

Брыков М.Н.Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина
E-mail: brykov@zntu.edu.ua**ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ БЕЙНИТА ПРИ АБРАЗИВНОМ ИЗНАШИВАНИИ**

УДК 669.017:620.178.16

Представлены результаты исследований износостойкости сталей со структурой бейнита при абразивном изнашивании. Испытаны стали двух химических составов, которые позволяют получать как феррито-цементитный, так и феррито-аустенитный бейнит. Показано, что увеличение содержания бейнита в исходной структуре высокоуглеродистого нестабильного аустенита снижает износостойкость материала.

Ключевые слова: абразивное изнашивание, стали, бейнит, износостойкость

Актуальность и цель работы

Абразивное изнашивание (АИ) материалов является наиболее жестким процессом разрушения поверхностей при воздействии внешней среды. Элементарное событие АИ – вдавливание в поверхность частицы размером от долей миллиметра до нескольких миллиметров и последующее перемещение под нагрузкой. В результате такого воздействия возможны отделение микрообъема материала с поверхности или ее пластическая деформация. Образуется царапина, выдавленная канавка, что свидетельствует о превышении контактным напряжением предела текучести материала. Следующие взаимодействия этого участка поверхности с другими частицами приводят к повторному деформированию материала и, как следствие, постепенному усталостному разрушению.

Количество циклов повторного деформирования N до разрушения некоторого микрообъема зависит от того, настолько контактные напряжения σ_K превышают предел текучести материала поверхности σ_T . Если σ_K снижаются вплоть до σ_T , то N стремится к величине порядка 10^4 [1]. С увеличением σ_K происходит быстрое уменьшение N вплоть до единицы. В этом случае σ_K находятся на уровне σ_B материала, и микрообъем разрушается при единичном взаимодействии с абразивной частицей [2].

Исследования АИ материалов продолжают уже более ста лет. Важной вехой на этом пути было создание М.М.Хрущовым и М.А.Бабичевым метода испытаний металлических материалов на АИ [3], который позволил воспроизводить процесс АИ в «чистом виде» при исключении незначимых факторов. Позднее метод был стандартизован [4].

Безусловно, этот метод испытаний на АИ - не единственно возможный. Многие исследователи использовали и другие испытательные методики широкого спектра – лабораторные, стендовые, натурные. Большой вклад в исследование АИ различных материалов внесли Б.А.Войнов, В.И.Дворук, В.Г.Ефременко, В.Н.Кашеев, М.В.Киндрачук, Л.Г.Коршунов, Л.С.Малинов, А.В.Макаров, В.С.Попов и Н.Н.Брыков, М.М.Тененбаум, В.Н.Ткачев, М.М.Хрущов и М.А.Бабичев, И.И.Цыпин, В.В.Шевеля, А. Fisher, I.I.Garbar, A.Misra и I.Finnie, R.C.D.Richardson, G.W.Stachoviak, A.A.Torrance, J.H.Tylczak, K.-H. Zum Gahr и др.

В работе [5] определен ряд износостойкости возможных структур металлической матрицы нелегированных сплавов на основе железа при АИ в стандартизованных условиях испытаний по ГОСТ 17367-71 [4]: феррит-мартенсит-аустенит (в порядке увеличения износостойкости). Также показано, что для улучшения технологичности сплава при сохранении высокой износостойкости аустенита необходимо вводить минимально достаточное количество легирующих элементов, а содержание углерода поддерживать на уровне 1,1-1,2%. Предложена сталь состава 1,2 %С и 3 %Mn (120Г3), которая позволяет после закалки от 950-970 °С в масло или воду получить в структуре 100% нестабильного аустенита. После такой обработки материал приобретает максимально возможную износостойкость, на которую способна металлическая матрица.

Таким образом, практическая задача нахождения оптимального износостойкого сплава была решена. Однако с научной точки зрения остается открытым вопрос об износостойкости бейнита – еще одного из возможных структурных состояний металлической матрицы. Износостойкость бейнита интересна также в связи с привлекательным комплексом свойств сталей с такой структурой – высокая прочность в сочетании с удовлетворительной пластичностью [6, 7]. В связи с этим задачей представленной работы была оценка износостойкости сталей с различным количеством бейнита в структуре при АИ.

Методика проведения исследований

Бейнит, как и перлит, является фазовой смесью феррита с цементитом, но несколько отличной морфологии. При определенном химическом составе сплава цементит не образуется, и структура стано-

вится феррито-аустенитной.

Бейнит появляется в результате распада аустенита при температурах выше порога диффузионной подвижности углерода (150-200 °С), но ниже порога диффузионной подвижности железа (500-500 °С). Распад может происходить при непрерывном охлаждении, но если необходимо исключить появление мартенсита в структуре, используют изотермическую выдержку в ваннах определенного состава.

Поскольку сталь 120Г3 после закалки от 950-970 °С содержит в структуре 100% аустенита, появляется возможность проводить обработку по схеме (рис. 1) с изотермической выдержкой в обычных электропечах с воздушной атмосферой. Регулируя температуру и время выдержки можно получать различное количество верхнего или нижнего бейнита. Таким образом, появляется возможность оценить влияние бейнита на износостойкость железоуглеродистых сплавов при АИ.

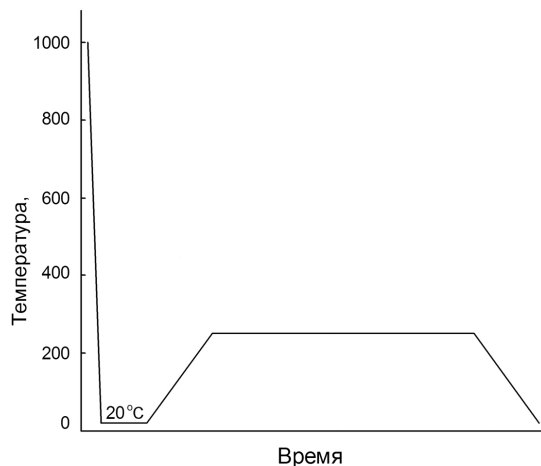


Рис.1 – Схема термической обработки высокоуглеродистых низколегированных сталей на бейнит

Эксперименты проводили на сталях двух химических составов (табл. 1). Изотермическую выдержку осуществляли в печи сопротивления с автоматическим регулированием температуры. Датчик – хромель-копелевая термопара. Микроструктуру образцов после термической обработки исследовали с помощью оптического микроскопа Neophot 32 и растрового электронного микроскопа Ultra 55. Твердость образцов по Виккерсу (нагрузка 98 Н) определяли с помощью твердомера ТВП-5012.

Таблица 1

Химический состав экспериментальных сталей, % масс.

Сталь №	Элементы							
	C	Mn	Si	Cr	Cu	Ni	P	S
1	1.27	3.55	0.35	0.10	0.02	0.07	0.023	0.010
2	1.29	3.51	2.18	0.18	0.05	0.10	0.044	0.005

Испытания закрепленным абразивом проводили с использованием электрокорундового абразивного полотна по ГОСТ 17367-71 [4]. Также проводили испытания сжатым столбом абразива (кварцевый песок) на стенде, имитирующем реальные условия эксплуатации деталей при АИ.

Для сравнения испытывали образцы стали Hardox 450. Данная сталь поставляется в термомеханически упрочненном состоянии и рекламируется производителем как высокоизносостойкий материал для различных условий АИ.

Результаты экспериментов и обсуждение

На первом этапе исследований определяли кинетику бейнитного превращения аустенита стали 120Г3 (сталь №1, см. табл. 1) при температуре 200 °С. Целью было установить принципиальную возможность (с точки зрения длительности выдержки) проведения данной термообработки для сталей с содержанием углерода 1,2%, а также получить максимально возможное количество феррито-цементитного бейнита в структуре.

Образцы стали №1 закаливали от 950 °С в воду. Структура металлической матрицы после такой обработки – аустенит. Твердость составила 260 HV.

Эксперимент показал, что бейнитное превращение аустенита данного химического состава начинается через 5×10^5 с или 5,8 суток. Этап ускоренного превращения заканчивается через 10^6 с (11,6 су-

ток, твердость 550 HV). Затем следует этап превращения со значительно меньшей скоростью, и через 5×10^6 с или 57 суток твердость возрастает до 600 HV. Полученный результат согласуется с известными данными о кинетике изотермического превращения аустенита близкого химического состава при температурах от 250 °C и выше [8].

Структура стали после превращения показана на рис. 2.

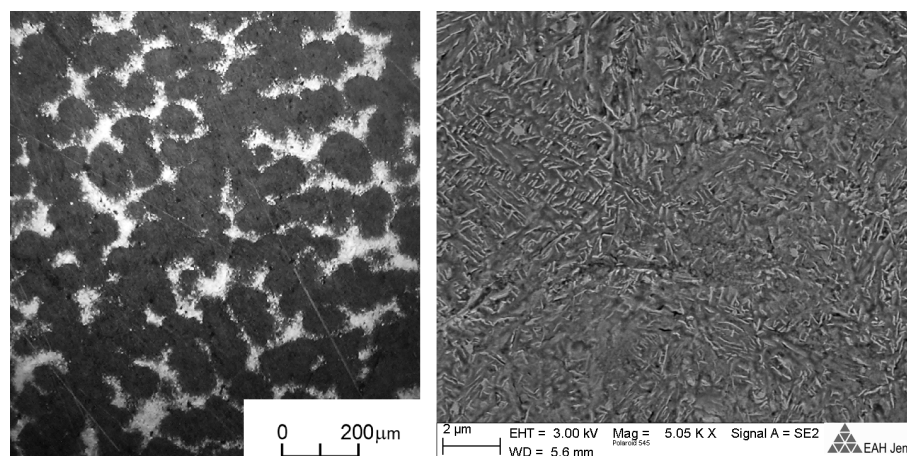


Рис. 2 – Микроструктура стали №1 после закалки от 950 °C и последующей изотермической обработки при 200 °C в течение 5×10^6 с

Вопреки ожиданиям сталь №1 после изотермического превращения (см. рис. 2) весьма хрупка. Образцы покрываются трещинами уже в процессе изотермической выдержки. Поэтому из стали №1 с бейнитной структурой были изготовлены только образцы размерами 2x2x(7...10) мм для испытаний по ГОСТ 17367-71.

Низкую пластичность образцов стали №1 после изотермической обработки при 200 °C можно объяснить повышенным содержанием углерода в бейнитном феррите и большим количеством цементита. Частицы цементита, хотя и малы, но не образуют сплошного упрочняющего каркаса подобно тонкопластинчатому перлиту с малым размером колоний [9]. Прочностные и пластические свойства такого перлита находятся на достаточно высоком уровне [9, 10].

Известно, что кремний в количестве 1,5-2,0% подавляет выделение цементита при изотермическом распаде. Превращение аустенита, содержащего кремний, приводит к образованию фазовой смеси феррита и аустенита, обогащенного углеродом. Именно эта структура обладает повышенными прочностью и пластичностью по данным [6, 7 и др.].

Из стали №2 изготовили образцы размерами 2x2x(7...10) мм для испытаний по ГОСТ 17367-71, а также образец размером 30x90x10 для испытаний на стенде. Образцы стали закаливали от 1000 °C в воду. Выдержка для малых образцов – 5 минут, для большого – 40 минут. Глубина обезуглероженного слоя для малых образцов – около 0,1 мм, для больших – 0,7...0,8 мм. Перед испытанием малые образцы шлифовали с торца на глубину 0,1...0,2 мм, большие – на глубину около 1,0 мм с одной плоскости. Твердость образцов после закалки составила 220-230 HV.

Малые образцы подвергали изотермической выдержке при температуре 250 °C. Установлено, что превращение заканчивается через 8 суток, твердость увеличивается до 300 HV. Структура представлена на рис. 3.

Испытания на АИ по ГОСТ 17367-71 образцов стали №1 и №2 после обработки на бейнит показали, что общей тенденцией является снижение износостойкости материала по сравнению с аустенитной структурой (рис. 4). Для сравнения показан уровень износостойкости неотпущенного мартенсита эвтектоидного состава (сталь У8, закалка) и стали Hardox 450.

Снижение износостойкости сталей №№ 1 и 2 после изотермического распада можно объяснить уменьшением количества нестабильного аустенита в структуре. В стали №1 фактически формируется феррито-цементитная смесь (количество аустенита около 5%), поэтому можно ожидать, что износостойкость этой стали со структурой бейнита при твердости 600 HV соответствует износостойкости других железоуглеродистых сплавов с ферритной основой равной твердости. Действительно, относительная износостойкость белого нелегированного чугуна с содержанием углерода 4,3% в отожженном состоянии при твердости 570 HV обладает относительной износостойкостью 2,4 [5].

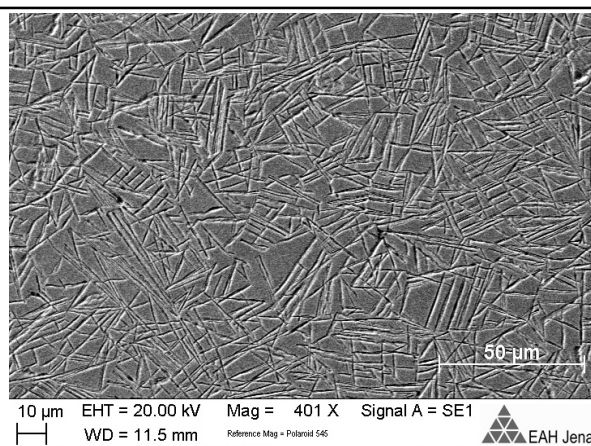


Рис. 3 – Структура стали №2 после закалки от 1000 °С и изотермической выдержки 8 суток при 250 °С

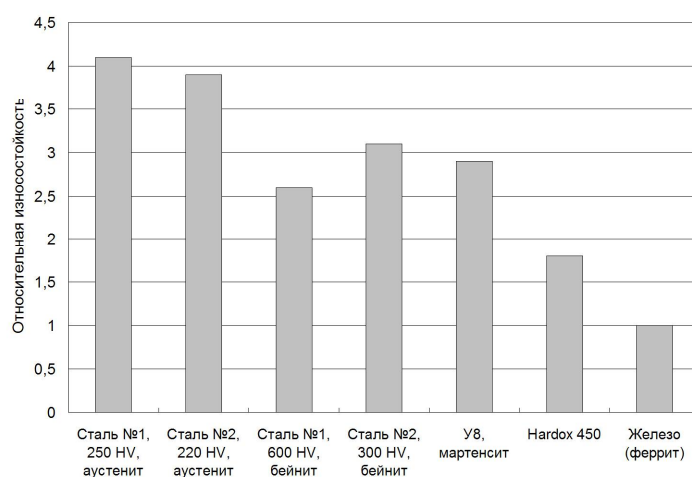


Рис. 4 – Относительная износостойкость различных материалов при АИ в условиях ГОСТ17367-71

В стали №2 количество аустенита снижается не столь значительно, поскольку в процессе γ - α превращения при подавлении выделения цементита аустенит насыщается углеродом и стабилизируется, что приводит к торможению превращения. Поэтому твердость стали после превращения составляет лишь 300 HV при сохранении в структуре 90-95% аустенита. Тем не менее, износостойкость стали №2 после завершения бейнитного превращения снижается достаточно существенно – почти до уровня износостойкости мартенсита (сталь У8 после закалки). Это связано, опять же, со стабилизацией аустенита, поскольку избыточный углерод снижает температуру начала мартенситного превращения.

С другой стороны, износостойкость неотпущенного мартенсита с практической точки зрения достаточно высока. Однако сталь У8 после закалки без отпуска настолько хрупка, что не может быть использована для каких-либо деталей независимо от условий эксплуатации. Любой незначительный удар почти наверняка приводит к хрупкому разрушению. Поэтому сталь У8 после закалки подвергают хотя бы низкому отпуску, что значительно снижает износостойкость мартенсита по сравнению с неотпущенным состоянием.

Тогда преимущества стали №2 после обработки на бейнит становятся значительно более существенными. Поскольку ее износостойкость даже выше, чем у неотпущенного мартенсита, она значительно превосходит по износостойкости мартенсит после низкого отпуска. При этом прочность на изгиб составляет 1500 МПа, относительная деформация до разрушения 4,6%, ударная вязкость КС около 70 Дж/см². Такой уровень свойств позволит использовать данный материал для широкого спектра условий абразивного изнашивания.

Здесь необходимо отметить известный класс материалов – т.н. аусферритные чугуны. Благодаря содержанию кремния на уровне 2% эти чугуны после изотермической выдержки при температурах около 300 °С приобретают матрицу феррито-аустенитного бейнита, что обеспечивает высокий комплекс механических свойств [11]. Фактически структура стали №2 после обработки на бейнит идентична структуре аусферритных чугунов после подобной обработки, но без свободного графита. Дополнительное преимущество данной стали перед чугунами – нет необходимости использовать жидкие ванны различных рас-

плавов для изотермической выдержки, что значительно увеличивает возможные габариты деталей. Также снижается экологический вред от технологического процесса.

Образец стали №2 размером 30x90x10 после закалки от 1000 °С (аустенит) также испытывали на стенде сжатым столбом абразива (кварцевый песок) зернистостью 1,0...1,5 мм. Эталон сравнения – сталь Hardox 450. Испытания показали, что в данных условиях износостойкость стали №2 в три раза и более превышает износостойкость стали Hardox 450. Эти результаты согласуются с данными [12] и позволяют рассматривать сталь 120Г3С2 в качестве перспективного материала для деталей, которые подвержены АИ в процессе эксплуатации, в том числе широкого спектра сменных частей земснарядов, работающих в контакте с грунтом (гранит, песок). В зависимости от условий изнашивания сталь 120Г3С2 можно использовать в аустенитном состоянии (закалка от 1000 °С) или после дополнительной изотермической обработки (250 °С, 8 суток). Несмотря на неудобства такой длительной обработки, пластические свойства материала существенно улучшаются при незначительной потере износостойкости.

Выводы и направления дальнейших исследований

Определена износостойкость высокоуглеродистых низколегированных сталей 120Г3 и 120Г3С2 со структурой бейнита при абразивном изнашивании. Установлено, что увеличение содержания бейнита в структуре стали с исходной аустенитной структурой в любом случае снижает износостойкость. В стали 120Г3С2 в процессе изотермического превращения формируется феррито-аустенитный бейнит, аустенит обогащается углеродом и стабилизируется, что обеспечивает достаточно высокий комплекс механических свойств. Износостойкость такой структуры существенно ниже, чем износостойкость исходного нестабильного аустенита, однако превышает износостойкость высокоуглеродистого неотпущенного мартенсита.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на поиск области рационального использования высокоуглеродистых низколегированных сталей со структурой бейнита и нестабильного аустенита в качестве материала деталей машин, подверженных в процессе эксплуатации абразивному изнашиванию.

Литература

1. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов. Пер. с польского Г. Н. Мехеда. Под ред. В. С. Ивановой. - М. : Металлургия, 1976. - 456 с.
2. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М. М. Тененбаум - М. : Машиностроение, 1976. - 247 с.
3. Хрущов М. М. Исследования изнашивания металлов / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев. - М. : Изд-во АН СССР, 1960. - 352 с.
4. Металлы: Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы : ГОСТ 17367-71. - М. : Изд-во стандартов, 1971. – 5 с.
5. Брыков М. Н. Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании : Научное издание / М. Н. Брыков, В. Г. Ефременко, А. В. Ефременко – Херсон : Гринь Д. С., 2014. – 364 с.
6. Bhadeshia H. K. D. H. Nanostructured bainite / H. K. D. H. Bhadeshia // Proc. R. Soc. A. – 2010. – V. 466. - P. 3-18.
7. Gabarello F. G. Opening previously impossible avenues for phase transformation in innovative steels by atom probe tomography / F. G. Gabarello, M. K. Miller, C. Garcia-Mateo // Materials Science and Technology. – 2014. –V. 30. – P. 1034-1039.
8. Гудремон Э. Специальные стали: в 2-х т. Пер. с нем. - М. : Металлургия, 1966. - 1274 с.
9. Лунев В. В. Резервы повышения пластичности термообработанных высокоуглеродистых сталей / В. В. Лунев, М. Н. Брыков, С. Н. Ткаченко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2013. - №2. – С.60-63.
10. Изотов В.И. и др. Влияние структуры перлитной стали на механические свойства и особенности разрушения при изгибном нагружении // ФММ. - 2009. - Т. 108. -В. 6. - С.638-648.
11. Янченко А. Б. Повышение триботехнических свойств чугунов с мелкозернистым компактным графитом бейнитной закалкой / А. Б. Янченко, В. И. Сауляк // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2012. - № 1. – С. 135-138.
12. Hesse O. Zur Festigkeit niedriglegierter Stähle mit erhöhtem Kohlenstoffgehalt gegen abrasiven Verschleiß / O. Hesse, J. Merker, M. Brykov, V. Efremenko // Tribologie + Schmierungstechnik. – 2013. - № 6. – S.37-43.

Надійшла 18.03.2015

Brykov M.N. Abrasive wear resistance of bainite

The results of investigation on abrasive wear resistance of steels containing bainite are presented. Steels of two chemical compositions are tested: both for ferrite-cementite bainite and ferrite-austenite bainite. It is shown, that if bainite quantity in the structure of steel increases than wear resistance decreases.

Keywords: abrasive wear, steel, bainite, wearproofness.

References

1. Kocan'da P. Uсталostnoe razrushenie metallov. Per. s pol'skogo G. N. Meheda. Pod red. V. P. Ivanovoj. , M. : Metallurgija, 1976, 456 p.
2. Tenenbaum M. M. Soprotivlenie abrazivnomu iznashivaniju , M. M. Tenenbaum , M. : Mashinostroenie, 1976., 247 p.
3. Hrushhov M. M. Issledovaniya iznashivaniya metallov , M. M. Hrushhov, M. A. Babichev, M. : Izd,vo AN SSSR, 1960, 352 p.
4. Metally: Metod ispytaniya na abrazivnoe iznashivanie pri trenii o zakreplennye abraziv,nye chasticy : GOST 17367,71. , M. : Izd,vo standartov, 1971.
5. Brykov M. N. Iznosostojkost' stalej i chugunov pri abrazivnom iznashivanii : Nauchnoe iz,danie , M. N. Brykov, V. G. Efremenko, A. V. Efremenko – Herson : Grin' D, 2014- 364 p.
6. Bhadeshia H. K. D. H. Nanostructured bainite , H. K. D. H. Bhadeshia , Proc. R. Soc. A,2010,V. 466. , P. 318.
7. Gabarello F. G. Opening previously impossible avenues for phase transformation in innovative steels by atom probe tomography , F. G. Gabarello, M. K. Miller, C. Garcia,Mateo , Materials Science and Technology,2014. –V. 30, P. 1034-1039.
8. Gudremon Je. Special'nye stali: v 2,h t. Per. s nem. , M. : Metallurgija, 1966, 1274 p.
9. Lunev V. V. Rezervy povysheniya plastichnosti termoobrabotannyh vysokouglerodistyh sta,lej , V. V. Lunev, M. N. Brykov, P. N. Tkachenko , Novi materiali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni, 2013, No 2, P.60-63.
10. Izotov V.I. i dr. Vlijanie struktury perlitnoj stali na mehanicheskie svojstva i osobennosti razrusheniya pri izgibnom nagruzhennii , FMM. , 2009, T. 108. ,V. 6. , P.638-648.
11. Janchenko A. B. Povyshenie tribotekhnicheskikh svojstv chugunov s melkozernistym kompakt,nym grafitom bejnitnoj zakalkoj , A. B. Janchenko, V. I. Sauljak , Problemi tribologii (Problems of Tribology),2012. , No 1, P. 135-138.
12. Hesse O. Zur Festigkeit niedriglegierter Stähle mit erhöhtem Kohlenstoffgehalt gegen abrasiven Verschleiß , O. Hesse, J. Merker, M. Brykov, V. Efremenko , Tribologie, Schmierungstechnik, 2013, No 6, P.37-43.