

УДК 631.3

К. А. ГОГАЕВ¹, Ю. Н. ПОДРЕЗОВ¹, С. М. ВОЛОЩЕНКО¹, К. Э. ГРИНКЕВИЧ¹,
И. В. ТКАЧЕНКО¹, М. В. КОВАЛЕНКО²

¹Институт проблем материаловедения НАН Украины, Украина

²Национальный технический университет Украины «КПИ» им. И. Сикорского,
Украина

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И УСЛОВИЙ НАГРУЖЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗНОСА БЕЙНИТНОГО ЧУГУНА

В работе исследовано влияние температуры на параметры износа бейнитного чугуна. Результаты исследований показали, что сопротивление износу существенно уменьшается при повышении температуры до 50 и 100°С. Особенности износа связывают с влиянием температуры на реализацию TRIP – эффекта. Полученные результаты важны для практического использования, учитывая разнообразие климатических условий при сельхоз работах.

Ключевые слова: статический и динамический износ, температура, бейнитный чугун

Постановка проблематики. Бейнитный чугун в последние годы привлекает повышенное внимание исследователей в связи с его уникальными свойствами сопротивляться усталостному разрушению и износу [1–5]. Среди возможных механизмов, предопределяющих повышенную износостойкость авторы [2; 3] обращают внимание на возможность проявления TRIP (transformation induce plasticity) эффекта – превращения остаточного аустенита в мартенсит под действием пластической деформации. При реализации этого механизма особое значение имеет количество остаточного аустенита в чугуне и, особенно, той его части, которая имеет повышенную склонность к распаду. Согласно литературным данным [6] и нашим предыдущим результатам [7; 8], наиболее подходящим является «средний» бейнит, получаемый после изотермической выдержки при 350°С. Его начальное количество наибольшее (до 38%) и, при этом, он лучше всего распадается при пластической деформации сжатием (примерно пятая часть). Такое поведение обусловлено веской физической причиной – образованием в процессе изотермической выдержки прослоек остаточного аустенита, находящихся в метастабильном состоянии [2; 3]. Превращение 5–7% аустенита в мартенсит оказывается вполне достаточно, для того чтобы значительно повысить его износостойкость.

Анализ литературных источников. Как показано нами в работах [8; 10], при оптимальных режимах изотермической выдержки износостойкость бейнитного чугуна увеличивается втрое (рис.1).

Проявление TRIP эффекта в чугуне, термообработанном по оптимальному режиму, было подтверждено рентгеновскими исследованиями, продемонстрировавшими уменьшение остаточного аустенита при деформации, а также резким увеличением скорости упрочнения при сжатии [8; 9]. Следствием действия этого механизма является резкое повышение твердости в области трения и уменьшения склонности к растрескиванию в деформированной зоне [10].

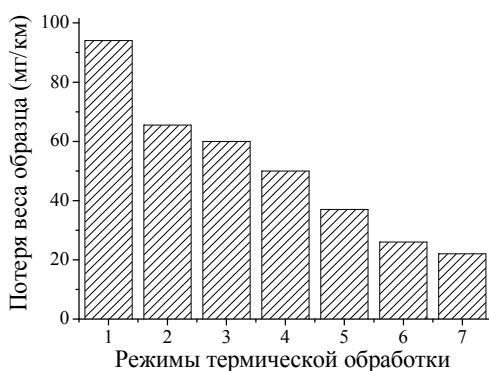


Рис. 1. Износостойкость чугуна после различной изотермической закалки [8; 10]: 1 – закалка в масло с отпуском 320 °С (3 часа); 2 – изотермическая закалка при температуре 310 °С (1 час); 3 – то же, выдержка 2 часа; 4 – то же выдержка 3 часа; 5 – изотермическая закалка 350 °С, выдержка 1 час; 6 – то же самое, выдержка 2 часа; 7 – то же самое, выдержка 3 ч.

В теории TRIP эффекта, активно развиваемой для оптимизации состава и структуры TRIP сталей, особое внимание обращается на температуру деформации [11,12]. Очевидно, что условия максимальной реализации TRIP – эффекта зависят от удельного количества превращенного аустенита, а, следовательно, от положения мартенситных точек и температурно – силовых условий деформирования. В случае бейнитного чугуна, применяемого для изготовления деталей навесного оборудования землеобрабатывающей сельхоз техники, температурные режимы работы изделий непосредственно определяются климатическими условиями. Поэтому исследование влияния температуры на износостойкость бейнитного чугуна актуально как с научной, так и практической точки зрения.

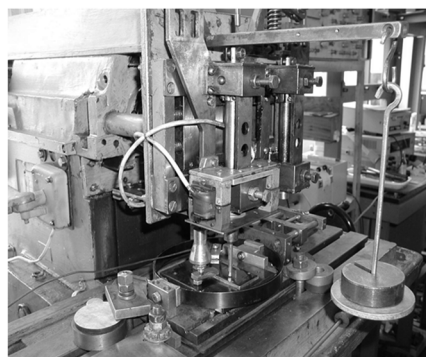
Цель работы – исследование влияния температуры на триботехнические характеристики бейнитного чугуна, склонного к мартенситному превращению под действием деформации.

Материалы и методика исследования. В исследованиях был использован высокопрочный чугун состава: 3,2 – 3,4 % С, 1,4–1,6 % Si, 0,2 – 0,3 % Mn, 0,01 – 0,02 % Cr, 0,18 % Mo, 0,3 % Cu, 0,4 % Ni, 0,02 % P, S < 0,02 %. Шаровидная форма графита была получена модифицированием. Состав модификатора: 7,5 % Mg, 35 % СК25, 17 % Al, 9 % SiBa (20 Ba), 17,5 % Fe, 12 % модификатор-флюс «Рефтокон» и 9% РЗМ (ФС30РЗМ30). Модификаторы, изготавливались прокатыванием порошковых смесей по технологии, описанной в работах [13; 14]. Бейнитная структура создавалась в результате аустенизирующего отжига при 880°С с выдержкой 40 мин и последующей изотермической закалки в жидкое олово при температуре 350°С, выдержка 3 часа.

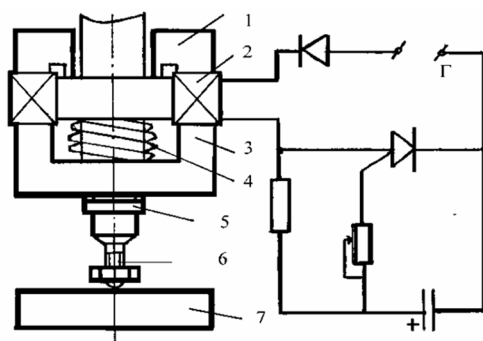
Испытания на износ проводились на автоматизированном трибодинамическом комплексе (АТКД) с модулем динамического нагружения (рис. 2), в условиях квазистационарных и динамических режимах эксплуатации [15; 16].

Вибродинамический модуль состоит из неподвижной части 1, катушки 2 и подвижной части 3 электромагнита, пружины 4, стопорного кольца 5 и генератора электрических импульсов Г. Электрический сигнал с генератора преобразу-

ється електромагнитом в механічні коливання, які з допомогою подвижної частини 3 передаються в зону контакту індентора 6 і зразка 7.



а



б

Рис. 2 Установка АТКД (а) и принципиальная схема модуля динамического нагружения (б)

При испытаниях на износ выбор параметров АТКД осуществляется исходя из условий максимальной унификации условий испытаний по схеме сфера - плоскость. Контактная поверхность индентора представляет собой полусферу с радиусом 8 мм из твердого сплава ВК 8. Возвратно-поступательное скольжение реализовали по поверхности плоских образцов с локальным герцевским контактом и постоянной амплитудой динамической составляющей 30Н (далее – квазистатический режим нагружения СР). В динамическом режиме (ДР) при среднем значении 30Н, моделирующем квазистационарный режим, динамическую составляющую задавали в виде цуга колебаний. Амплитуда динамической составляющей нагружения 5Н, длительность импульсов 5×10^{-2} с, частота – 25 Гц. Усилие 30 Н выбирали, исходя из условий обеспечения максимальной воспроизводимости данных по износу в обоих режимах нагружения. Для обеспечения максимальной точности регистрации силы трения скорость скольжения была выбрана 0,013 м/с. Длительность испытаний составляла 900 с – время, необходимое для приработки и стабилизации силы трения для СР.

Величины линейного износа определяли с помощью профилографа-профилометра «Калибр» К-201. По профилограммам поверхности износа рассчитывались значения показателей: износа (глубина дорожки трения) и пластифицирования, соответственно, при статическом и динамическом режимах. Силу трения рассчитывали по данным трибограмм.

Для схемы испытания сфера – плоскость разработан способ оценки трибологических свойств материалов одновременно при квазистационарном и динамическом режимах нагружения [17; 18]. Предложены следующие критерии оценки механизма разрушения поверхностей трибоконтакта.

Показатель относительной интенсивности динамического изнашивания K_i :

$$K_i = \frac{I_d}{I_c} \frac{I_c}{I_d}, \quad (1)$$

где I_c , I_d – показатели износа плоского образца в областях, соответственно, квазистатического и динамического режимов нагружения, что, как показано на рис. 3, определяются глубиной дорожки трения h .

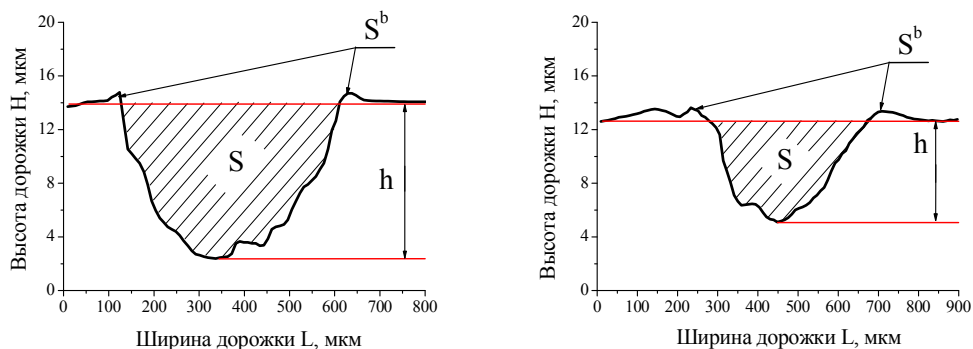


Рис. 3 Поперечная профилограмма дорожки трения при статическом (а), и динамическом (б) режимах испытаний

Показатели пластифицирования $K^{плс}$, $K^{плд}$, определяются как отношение суммарной площади вытесненного материала S^b к площади дорожки трения S (рис. 3):

$$K^{пл} = \frac{S^b}{S}, \quad (2)$$

Значения этих параметров определяли с помощью разработанного пакета программ по данным, полученным профилографированием соответствующих участков дорожки трения.

Результаты исследований. Исследования проводились при температурах 20, 50 и 100°C при статическом и динамическом режимах нагружения. Для исследования влияния приложенной нагрузки при квазистатическом нагружении кроме стандартной нагрузки 30 Н, дополнительно проводились эксперименты при квазистатической нагрузке 100 Н.

Рис. 4 демонстрирует изменение силы трения в зависимости от условий экспериментов.

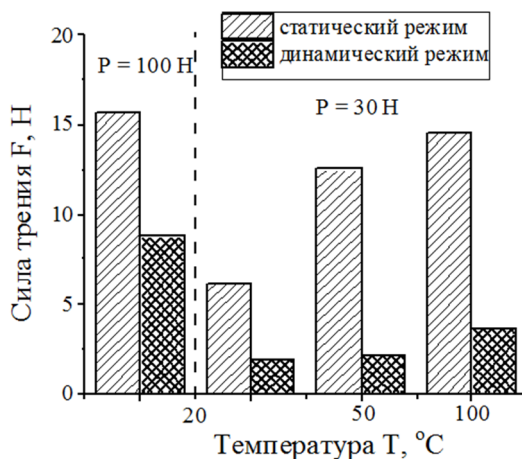


Рис. 4. Сила трения бейнитного чугуна, определенная в статическом и динамическом режимах испытания при температурах 20, 50 и 100 °C и квазистатической нагрузке 30 и 100 Н

Из приведенных данных видно, что сила трения увеличивается с увеличением приложенной нагрузки и с повышением температуры. Величина силы трения

изменяется с нагрузкой значительно сильнее при динамическом нагружении, чем при статическом. В противоположность этому, чувствительность силы трения к температуре более значительная при статическом режиме нагружения.

На рис. 5 представлены данные износа бейнитного чугуна в выбранных условиях экспериментов.

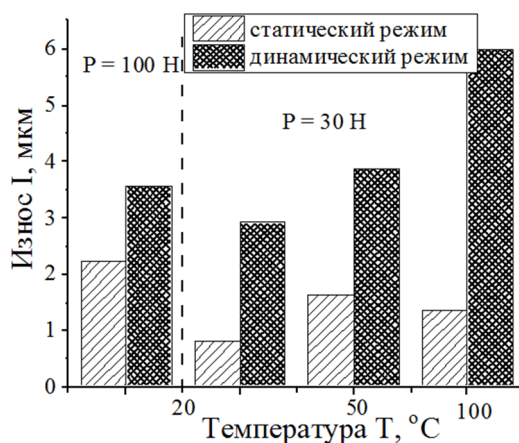


Рис. 5. Износ бейнитного чугуна, определенный в статическом и динамическом режимах испытания при температурах 20, 50 и 100 °C и квазистатической нагрузке 30 и 100 Н

Как отмечалось выше, в этом эксперименте наиболее важным является влияние температурного фактора на процесс изнашивания. Из представленных данных видно, что повышение температуры испытаний от комнатной до 50 °C при статическом нагружении приводит к повышению износа в 2 раза. Этот, казалось бы, неожиданный результат хорошо согласуется с результатами исследования TRIP – эффекта в сталях [19], где показано, что в данном температурном интервале происходят наибольшие изменения свойств. Дальнейшее повышение температуры до 100 °C практически не изменяют значения износа. При динамическом режиме нагружения износ монотонно увеличивается с ростом температуры, причем относительное изменение износа при разных температурах меньше, чем при статическом. По-видимому, ужесточение условий нагружения приводит к более полному протеканию превращения при повышенной температуре.

Этот же фактор влияет на соотношения параметров износа в зависимости от приложенной нагрузки. Если при статике реализуется классический закон: изменение износа пропорционально усилию [20], то при динамике износ образца под действием нагрузки 100 Н лишь незначительно превышает износ под нагрузкой 30 Н.

Важными для понимания механизма изнашивания являются результаты расчета коэффициента пластифицирования (рис. 6).

Прослеживается интересная зависимость параметров пластифицирования от условий деформирования: для статического нагружения при всех температурах он практически равен нулю. Следовательно, износ осуществляется без проявления пластификации по хрупкому механизму. Дорожка трения образуется исключительно за счет выноса материала из зоны контакта.

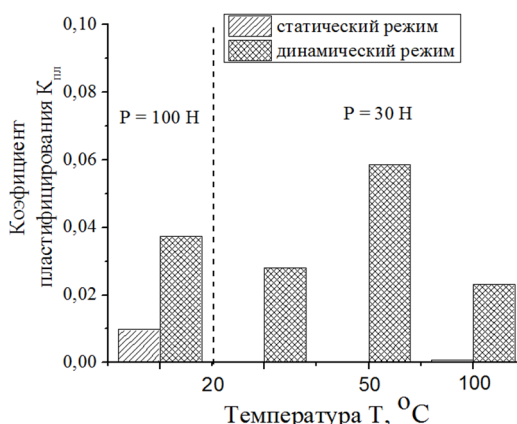


Рис. 6. Коэффициент пластифицирования бейнитного чугуна, определенный в статическом и динамическом режимах испытания при температурах 20, 50 и 100 °С и квазистатической нагрузке 30 и 100 Н

При динамическом нагружении возникает относительно небольшая (меньше 10%) пластическая составляющая, наличие которой может быть связано с увеличением глубины внедрения контртела и образования пластических буртиков. При хрупком механизме изнашивания особую роль играет способность бейнитного чугуна сопротивляться растрескиванию в зоне деформирования [8].

Выводы. Из полученных результатов наибольшего внимания заслуживает зависимость параметров износа от температуры при статическом нагружении, которая свидетельствует о том, что повышение температуры от комнатной до +50 и далее до +100°C приводит к некоторому ухудшению условий работы сельхоз техники. В этом случае можно ожидать практически двукратного уменьшения износостойкости. Обнаруженный эффект коррелирует с известными данными про уменьшение деформационной способности TRIP-материалов при повышении температуры.

Список литературы

1. Нестеренко, А.М. Рентгеноструктурный анализ бейнитной структуры чугунов с шаровидным графитом после аустемперинга в интервале температур сдвигово-диффузионного превращения / А.М. Нестеренко, К.И. Узлов, А.Н. Хулин // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии. – 2010. – Вып. 22. – С. 178-189.
2. Узлов, К.И. Анализ характера разрушения промышленных изделий из высокопрочных бейнитных чугунов в зависимости от структурного состояния их матрицы / К.И. Узлов, В.И. Сухомлин, А.Ю. Борисенко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 4. – С. 73–77.
3. Фирстов, С.А. Закономерности структурообразования матрицы высокопрочных чугунов по ДСТУ 3925 при изотермической закалке / С.А. Фирстов, Ю.Н. Подрезов, Н.И. Даниленко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – № 5. – С. 73–77.
4. Ebrahimpour, S.R. Effect of Different Austempering Temperatures on Wear Properties of Ductile Iron / S.R. Ebrahimpour, A. Abedi, M. Abbasi et al // Tech J Engin & App Sci. – 2013. – V.3 (7). – P. 553-561.
5. Sharma, S. Effect of Austempering Temperature and Time on the Wear Characteristics of Austempered Ductile Iron (ADI) / S.Sharma, R. Gupta // Inter. J of Enging. Res. and General Sci. – 2015. – V.3, iss. 1. – P.986–990.

6. Найдек, В.Л. Бейнитный высокопрочный чугун / В.Л. Найдек, В.П. Гаврилюк, И.Г. Неижко. – К.: Национальная академия наук Украины, ФТМС, 2008. – 140 с.
7. Волощенко, С.М. Термічна обробка лемешів із високоміцного чавуну / С.М. Волощенко, В.І. Ульшин, М.Г. Аскеров та ін. // *Металознавство та обробка металів*. 2009. – № 4. – С. 25–31.
8. Гогаев, К.А. Влияние остаточного аустенита на механические свойства и характеристики износа бейнитного чугуна с шаровидным графитом / К.А. Гогаев, С.М. Волощенко, Ю.Н. Подрезов и др. // *Электронная микроскопия и прочность материалов*. – 2016. – Вып.21. – С. 38–50.
9. Подрезов, Ю.М. Механічні властивості бейнітного чавуну при підвищених температурах // Ю.М. Подрезов, К.О. Гогаєв, О.С. Коряк та ін. // *Электронная микроскопия и прочность материалов*. – 2016. – Вып.21. – С.91–101.
10. Івашук, Т.О. Зміцнення бейнітного чавуну при підвищених температурах / Т.О. Івашук, В.В. Холявко, С.М. Волощенко та ін. // *Металловедение и обработка металлов*. – 2017. – Т.1. – С.17–21.
11. Blondé, R. Mechanical stability of individual austenite grains in TRIP steel studied by synchrotron X-ray diffraction during tensile loading / R.Blondé, E. Jimenez-Melero, L. Zhao et al. // *Materials Science & Engineering*. – 2014. – V.A 618. – P.280–287.
12. Min, J. Plastic instability at elevated temperatures in a TRIP-assisted steel // J. Min, L.G. Hector Jr., L. Zhang et al // *Materials and Design*. – 2016. – V. 95. – P. 370–386.
13. Гогаев, К.А. Технологические принципы получения комплексных композиционных модификаторов методом прокатки порошковых смесей. I Порошковые модифицирующие смеси. Состав, структура свойства / К.А. Гогаев, С.М. Волощенко, Ю.Н. Подрезов и др. // *Порошковая металлургия*. – 2016. – № 5/6. – С.27–37.
14. Гогаев, К.А. Технологические принципы получения композиционных комплексных модификаторов методом прокатки порошковых смесей. III. Методы получения и свойства многокомпонентных прессовок и прокатных полос из порошковых модификаторов разных составов / К.А. Гогаев, С.М. Волощенко, Ю.Н. Подрезов и др. // *Порошковая металлургия*. – 2016. – № 9/10. – С. 3–10.
15. Mil'man, Y.V. Assessment of the in-service degradation of pipeline steel by destructive and nondestructive methods / Y.V. Mil'man, H.M. Nykyforchyn, K.E.Hrinkevych et al // *Materials Science*. – 2012. – V. 47(5). – P.583–589.
16. Mordyuk, B.N. Effects of ultrasonic impact treatment combined with the electric discharge surface alloying by molybdenum on the surface related properties of low-carbon steel G21Mn5 / B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko, K.E. Grinkevych et al // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – V.309. – P.969–979.
17. Зенкин, Н.А. Комплекс диагностической аппаратуры и методология контроля параметров трибосистемы в динамических условиях испытаний / Н.А. Зенкин, К.Э. Гринкевич // *Контроль. Диагностика*. – 2002. – № 6. – С.49–51.
18. Nevshupa, R. TriDes – a new tool for the design, development and non-destructive evaluation of advanced construction steels / R. Nevshupa, E. Roman, K.E. Grinkevych et al // *Materiales de Construcción*. – 2016. – V. 66 (324). – 099.
19. Kovalev, A. Thermodynamic – mechanical modeling of strain-induced α' -martensite formation in Austenitic Cr–Mn–Ni As-Cast Steel / A. Kovalev, M. Wendler, A. Jahn et al // *Adv. Eng. Mater.* – 2013. – V.15. – P.609–617.
20. Fundamental of Friction and Wear of Materials / A.G. Evans, D.B. Marshall. Ed. D.A. Rigney. – American Society for Metals, Metals Park, OH, 1981. – 439 p.

*К. О. ГОГАЄВ, Ю. М. ПОДРЕЗОВ, С. М. ВОЛОЩЕНКО, К. Е. ГРІНКЕВИЧ,
І. В. ТКАЧЕНКО, М. В. КОВАЛЕНКО*

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ТА УМОВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗНОШУВАННЯ БЕЙНІТНОГО ЧАВУНА

В роботі досліджено вплив температури на параметри зношування бейнітного чавуну. Результати досліджень показали, що опір зношуванню суттєво зменшується при підвищенні температури до 50 та 100°C. Особливості зношування пов'язують з впливом температури на реалізацією TRIP – ефекту. Отримані результати є важливими для практичного застосування, враховуючі зміни кліматичних умов при оранці.

Ключові слова: статичне та динамічне зношування, температура, бейнітний чавун

Гогасьв Казбек Олександрович – чл. кор. НАНУ, д-р техн. наук, професор, завідуючий відділу Інститута проблем матеріалознавства НАН України, тел 044 4242155

Подрезов Юрій Миколайович – д-р фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник, завідуючий відділу Інститута проблем матеріалознавства НАН України, podrezov@ipms.keiv.ua тел. 044 4241573

Волощенко Сергій Михайлович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник Інститута проблем матеріалознавства НАН України, тел 044 4242327

Грінкевич Костянтин Едуардович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, ведучий науковий співробітник Інститута проблем матеріалознавства НАН України, kevich@ipms.kiev.ua тел 044 4242429.

Ткаченко Іван Віталійович – науковий співробітник Інститута проблем матеріалознавства НАН України, haudg3sg1@gmail.com тел. 044 4242429.

Коваленко Марина Вадимівна – бакалавр, Національний технічний університет України «КПІ», marinakovalenkosmail@gmail.com

K. O. GOGAEV, Y. M. PODREZOV, S. M. VOLOSCHENKO, I. V. TKACHENKO,
M. V. KOVALENKO

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND LOADING CONDITIONS ON WEAR PARAMETERS OF BAINITIC CAST IRON

In this work it was studied the influence of temperature on the wear parameters of bainitic cast iron. The results have showed that the wear resistance decreases significantly with increasing up to 50 and 100°C. Wear features of bainitic cast iron are related to the implementation of TRIP-effect during deformation. The results of investigation will allow to use, taking into account the different climate and soil conditions of agricultural machinery.

Key words: Static and dynamic wear, temperature, austempered ductile iron.

References

1. Nesterenko, A.M. Rentgenostrukturnyj analiz bejnitnoy struktury chugunov s sharovidnym grafitom posle austemperinga v intervalle temperatur sdvigovo-difuzionnogo prevrashheniya / A.M. Nesterenko, K.I. Uzlov, A.N. Hulin // *Fundamental'nye i prikladnye problemy chjornoj metallurgii*. – 2010. – Vyp. 22. – S. 178-189.
2. Uzlov, K.I. Analiz haraktera razrusheniya promyshlennyyh izdeliy iz vysokoprochnyyh bejnitnyh chugunov v zavisimosti ot strukturnogo sostojaniya ih matricy / K.I. Uzlov, V.I. Suhomlin, A.Ju. Borisenko i dr. // *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*. – 2010. – № 4. – S.73-77.
3. Firstov, S.A. Zakonomernosti strukturoobrazovanija matricy vysokoprochnyyh chugunov po DSTU 3925 pri izotermicheskoj zakalke / S.A. Firstov, Ju.N. Podrezov, N.I. Danilenko i dr. // *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*. – 2012. – № 5. – S.73-77.
4. Ebrahimpour, S.R. Effect of Different Austempering Temperatures on Wear Properties of Ductile Iron / S.R. Ebrahimpour, A. Abedi, M. Abbasi et al // *Tech J Engin & App Sci*. – 2013. – V.3 (7). – P. 553-561.
5. Sharma, S. Effect of Austempering Temperature and Time on the Wear Characteristics of Austempered Ductile Iron (ADI) / S.Sharma, R. Gupta // *Inter. J of Enging. Res. and General Sci*. – 2015. – V.3, iss. 1. – P.986-990.
6. Najdek, V.L. Bejnitnyj vysokoprochnyj chugun / V.L. Najdek, V.P. Gavriljuk, I.G. Neizhko. – K.: Nacional'naja akademija nauk Ukrainy, FTIMS, 2008. – 140 s.
7. Voloshchenko, S.M. Termichna obrobka lemeshiv iz visokomicnogo chavunu / S.M. Voloshchenko, V.I. Ul'shin, M.G. Askerov ta in. // *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*. 2009. – № 4. – S. 25-31.
8. Gogaev, K.A. Vlijanie ostatocznego austenita na mehanicheskie svojstva i karakteristiki iznosa bejnitnogo chuguna s sharovidnym grafitom / K.A. Gogaev, S.M. Voloshchenko, Ju.N. Podrezov i dr. // *Jelektronnaja mikroskopija i prochnost' materialov*. – 2016. – Vyp.21. – S.38-50.
9. Podrezov, Ju.M. Mehanichni vlastivosti bejnitnogo chavunu pri pidvishhenih temperaturah // Ju.M. Podrezov, K.O. Gogaev, O.S. Korjak ta in. // *Jelektronnaja mikroskopija i prochnost' materialov*. – 2016. – Vyp.21. – S.91-101.
10. Ivashhuk, T.O. Zmicnennja bejnitnogo chavunu pri pidvishhenih temperaturah / T.O. Ivashhuk, V.V. Holjavko, S.M. Voloshchenko ta in. // *Metallovedenie i obrabotka metallov*. – 2017. – T.1. – S.17-21.
11. Blondé, R. Mechanical stability of individual austenite grains in TRIP steel studied by synchrotron X-ray diffraction during tensile loading / R.Blondé, E. Jimenez-Melero, L. Zhao et al. // *Materials Science & Engineering*. – 2014. – V.A 618. – P.280-287.
12. Min, J. Plastic instability at elevated temperatures in a TRIP-assisted steel // J. Min, L.G. Hector Jr., L. Zhang et al // *Materials and Design*. – 2016. – V. 95. – P.370-386.
13. Gogaev, K.A. Tehnologicheskie principy poluchenija kompleksnyh kompozicionnyh modifikatorov metodom prokatki poroshkovyh smesej. I Poroshkovye modifizirujushhie smesi.

Sostav, struktura svojstva / K.A. Gogaev, S.M. Voloshhenko, Ju.N. Podrezov i dr. // Poroshkovaja metallurgija. – 2016. – № 5/6. – S.27-37.

14. Gogaev, K.A. Tehnologicheskie principy poluchenija kompozicionnyh kompleksnyh modifikatorov metodom prokatki poroshkovyh smesej. III. Metody poluchenija i svojstva mnogokomponentnyh pressovok i prokatnyh polos iz poroshkovyh modifikatorov raznyh sostavov / K.A. Gogaev, S.M. Voloshhenko, Ju.N. Podrezov i dr. // Poroshkovaja metallurgija. – 2016. – № 9/10. – S. 3-10.

15. Mil'man, Y.V. Assessment of the in-service degradation of pipeline steel by destructive and nondestructive methods / Y.V. Mil'man, H.M. Nykyforchyn, K.E.Hrinkevych et al / Materials Science. – 2012. – V. 47(5). – P.583-589.

16. Mordjuk, B.N. Effects of ultrasonic impact treatment combined with the electric discharge surface alloying by molybdenum on the surface related properties of low-carbon steel G21Mn5 / B.N. Mordjuk, G.I. Prokopenko, K.E. Grinkevych et al // Surface and Coatings Technology. – 2017. – V.309. – P.969-979.

17. Zenkin, N.A. Kompleks diagnosticheskoy apparatury i metodologija kontrolja parametrov tribosistemy v dinamicheskikh uslovijah ispytanij / N.A. Zenkin, K.Je. Grinkevich // Kontrol'. Diagnostika. – 2002. – № 6.– S.49-51.

18. Nevshupa, R. TriDes – a new tool for the design, development and non-destructive evaluation of advanced construction steels / R. Nevshupa, E. Roman, K.E. Grinkevych et al // Materiales de Construcción. – 2016. – V. 66 (324). – 099.

19. Kovalev, A. Thermodynamic - mechanical modeling of strain-induced α' -martensite formation in Austenitic Cr–Mn–Ni As-Cast Steel / A. Kovalev, M. Wendler, A. Jahn et al // Adv. Eng. Mater. – 2013. – V.15. – P.609-617.

20. Fundamental of Friction and Wear of Materials / A.G. Evans, D.B. Marshall. Ed. D.A. Rigney. – American Society for Metals, Metals Park, OH, 1981. – 439 p.