTURE AND PROPERTIES FORMING IN DUCTILE IRON DURING ISOTHERMAL HARDENING USING ULTRASOUND

M. S. KOVALKO, A. T. VOLOCHKO, A. V. ZIZIKO, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10, Kuprevich Str., Minsk, Belarus. E-mail: kovalko.m@mail.ru
V. V. RUBANIK, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus, 13, General Lyudnikov Ave., Vitebsk, Belarus

The paper considers the possibility of intensifying isothermal holding processes during quenching of high-strength cast irons by using an external source of physical impact in the form of ultrasonic waves. For experimental evaluation of this effect in the laboratory of MiAM of the Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, prototypes of high-strength cast irons were cast in an ISV 0.004 crucible induction furnace. A mixture of NaNO_2 and KNO_3 salts in a 1:1 ratio was used as a liquid cooling medium during quenching. Ultrasonic treatment of the salt melt during the cooling of the samples was carried out using an UZG-20–15 generator in cooperation with the ITA of NAS of Belarus. The mechanical properties and structure of the treated cast irons were determined both in the cast state and after isothermal quenching.

To study the effect of ultrasonic treatment of the quenching bath on the formation of the structure and properties of high-strength cast irons during isothermal quenching, a number of comparative experiments were carried out, consisting in cooling the samples from 910 °C to 350 °C with and without the use of dynamic waves to the bath. With the help of metallographic analysis, measurements of hardness and friction coefficient, the beneficial effect of ultrasonic treatment of the cooling medium on the structure and properties is shown, which is reflected in an increase in the uniformity of the distribution of hardness over the cross section of cast iron and in its wear resistance, as well as a reduction in the isothermal holding time by up to two times.

Keywords. Ductile iron, ultrasound, isothermal hardening, ausferrite, transformation, friction coefficient.

For citation. Kovalko M.S., Volochko A.T., Ziziko A.V., Rubanik V.V. Structure and properties forming in ductile iron during isothermal hardening using ultrasound. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 118–124. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-6-124>.

Высокопрочные чугуны находят все большее применение в промышленности благодаря хорошему сочетанию прочностных и пластических свойств, а также относительно низкой себестоимости [1]. Комбинация достаточно высокой прочности (до 1000 МПа и выше) и удовлетворительной пластичности (относительное удлинение до 5–15%) в данных чугунах может достигаться за счет специально проводимой термообработки – изотермической закалки. При закалочном охлаждении до температур промежуточных превращений (300–400 °С) и последующей выдержки в расплавах солей или металлов в высокопрочном чугуне образуются так называемые структуры аусферрита, состоящие из смеси игольчатого феррита и остаточного аустенита. Таким образом, после проведения изотермической закалки структура чугуна состоит из включений шаровидного графита и металлической матрицы в виде феррито-аустенитной смеси [2]. Данное сочетание структурных составляющих и позволяет достигать уникальных для чугунов показателей механических свойств.

При использовании закалки отливок с толщиной стенки более 10 мм рекомендуется использовать чугуны с добавками различных легирующих элементов, увеличивающих их прокаливаемость [3]. В случае изотермической обработки чугунных отливок с небольшими толщинами (менее 10 мм) использование легирования нерентабельно, однако при этом закалка в жидкие среды может сопровождаться некоторыми трудностями. Нагретые до 900 °С отливки могут повышать температуру закалочной ванны расплава металла или соли, причем наибольший градиент температур возникает около границ «отливка-охлаждающая жидкость». В связи с этим приповерхностные слои чугуна закаляются при более высокой температуре, что негативно сказывается на получаемой структуре и свойствах отливки в целом. Для устранения этого явления обычно используют закалочные ванны значительно больших объемов, чем объем закаливаемого чугуна, а также увеличивают время изотермической выдержки для выравнивания температуры по всему объему ванны или же применяют в конструкциях печей-ванн контролируемое охлаждение [4].

Эффективным средством, позволяющим интенсифицировать и ускорить процесс закалки высокопрочных чугунов в жидких охлаждающих средах, может стать ультразвуковая обработка используемых сред. Известно, что распространение динамических волн в жидких средах сопровождается возникновением в них эффектов ультразвуковой кавитации и звукового ветра [5,6]. Данные явления могут быть эффективно использованы для воздействия на тепломассообменные процессы в расплавах солей или металлов при изотермической закалке.

Известно [7], что ультразвуковая обработка жидких охлаждающих сред позволяет разрушать «паровую рубашку» на стадии так называемого пленочного кипения при закалке соответственно, увеличивая скорость теплообмена между закаливаемым материалом и охлаждающей жидкостью. Это приводит к значительному увеличению скорости охлаждения при температурах 500–650 °С, при которых, как правило, устойчивость переохлажденного аустенита минимальна, а также позволяет повысить равномерность закалочного охлаждения.

Звуковой ветер при обработке жидкости также приводит к макроперемешиванию ее объемов, позволяя более быстро выровнять температуру вблизи поверхностей закаливаемых сплавов. Это явление эффективно и при дальнейшей изотермической выдержке, так как приводит к постоянной циркуляции микрообъемов охлаждающей жидкости [7, 8].

Таким образом, изучение влияния ультразвуковой обработки жидких охлаждающих сред при закалке на характер превращения и уровень получаемых свойств в чугунах является весьма актуально.

Методика исследований

В качестве жидкой охлаждающей среды при изотермической закалке использовали наиболее часто применяемую смесь солей 50% NaNO₂ и 50% KNO₃. Также были подготовлены чугунные образцы (методом индукционной плавки) диаметром 30 мм и толщиной 5 мм. Химический состав и микроструктура в литом состоянии исследуемого материала приведены в табл. 1.

Полученные образцы подвергали аустенизации при 910 °С в камерной печи СНОЛ-1,6,2,5.1/11 в течение 20 мин. Дальнейшее закалочное охлаждение и выдержку при 350 °С проводили в расплаве соли в шахтной печи СШО-1.1,6/11 как без использования УЗ колебаний, так и с применением УЗ обработки жидкой среды. УЗ колебания генерировали с помощью генератора УЗГ 20–15 с частотой 22,4 кГц и мощностью 0,7 кВт. Подвод колебаний осуществляли через металлический волновод путем его ввода

Т а б л и ц а 1. Химический состав и микроструктура чугуна

Химический состав						Микроструктура (по ГОСТ 3443–87)
массовая доля элементов, %						
C	Si	Mn	P	S	Mg	ШГф5-ШГд15-ШГр1-ШГ4-П20(Ф80)
3,21	2,43	0,25	0,020	0,007	0,05	

непосредственно в ванну с расплавом соли (рис. 1, *a*). Для оценки кинетики структурообразования чугуна при промежуточном превращении время выдержки образца варьировалось от 1 до 5 мин (по 1 мин на 1 мм сечения).

Твердость исходных и термообработанных при различном времени выдержки образцов измеряли методом Бринелля (ГОСТ 9012–59) в пяти точках (с шагом 6 мм от торца) на поверхности приготовленных шлифов.

Оценку триботехнических свойств проводили путем определения коэффициента трения на испытательном стенде по схеме «сфера (ШХ15) – диск (чугун)» со следующими параметрами: время испытаний – 1800 с, нагрузка – 1,0 Н, радиус трассы трения – 7 мм.

Микроструктуру оценивали на травленных и нетравленных шлифах на металлографическом комплексе МИКРО-200. Травление проводили 4%-ным раствором HNO_3 в этиловом спирте.

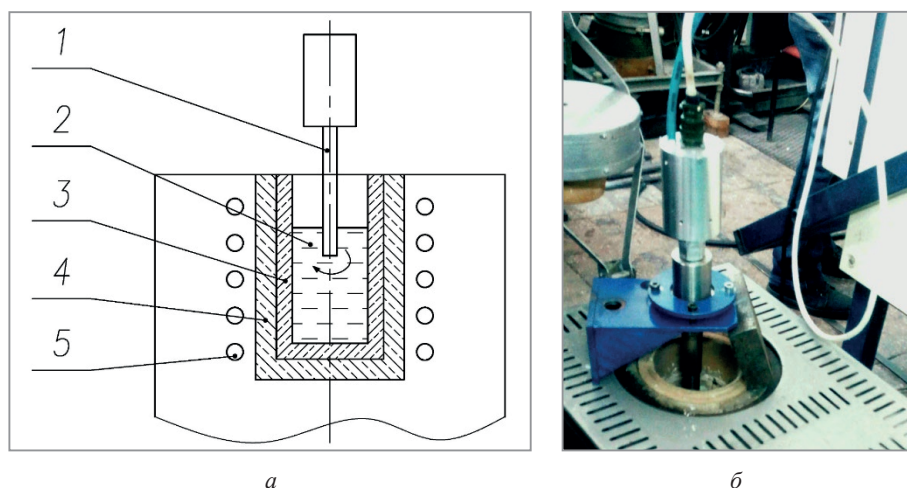


Рис. 1. Схема (*a*) и общий вид (*б*) ультразвуковой обработки расплава соли:
1 – волновод; 2 – расплав соли; 3 – керамический стакан; 4 – футеровка печи; 5 – нагреватели

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены структуры металлической матрицы чугунов, для которых время выдержки при закалке составляло 1 мин.

В случае использования ультразвуковой обработки в структуре отмечается появление ориентации феррита к игольчатому типу (рис. 2, *б*), а его рост происходит перпендикулярно плоскости среза графитового сфероида, что характерно для начала образования аусферритных структур в чугуне. Без применения УЗ обработки охлаждающей среды в матрице заметно преобладают структуры зернистого типа с зернами остаточного аустенита (рис. 2, *a*). Так как структуры зернистого типа в чугуне при закалке образуются при выдержке выше 450 °С, можно заключить, что погружение нагретого до 910 °С в расплав соли способствует повышению температуры ванны вблизи поверхности образца, а сравнительно небольшая выдержка (1 мин) не привела к достаточному выравниванию температуры закалочной среды. Таким образом, следует отметить, что ультразвуковое воздействие позволяет значительно ускорить процесс формирования структур промежуточного типа в чугунах при изотермической закалке уже на ранних стадиях выдержки за счет быстрого выравнивания градиента температур у поверхности обрабатываемого материала и закалочной среды в целом.

Дальнейшее увеличение изотермической выдержки приводит к постепенному возрастанию степени промежуточного превращения (т.е. формирования игольчатых структур феррита в аустенитной матрице). Так, на рис. 3 представлены структуры чугунов после 5 мин выдержки без и с ультразвуковой обработкой.

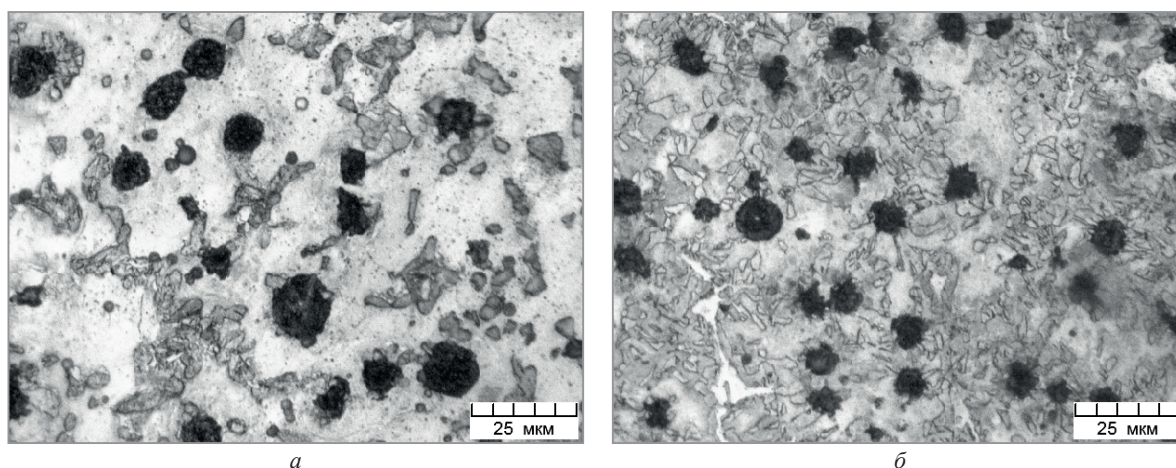


Рис. 2. Микроструктура чугуновых образцов после изотермической закалки без (а) и с УЗ обработкой (б), время выдержки – 1 мин. х500

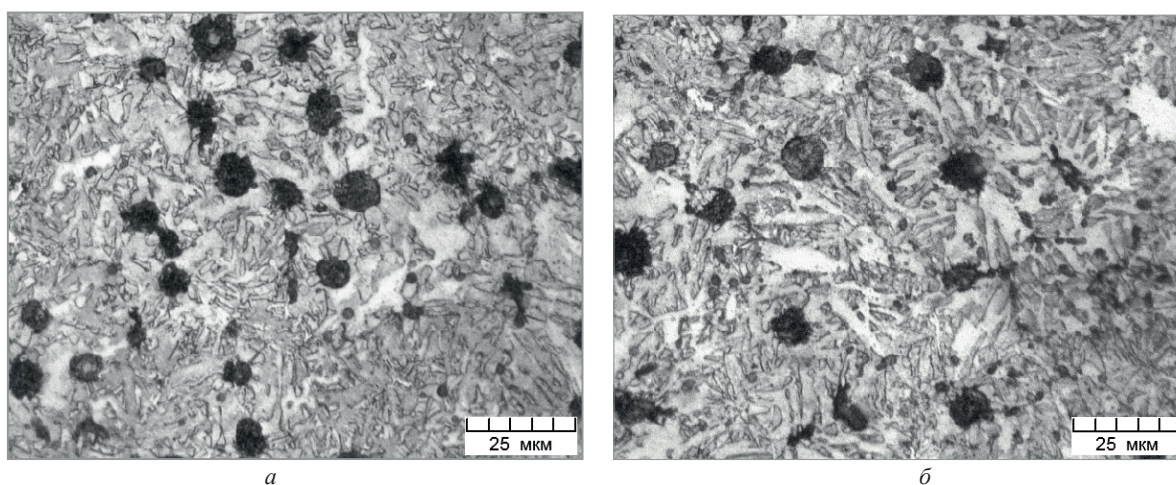


Рис. 3. Микроструктура чугуновых образцов после изотермической закалки без (а) и с УЗ обработкой (б), время выдержки – 5 мин. х 500

В данном случае необходимо отметить, что микроструктура как при обычной, так и при ультразвуковой закалке представляет собой смесь игольчатых структур феррита и остаточного аустенита, отличается лишь степень промежуточного превращения структуры в целом, так как в случае ультразвуковой обработки соли наблюдается более выраженная игольчатая морфология феррита в околографитовых объемах (рис. 3, а). Следовательно, увеличение времени выдержки хоть и приводит к выравниванию температуры в объеме закалочной ванны, но интенсификация процесса охлаждения за счет УЗ обработки позволяет значительно ускорить данный процесс.

Для количественной оценки степени изотермического превращения при различных видах закалки были проведены исследования механических свойств данных образцов. Твердость изотермически закаленных чугунов при различном времени выдержки (с УЗ обработкой и без) приведена на рис. 4.

Как видно из рисунка, при закалке с использованием ультразвуковой обработки закалочной ванны наблюдается более быстрое увеличение и более равномерное распределение твердости чугунов. Ультразвуковые колебания в этом случае создают благоприятные условия для перемешивания объемов охлаждающей среды, что соответственно сказывается на ее охлаждающей способности и твердости закаливаемого материала. Без применения ультразвуковых волн в начальный момент охлаждения образуется так называемая паровая рубашка, препятствующая интенсивному охлаждению поверхности, что сказывается на неравномерной закалке поверхности образца (рис. 4, а). Дальнейшее увеличение времени изотермической выдержки позволяет выровнять твердость по сечению чугуна (рис. 4, з, д), однако уже не приводит к такому же повышению твердости чугуна, как в случае использования ультразвуковой обработки за этот период времени. Применение озвучивания охлаждающей среды позволяет добиться более равномерного охлаждения образца, а также более значительного повышения твердости закаливаемого чугуна при небольшом времени выдержки. Общее изменение твердости

закаленных чугуновых образцов с использованием ультразвука и без в зависимости от времени выдержки показано на рис. 5.

Из рисунка видно, что в целом с постепенным увеличением времени выдержки твердость образцов закаленных без ультразвукового воздействия практически выравнивается с твердостью образцов, закаленных в среде ультразвука. Однако, как отмечалось ранее, за счет интенсификации процесса охлаждения на ранних стадиях выдержки и образования морфологически более совершенных игол феррита время

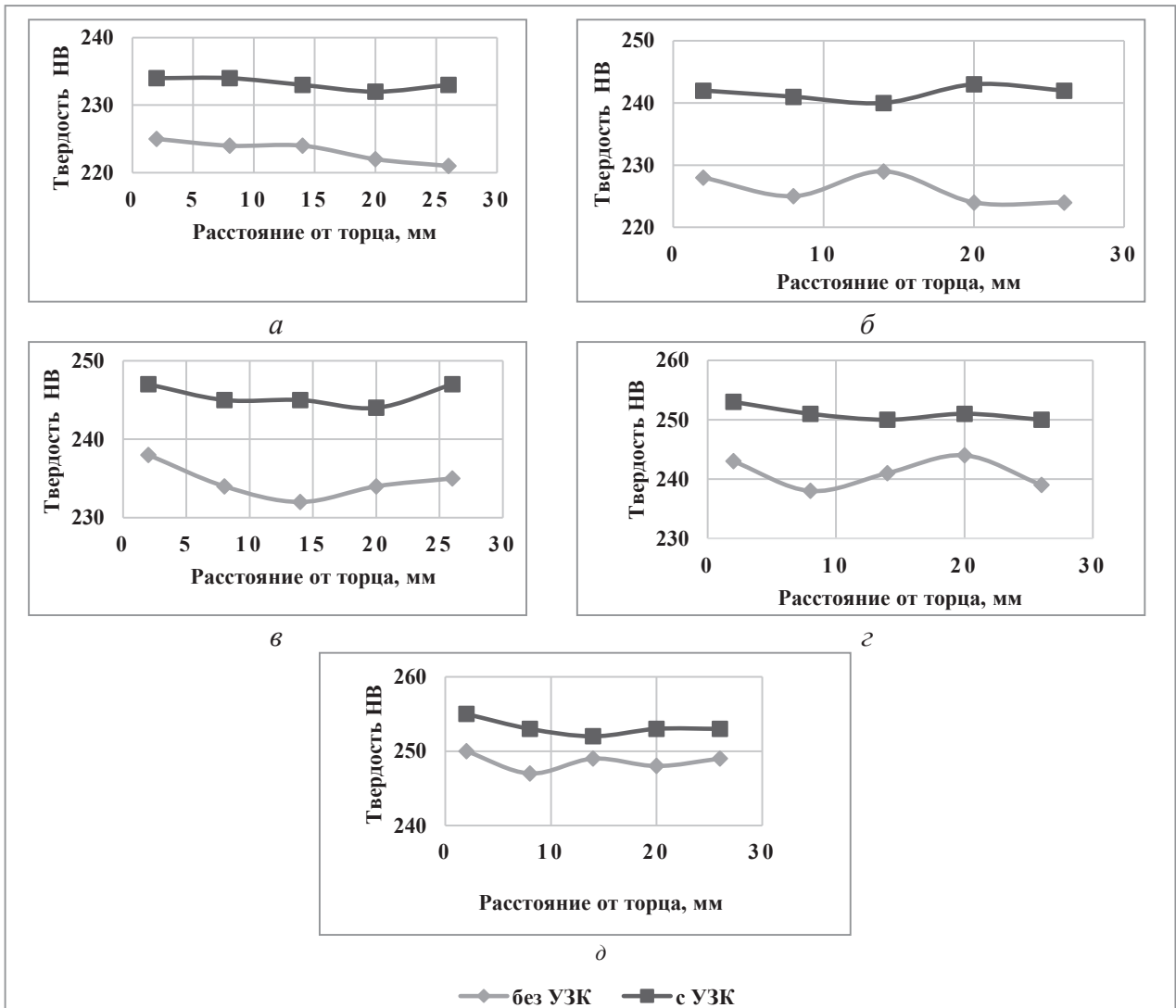


Рис. 4. Изменение твердости в плоскости шлифа изотермически закаленных образцов из высокопрочного чугуна при различном времени выдержки: а – 1 мин; б – 2; в – 3; г – 4; д – 5 мин

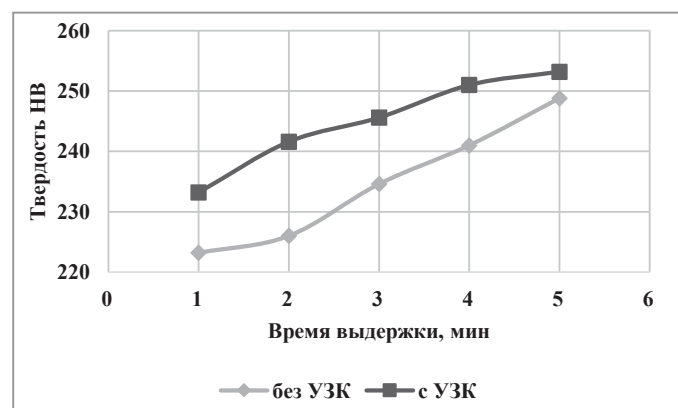


Рис. 5. Изменение твердости различно закаленных чугуновых образцов в зависимости от времени выдержки

изотермической выдержки при использовании УЗ обработки может уменьшаться до 2 раз (твердость 241 НВ достигается через 4 мин, а при дополнительной УЗ обработке ванны уже через 2 мин). На рис. 6 показаны результаты проведенных триботехнических испытаний.

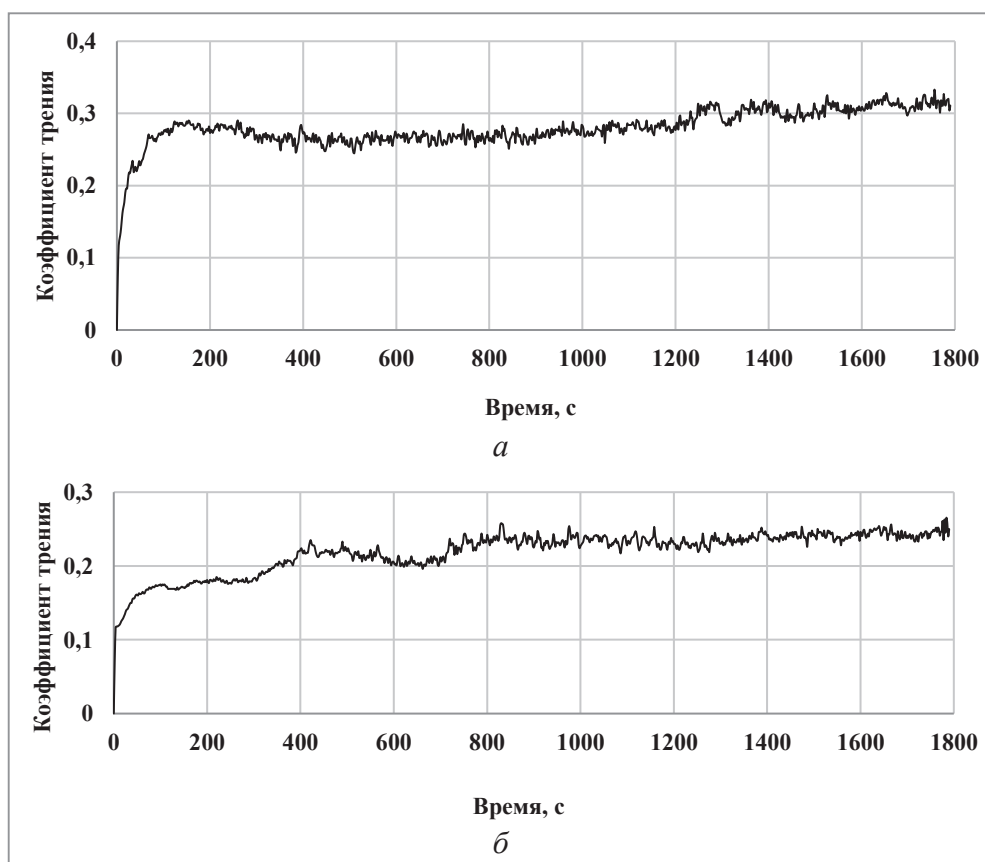


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от времени после изотермической закалки чугуна при 350 °С, 5 мин: а – без УЗ обработки соли; б – с УЗ обработкой соли

По изменению коэффициента трения можно судить о степени изотермического превращения в чугуне, так как известно, что чугуны с аусферритной металлической матрицей обладают более высокими антифрикционными свойствами. Из рис. 6 видно, что в обоих случаях наблюдается начальный участок с существенным приростом коэффициента трения (0–50 с). Данный участок соответствует времени притирки трибопары, причем для чугуна, закаленного без УЗ обработки соли (рис. 6, а), этот период занял больше времени, чем для чугуна, закаленного с УЗ обработкой соли (рис. 6, б). Можно отметить, что использование УЗ обработки расплава соли позволяет снизить коэффициент трения с 0,33 до 0,25 в сравнении с традиционной изотермической закалкой. К тому же значения в этом случае сохраняются на стабильном уровне в узком интервале на всем промежутке времени с 800 с, что говорит об увеличении износостойкости чугунов после ультразвуковой изотермической закалки.

Выводы

1. Использование ультразвуковой обработки охлаждающей среды при изотермической закалке высокопрочных чугунов в соляных ваннах является эффективным средством интенсификации процесса, позволяющим значительно увеличить скорость теплообмена между закаленным чугуном и расплавом соли, что приводит к ускорению аусферритного превращения при 350 °С.
2. Ультразвуковая обработка расплава соли при закалке приводит к более равномерному распределению и увеличению твердости чугуна, снижая при этом уровень закалочных напряжений и коэффициент трения. Получение более высоких показателей свойств при ультразвуковой закалке на более ранних стадиях изотермической выдержки позволяет сократить время термообработки до 2 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ланда, А. Ф.** Основы получения чугуна повышенного качества: состав, структура, термообработка. М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроительной литературы, 1960. 237 с.
2. **Ковалько, М. С.** Анализ возможностей получения аусферритных структур в высокопрочных чугунах без применения жидких охлаждающих сред / М. С. Ковалько, А. Т. Волочко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. В 3-х кн. Кн. 1. Материаловедение. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2018. С. 85–93.
3. Влияние термической обработки на структуру и свойства экономнолегированного высокопрочного чугуна / А. Н. Крутилин [и др.] // Литье и металлургия. 2008. № 1 (45). С. 102–108.
4. **Бобро, Ю. Г.** Изотермическая закалка чугуна / Ю. Г. Бобро, В. М. Пивоваров. Харьков: Прапор, 1968. 112 с.
5. **Эскин, Г. И.** Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия. М.: Металлургия, 1988. 231.
6. **Марукович, Е. И.** Применение ультразвука при литье силуминов в кристаллизатор / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. П. Гутев и др. // МНК «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы». 6–29 сентября 2016 г. Витебск, Беларусь, 2016. С. 34–36.
7. **Биронт, В. С.** Теория термической обработки металлов. Комбинированные методы: учеб. пособ. Красноярск: СФУ: ИЦМиЗ, 2007. 152 с.
8. **Абрамов, О. В.** Ультразвуковая обработка материалов / О. В. Абрамов, И. Г. Хорбенко, Ш. Швегла. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

REFERENCES

1. **Landa A. F.** *Osnovy poluchenija chuguna povyshennogo kachestva: sostav, struktura, termoobrabotka* [The basics of obtaining high quality cast iron: composition, structure, heat treatment]. Moscow, Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noj literatury Publ., 1960, 237 p.
2. **Koval'ko M. S., Volochko A. T.** Analiz vozmozhnostej poluchenija ausferritnyh struktur v vysokoprochnyh chugunah bez primeneniya zhidkikh ohlazhdajushchih sred [Analysis of the possibilities of obtaining ausferritic structures in high-strength cast irons without the use of liquid cooling media]. *Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov. V 3 kn. Kn. 1 = Modern methods and technologies for creating and processing materials: collection of scientific papers*, Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., 2018, pp. 85–93.
3. **Krutilin A. N. et al.** Vlijanie termicheskoy obrabotki na strukturu i svojstva jekonomnolegirovannogo vysokoprochnogo chuguna [Effect of heat treatment on the structure and properties of economically alloyed ductile iron]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2008, no. 1(45), pp. 102–108.
4. **Bobro Ju. G., Pivovarov V. M.** *Izotermicheskaja zakalka chuguna* [Isothermal quenching of cast iron]. Har'kov, Prapor Publ., 1968, 112 p.
5. **Jeskin G. I.** *Ul'trazvukovaja obrabotka rasplavlennogo aljuminija* [Ultrasonic treatment of molten aluminum]. Moscow, Metallurgija Publ., 1988, 231 p.
6. **Marukovich E. I., Stecenko V. Ju., Gutev A. P., Rubanik V. V., Lucko V. F.** Primenenie ul'trazvuka pri lit'e siluminov v kristallizator [The use of ultrasound when casting silumins into a crystallizer]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Tehnicheskaja akustika: razrabotki, problemy, perspektivy»* 6–29 sentjabrja 2016 g. Vitebsk, Belarus' [Materials of the International Scientific Conference “Technical acoustics: developments, problems, prospects” (September 6–29, 2016 Vitebsk, Belarus)]. UO «VGTU» Publ., Vitebsk, 2016, pp. 34–36.
7. **Biront V. S.** *Teorija termicheskoy obrabotki metallov. Kombinirovannye metody* [Theory of heat treatment of metals. – Combined methods]. Krasnojarsk, SFU ICMiZ Publ., 2007, 152 p.
8. **Abramov O. V., Horbenko I. G., Shveгла Sh.** *Ul'trazvukovaja obrabotka materialov* [Ultrasonic material processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 280 p.