

УДК 669.017:620.178.16

О. Хессе¹, М. Кунерт¹, В.Г. Ефременко², К. Шимицу³, М.Н. Брыков⁴, А.Е. Капустян⁴
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, Germany¹

ГВУЗ Приазовский государственный технический университет, Украина²
Muroran Institute of Technology, Japan³

Запорожский национальный технический университет, Украина⁴

ІЗНОСОСТОЙКОСТЬ ОБЕЗУГЛЕРОЖЕННОГО СЛОЯ ВИСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ

В работе исследована абразивная износостойкость обезуглероженного слоя высокоуглеродистой низколегированной стали 120Г3С2 после закалки из однофазной области. Показано, что обезуглероживание поверхностного слоя при термообработке заэвтектоидных сталей может быть полезным явлением в некоторых условиях абразивного изнашивания.

Ключевые слова: заэвтектоидная сталь, абразивное изнашивание, износостойкость, термическая обработка, обезуглероженный слой

О. Хессе, М. Кунерт, В.Г. Ефременко, К. Шимицу, М.Н. Брыков, О.Е. Капустян ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЗНЕВУГЛЕЦЮВАНОВОГО ШАРУ ВИСОКОВУГЛЕЦЕВОЇ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ ТЕРТЯ

В роботі досліджено абразивну зносостійкість зневуглицюваного шару високовуглецевої низьколегованої сталі 120Г3С2 після гартування з однофазної області. Показано, що зневуглицювання поверхневого шару під час термообробки заэвтектоїдних сталей може бути корисним явищем в деяких умовах абразивного зношування.

Ключові слова: заэвтектоїдна сталь, абразивне зношування, зносостійкість, термічна обробка, зневуглицюваний шар

О. Hesse, M. Kunert, V.G. Efremenko, K. Shimizu, M.N. Brykov, A.E. Kapustyan WEAR RESISTANCE OF DECARBURIZED LAYER OF HIGH-CARBON LOW-ALLOY STEEL IN EXTREMAL WEAR CONDITIONS

The wear resistance of a decarburized layer of high-carbon low-alloy steel 120Mn3Si2 after quenching from a single-phase region has been studied. The structure corresponding to a certain concentration of carbon over the depth of the layer is modeled by quenching from different temperatures of the base metal of the samples (grinding to a depth of 1.8 mm). It is established that when abrasion wear by silicon carbide with a grain size of 80 μm, the maximum wear resistance is achieved with an austenite-martensitic structure (quenching from 900 °C). This structure corresponds to the structure at a depth of 0.75-1.00 mm after quenching from 1000 °C. Thus, it has been shown that decarburization of the surface layer during heat treatment of hypereutectoid steels can be a useful phenomenon in some abrasive wear conditions.

Keywords: hypereutectoid steel, abrasive wear, wear resistance, heat treatment, decarburized layer.

Постановка проблеми. Покриття і слої з удосконаленими експлуатаційними характеристиками широко використовуються для захисту деталей обладнання від різних видів руйнування при екстремальних впливах: нагрів, удари, тертя і изнашивание, корозія, кавітація і др. Серед всіх видів екстремальних впливів особе місце займає абразивне изнашивание (АІ) – руйнування поверхності в результаті багаторазового царапання твердыми частинками. АІ підвержені багато деталей горнодобувачого, рудорозмольного, дорожньо-будівельного, пресового обладнання. По даним [1] більше 50% випадків відмов обладнання пов'язано з изнашением, з них 20% приходить на АІ. Незважаючи на майже столітню історію дослідження, проблема АІ матеріалів до нинішнього часу не вирішена.

Аналіз відомих даних і предмет дослідження. Для захисту від АІ часто використовують матеріали з великим кількістю твердої фази. Однак їх висока ціна і невисока надійність в експлуатації обмежують можливість використання.

Одним з альтернативних напрямків підвищення износостойкости матеріалів при АІ є застосування сталей з нестабільною структурою металічної основи, здатної до фазових перетворень при царапанні твердыми частинками. В результаті фазових перетворень поверхність тертя удосконалюється, що в багатьох випадках дозволяє значно підвищити износостойкость [2-4].

Для отримання нестабільного стану і високої износостойкости необхідні високоуглеродисті сталі (около 1,2%С) [5] і закалка від високих температур в діапазоні 900-1200 °С. Такої нагрів необхідний для повного розчинення вуглецю в аустеніті, що знижує температуру початку мартенітного перетворення і зберігає після закалки переважно

аустенитную структуру. Оптимальное сочетание химического состава стали и температуры нагрева под закалку позволяет получить аустенит с температурой начала мартенситного превращения Mn на уровне 20-30 °С. Износостойкость такой структуры при абразивном изнашивании значительно превышает износостойкость закаленных на мартенсит нелегированных и легированных инструментальных сталей. В работе [6] предложен оптимальный состав износостойкой стали – 120Г3С2, которая после закалки от 950-1000 °С позволяет получить высокую износостойкость при АИ за счет эффекта упрочнения.

Однако в процессе нагрева перед закалкой происходит обезуглероживание поверхностного слоя материала на некоторую глубину. Следствием этого является повышение точки Mn и появление мартенсита в структуре после закалки. Чем массивнее деталь, тем больше выдержка при высокой температуре и, естественно, глубже обезуглероженный слой с измененной структурой. Содержание мартенсита после закалки максимально на самой поверхности и постепенно уменьшается с удалением от неё (рис. 1). Для предотвращения обезуглероживания поверхностного слоя необходимо проводить нагрев под закалку в защитной атмосфере, что усложняет оборудование и повышает стоимость процесса термической обработки.

Глубина обезуглероженного слоя может достигать 1 мм и даже более. Это сопоставимо с глубиной измененных слоев, которые специально получают методами химико-термической обработки, например цементацией. Если бы износостойкость измененного приповерхностного слоя стали 120Г3С2 оказалась выше, чем у материала в глубине, то явление обезуглероживания можно было бы считать полезным процессом, сопутствующим термической обработке. Подобный результат был получен в работе [7] для стали 110Г13Л, что явилось дополнительным основанием для проведения нашего исследования.



Рис. 1. - Структура приповерхностной области стали 120Г3С2 после закалки от 1000 °С. Выдержка при температуре нагрева 30 минут

Цель работы – определение влияния обезуглероживания на износостойкость термически обработанной стали 120Г3С2 при абразивном изнашивании.

Материал и методика исследования. Исследования проводили на стали, содержащей 1,20 %С; 2,8 %Mn; 1,8 %Si. Сталь изготовлена в виде полос толщиной 5 мм, шириной 60 мм. Обезуглероженный слой получен в процессе отжига. Глубину обезуглероженного слоя определяли по твердости приповерхностной области на поперечном срезе полосы после закалки от 1000 °С (рис. 2). Видно, что обезуглероживание различной степени произошло на значительную глубину – до 1,8-2,0 мм.

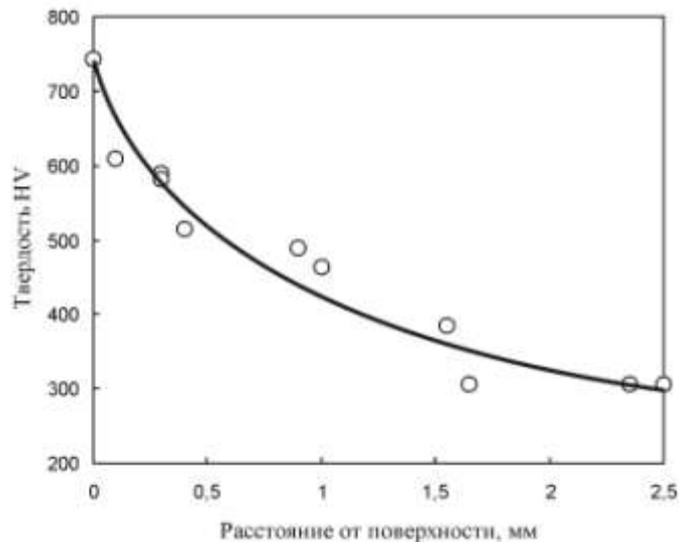


Рис. 2. - Изменение твердости по глубине образца экспериментальной стали после заправки от 1000 °С, выдержка 15 мин

Твердість по Віккерсу виміряли з допомогою твердомера ТВП-5012 при навантаженні 98 Н. Мікротвердість зношеної поверхності зразків виміряли на мікротвердометре FM-300 (Future-Tech) при навантаженні 10 г.

Для проведення випробувань на абразивне зношування вирізали зразки розміром 50 x 50 мм, закалювали від різної температури і шліфували на глибину 1,8 мм. Зношування проводили со шліфованою стороною зразка.

Випробування на зношування закріпленим абразивом проводили на установці Suga NUS-IS03 (Suga Test Instruments Co., Ltd., Japan) (Рис. 3). Абразивна бумага, покрита карбидом кремнію зернистістю 80 мкм, кріпиться на образуючій колеса діаметром 12 мм. Плоский зразок розміром 50x50 мм прижимається до абразивного колеса навантаженням 19,6 Н. За один прохід колесо совершає возвратно-поступательное движение на расстояние 30 мм, зношуючи неподвижний зразок. Після кожного проходження колесо повертається на 0,9 градуса. Після кожних 100 проходжень зразок очищається і вважується на аналітичних вагах з ціною ділення 0,1 мг. Після 400 проходжень (повний оборот диска) абразивна бумага замінюється на нову. Один зразок випробують в течение 2000 проходжень, що відповідає 120 м шляху тертя. Випробування одного зразка повторюються двічі. За результат приймають середню втрату маси за два випробування.

Рентгеновські дифрактограми отримані з допомогою дифрактометра Bruker D8 Discover. Для дослідження мікроструктури використовували оптичний мікроскоп Zeiss Neophot 32.



Рис. 3. - Установка для испытаний на абразивное изнашивание

Результаты. Содержание углерода непрерывно возрастает от поверхности вглубь обезуглероженного слоя. Следовательно, износостойкость закаленных образцов должна значительно изменяться по глубине. Это изменение можно оценить двумя способами.

1. Прямые испытания на изнашивание, начиная с поверхности, с постепенным снятием материала. Необходимо проводить непродолжительные циклы испытаний с измерением износа и толщины образца. Постепенно весь обезуглероженный слой будет изношен, и по набору полученных данных можно определить износостойкость материала по глубине.

Недостаток этого способа – крайне длительные испытания. Даже обычное машинное шлифование, при котором материал удаляется гораздо скорее, чем при испытаниях на изнашивание, занимает много времени.

2. Если образцы стали закалить от различной температуры, то в сердцевине будет получен ряд структур с различным содержанием аустенита. Например, после закалки от 1000 °С в структуре содержится около 90% аустенита (рис. 4), поскольку для стали данного состава точка Мн составляет около 33 °С [6].

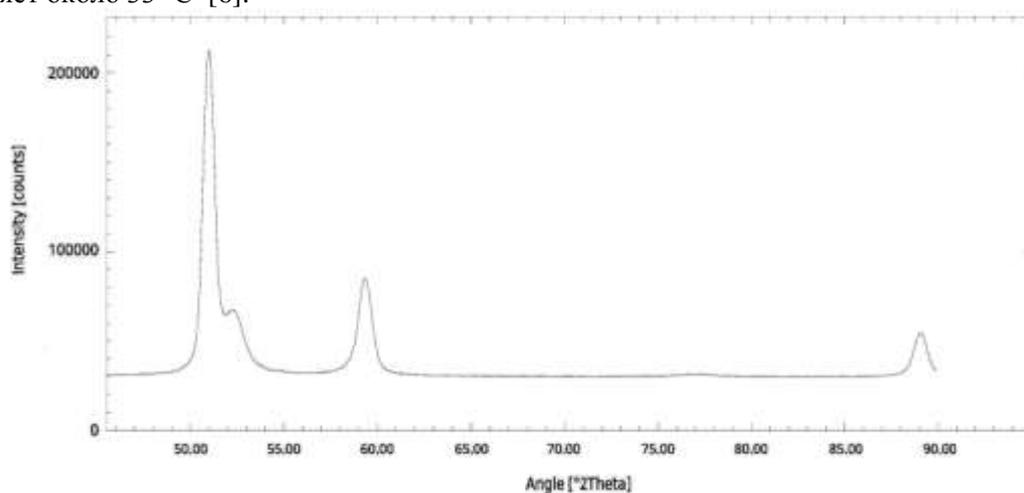


Рис. 4. - Дифрактограмма стали на глубине 1,8 мм от поверхности после закалки от 1000 °С

Уменьшая температуру нагрева под закалку в диапазоне 1000-800 °С, получим набор структур с различным количеством аустенита. Это изменение структуры будет идентично изменению структуры по глубине обезуглероженного слоя (см. рис. 1). Поэтому испытания на АИ образцов после закалки от различной температуры позволяют судить об износостойкости обезуглероженного слоя стали, закаленной от 1000 °С.

Исследования по второму способу можно провести в гораздо более сжатые сроки. Поэтому испытания на АИ были проведены на образцах стали, закаленной от различных температур в диапазоне 1000-800 °С после шлифования на глубину 1,8 мм.

В результате испытаний установлено, что температура закалки значительно влияет на износ образцов (рис. 5).

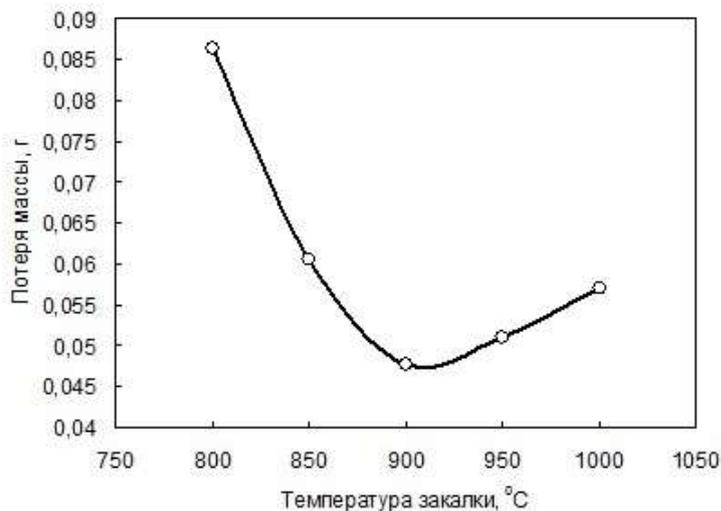


Рис. 5. - Влияние температуры закалки на износ образцов стали 120Г3С2

Минимальный износ получен при закалке от 900 °С. Измерения микротвердости изношенной поверхности образцов, закаленных от различных температур, согласуются с результатами испытаний на изнашивание (табл. 1).

Таблица 1

Микротвердость поверхности трения образцов стали после закалки от различной температуры

t, °С	Измерения										Средняя
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
800	1018	960	1018	960	1018	857	1049	960	932	906	967,8
850	960	1018	1049	1049	932	906	960	932	1018	960	978,4
900	1189	1116	988	1049	1049	1151	1189	1110	1045	1150	1103,6
950	1082	1116	1189	988	1049	1116	1049	1151	1082	1082	1090,4
1000	1116	932	1313	932	1049	960	1049	1082	1116	906	1045,5

Как отмечено выше, при АИ нестабильного аустенита происходят фазовые превращения в поверхностном слое. Это объясняет столь значительное упрочнение – от 300 HV для исходного материала до 1150 HV на изношенной поверхности. Микроструктура изношенной поверхности образцов, закаленных от 1000 °С, показана на рис. 6.

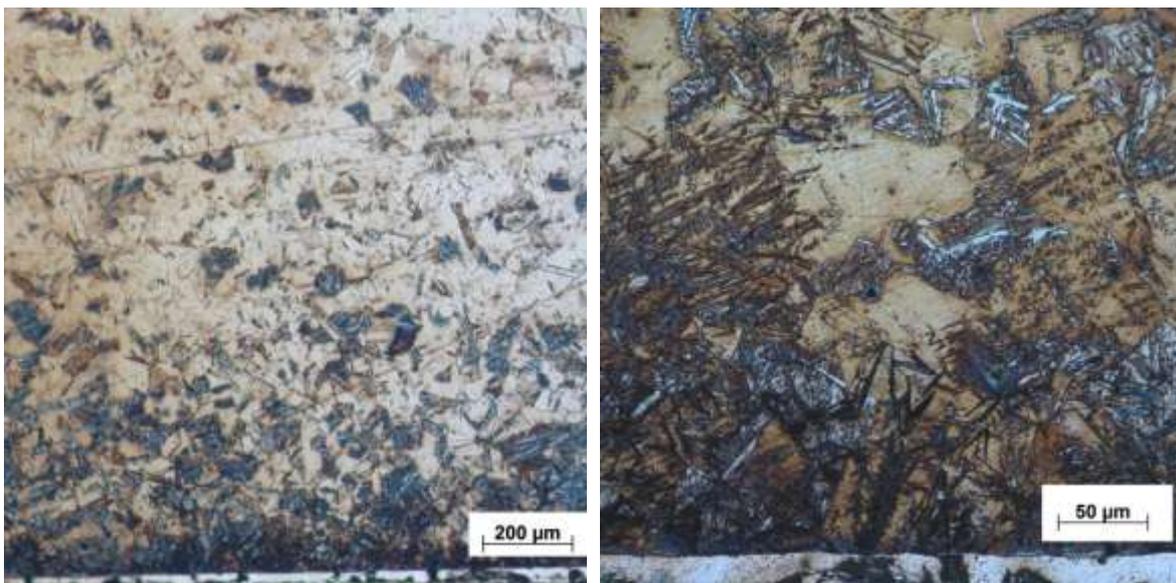


Рис. 6. - Микроструктура изношенной поверхности стали, закаленной от 1000 °С

Результаты испытаний на изнашивание позволяют оценить износостойкость обезуглероженного слоя.

За единицу износостойкости принята износостойкость поверхности, в структуре которой после закалки от 1000 °С содержится максимальное количество мартенсита (твёрдость 750 HV, см. рис. 1). Это соответствует точке максимального износа после закалки от 800 °С на рис. 5.

По мере углубления внутрь обезуглероженного слоя твёрдость снижается, количество аустенита увеличивается, и относительная износостойкость возрастает – рис. 7. Этот вывод справедлив, поскольку по мере увеличения температуры закалки износ на рис. 5 уменьшается, а износостойкость есть величина, обратная износу.

Максимум износостойкости достигается на глубине 0,75-1,00 мм. Структура материала на этой глубине идентична структуре, получаемой после закалки необезуглероженной стали от 900 °С. С дальнейшим увеличением расстояния от поверхности износостойкость незначительно снижается, но все равно остается на гораздо более высоком уровне, чем износостойкость поверхности.

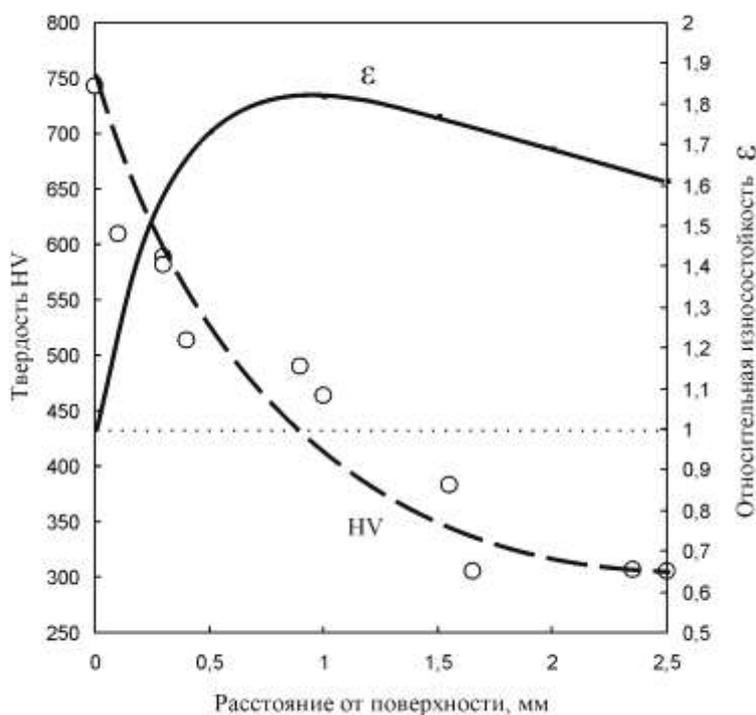


Рис. 7. - Изменение износостойкости стали 120Г3С2 по глубине обезуглероженного слоя. Закалка от 1000 °С

Таким образом, получено распределение относительной износостойкости по глубине обезуглероженного слоя стали 120Г3С2, закаленной от 1000 °С.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Анализ полученной зависимости износостойкости от глубины обезуглероженного слоя стали 120Г3С2 позволяет сделать следующие выводы.

1. В исследованных условиях АИ максимум износостойкости достигается при аустенито-мартенситной структуре, когда соотношение количества аустенита и мартенсита примерно одинаково.

2. Обезуглероживание поверхности высокоуглеродистых сталей при нагреве под закалку не всегда отрицательно влияет на износостойкость. В некоторых условиях АИ может быть получено локальное увеличение износостойкости, что может оказать положительное влияние на общий ресурс работы детали.

3. Вероятно, следует корректировать содержание углерода в износостойких сталях для различных условий изнашивания, поскольку структура с максимальным содержанием аустенита не всегда обладает максимальной износостойкостью.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на исследование износостойкости обезуглероженных слоев высокоуглеродистых сталей в разных условиях изнашивания и корректировку состава износостойких сталей для различных условий эксплуатации.

Литература

1. Jeffrey A. Hawk et al.: Abrasive Wear Failures, in: ASM Handbook Volume 11, Failure Analysis and Prevention, ASM International, Metals Park, pp. 906 - 921, 2002.
2. Schastlivtsev, V. M., Filippov, M. A.: Роль принципа метастабильности аустенита Богачева-Мицца при выборе износостойких материалов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1: 6-9, 2005.
3. Malinov, L. S. Obtaining in steel structure (along with martensite and carbides) metastable austenite to increase wear resistance under abrasive action / L. S. Malinov, I. E. Malysheva // *Университетская наука-2015 : тезисы докладов междунар. науч.-техн. конф., 19-20 мая 2015 г. : в 4-х т. / ГВУЗ «ПТУ»*. – Мариуполь, 2015. – Т. 4. – С. 26-27.

4. Брыков М.Н., Ефременко В.Г., Ефременко А.В.: Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании: Научное издание. - Херсон : Гринь Д.С., 2014. – 364 с.
5. А.Д. Коваль, В.Г. Ефременко, М.Н. Брыков, М.И. Андрущенко, Р.А. Куликовский, А.В. Ефременко. Принципы создания мелющих тел повышенной износостойкости. Часть 1. Износостойкость сплавов на основе железа при абразивном изнашивании // Трение и износ. –Т.33. – №1. – С. 52-61.
6. O.Hesse, J.Liefeith, M.Kunert, A.Kapustyan, M.Brykov, V.Efremenko. Bainit in Stählen mit hohem Widerstand gegen Abrasivverschleiß // Tribologie + Schmierungstechnik. – 2015. - № 2. – S.5-13.
7. Ya. Cheiliakh, O. Cheiliakh, K. Shimizu, T. Noguchi. Application of thermochemical treatment for creation of metastable modifications realizing the effect of selfstrengthening at steel wear // Вісник приазовського державного технічного університету. - Серія: Технічні науки. - 2013. – 27. – С.98-110.

Рецензенты

Ивченко Леонид Иосифович, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» Запорожского национального технического университета, д-р техн. наук, профессор

Перемитько Валерий Викторович, профессор кафедры «Технологии и оборудование сварки» Днепропетровского государственного технического университета, д-р техн. наук

Стаття надійшла до редакції 28.04.2017