

Чейлях А.П.,*
Куцомеля Ю.Ю.,**
Чейлях Я.А.,***
Микула Я.****

* ГВУЗ «Приазовский государственный
технический университет»,
г. Мариуполь, Украина,
**ГВУЗ «Сумской государственный университет»,
г. Сумы, Украина,
***ЦАО «Мариупольский металлургиче-
ский комбинат имени Ильича»,
г. Мариуполь, Украина,
****Краковский технологический
университет им. Т. Костюшко,
г. Краков, Польша
E-mail: alex_edu@epage.ru

ПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО ЧУГУНА

УДК 669.15:621.793.74

Установлены закономерности изменения микроструктуры износостойкого белого чугуна ЧГ5Д2Ф4 при плазменном упрочнении при различных режимах нагрева и оплавления поверхности образцов. При оптимальном фазовом составе и структуре аустенит-мартенсит-карбиды после плазменной закалки при 800 ... 900 °С достигнуто повышение абразивной износостойкости чугуна в 1,3 раза в сравнении с закалкой при печном нагреве. Это объясняется измельчением структуры и метастабильностью аустенита, реализующего деформационное мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращение и самоупрочнение в тонком поверхностном слое.

Ключевые слова: износостойкий чугун, плазменное упрочнение, мартенсит, метастабильный аустенит, карбиды, абразивная износостойкость.

Введение

Создание новых рациональных сплавов и поиск оптимальных технологий их упрочнения является актуальной задачей современного материаловедения. Одной из наиболее перспективных упрочняющих обработок является плазменная технология, использование которой эффективно для поверхностного упрочнения различных изделий [1 - 2], в том числе быстроизнашивающихся деталей и инструмента из чугуна. После плазменного упрочнения (ПУ) они обладают повышенным уровнем свойств и, как более дешевые и технологичные в изготовлении, могут эффективно заменить детали из дорогостоящих высоколегированных материалов [3 - 5]. Однако для плазменной обработки марганцовистых белых чугунов такие данные в литературе отсутствуют. Важно то, что высокая плотность мощности и регулирование продолжительности воздействия при использовании ПУ позволяют получить свойства материала, недостижимые общепринятыми способами термической обработки. Поэтому, исследование и установление закономерностей структурообразования таких износостойких материалов при ПУ, с учетом регулирования степени метастабильности аустенита, представляет значительный научный и практический интерес применительно к указанным чугунам.

Целью работы является изучение закономерностей структурообразования и формирования метастабильного состояния аустенита для повышения износостойкости белого чугуна.

Материал и методика исследований

В качестве материала исследования использован белый износостойкий чугун марки ЧГ5Д2Ф4, содержащий (масс. %): 3,4 С; 1,7 Si; 4,6 Mn; 0,01 S; 0,06 P; 0,2 Cr; 0,03 Ni; 2,2 Cu; 4,0 V, после различных режимов ПУ. Для сравнения проводили стандартную термическую обработку (нормализацию) с печным нагревом (табл.).

Размеры образцов составляли 10×10×50 мм. ПУ проводили, используя плазменный технологический комплекс ГВУЗ «ПГТУ», с плазмотроном косвенного действия с секционированной межэлектродной вставкой, работающим на инертном газе аргоне [1], термическую обработку – в лабораторной электрической печи.

В работе применялся микроструктурный метод исследования с применением инвертированного металлографического микроскопа «Neophot-21» с приставкой KappaImage Base и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) «JEOL / JSM-5500», который был использован также и для изучения распределения химических элементов по сечению упрочненного слоя (энергодисперсионный микроанализ). СЭМ-исследование проводили при ускоряющем напряжении 20 кВ. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 10 г.

Состояние и режимы упрочнения исследованного чугуна ЧГ5Д2Ф4

Вариант обработки	Характеристики упрочнения
I. Исх	литой
II. Исх + ТО	закалка 950 °С (40 мин., охл. на воздухе), отпуск при 250 °С 2 ч.
III. Исх + ПУ	плазменная закалка 800 ... 900 °С
IV. Исх + ПУ	плазменная закалка 1100 °С
V. Исх + ПУО	плазменная закалка 1300 ... 1400 °С со средним оплавлением

Примечание: Исх – исходное состояние; ТО – термическая обработка с печным нагревом; ПУ и ПУО – плазменное упрочнение без оплавления и с оплавлением поверхности соответственно.

Для оценки износостойкости упрочненной поверхности проводили испытания при абразивном изнашивании на установке Хаурта – Бринеля в среде корунда на образцах размером 10×10×25 мм. Упрочненная зона располагалась посередине одной из боковых граней образца, которой он прижимался к прорезиненному валику. Относительную абразивную износостойкость определяли по формуле:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta m_s}{\Delta m_o},$$

где Δm_s и Δm_o – потери в весе образца-эталоны и исследуемого образца за одинаковое время испытаний. В качестве эталона использована сталь 45 в отожженном состоянии (НВ 180). Испытания проводили в течение 70 минут с промежуточным взвешиванием образцов на аналитических весах с погрешностью $\pm 0,0001$ г через каждые 10 минут испытаний.

Результаты исследования и их обсуждение

Особенностью исследованного чугуна ЧГ5Д2Ф4 является метастабильность его структуры, состоящей из аустенитно-мартенситной металлической основы, благодаря стабилизирующему действию почти 6 % Mn, что увеличивает количество аустенита [6], а также присутствием дисперсных карбидов VC. Как установлено в работе [7], в тонких поверхностных слоях чугунов, содержащих метастабильный аустенит, в ходе изнашивания протекают процессы деформационного мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращения (ДМПИ), а также выделения из аустенита и мартенсита высокодисперсных карбидов (динамическое деформационное старение), которые являются причиной высокого сопротивления износу. Износостойкость увеличивается также повышенной способностью марганцевого аустенита к наклепу, связанного с механическим двойникованием и образованием дефектов упаковки, повышением до $\sim 10^{12}$ см⁻² плотности дислокаций в местах контакта с абразивом.

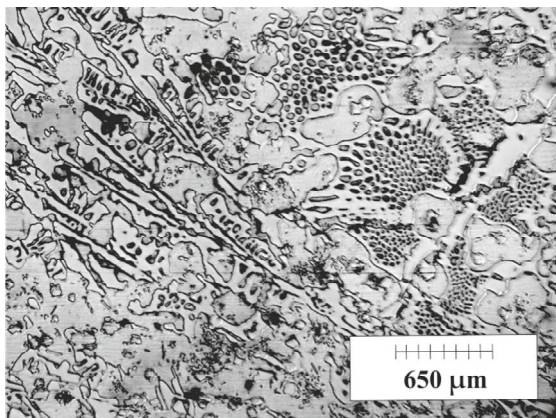


Рис. 1 – Микроструктура чугуна ЧГ5Д2Ф4 после закалки 950 °С, отпуск при 250 °С

Результаты металлографических исследований показали, что микроструктура чугуна ЧГ5Д2Ф4 после стандартной термической обработки с печным нагревом (закалка 950 °С, отпуск при 250 °С) представляет собой преимущественно аустенитную матрицу с включениями карбидов, различающихся морфологическим строением – это разветвленные выделения карбидов цементита первичного и мелкие округлые включения карбидов VC – эвтектику (рис. 1). Твердость чугуна составила HRC47.

При ПУ отдельные слои обрабатываемого участка прогреваются по глубине до различных температур, вследствие чего зона термического воздействия (ЗТВ) имеет слоистое строение [8].

ПУ проводимое по схеме III (см. табл.) вызвало нагрев до 800 ... 900 °С и ускоренное охлаждение за счет теплопроводности, по существу – закалку. Как видно из рис. 2, а, в результате наблюдается измельчение структуры в сравнении с обычной закалкой при печном нагреве. Микротвердость изменяется по глубине зоны термического воздействия плавно: у поверхности она составляет $\sim 2000 \dots 3000$

МПа, на глубине 0,5 мм достигает максимума ~ 5000 МПа, а затем снижается до 3000 МПа. При этом, твердость чугуна после этого режима составила HRC49. Увеличение температуры ПУ до 1100 °С по режиму IV (табл.) качественно изменяет структуру (рис. 2, б), верхний слой которой характеризуется структурной неоднородностью по глубине. В поверхностной зоне произошло растворение карбидов, а нижняя часть характеризуется наличием не растворившихся карбидов. В верхней области наблюдается эвтектическая смесь (А + К) и аустенит. Очевидно γ - твердый раствор насыщен углеродом, что способствует образованию повышенного количества $A_{ост}$. Микротвердость изменяется по глубине ЗТВ по кривой с максимумом: у поверхности она равна 5000 ... 6000 МПа, на глубине 0,8 мм ~ 8000 МПа, а затем снижается до 3000 ... 4000 МПа. Твердость чугуна после этого режима HRC57.

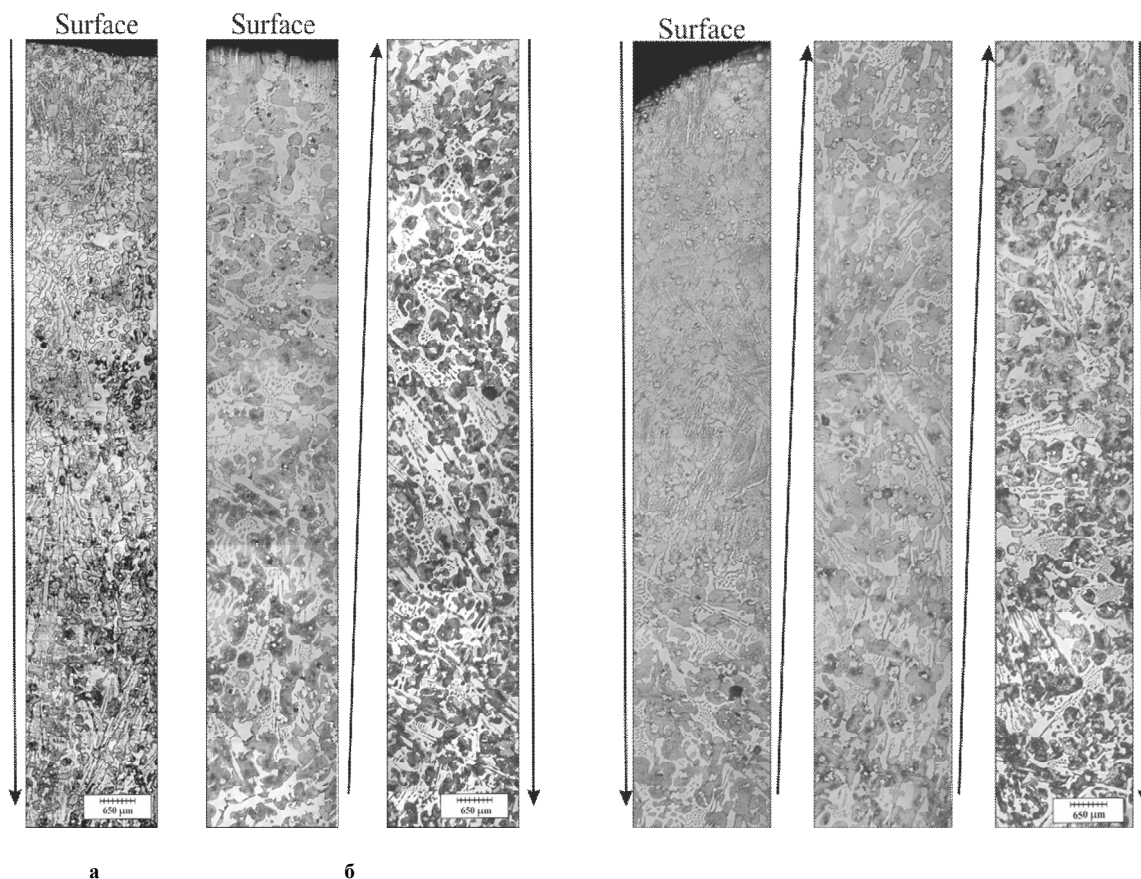


Рис. 2 – Изменение микроструктуры чугуна ЧГ5Д2Ф4 после плазменного упрочнения при температурах:
а – 800...900 °С;

б – 1100 °С (стрелки – от поверхности к центру образцов)

Рис. 3 – Изменение микроструктуры чугуна ЧГ5Д2Ф4 после ПУ при 1300...1400 °С

(стрелки – от поверхности к центру образца)

ПУ с нагревом до 1300 ... 1400 °С по режиму V (см. табл.) со средним оплавлением поверхности образцов марганцовистого чугуна ЧГ5Д2Ф4 вызвала повышение твердости до HRC54. Установлены следующие качественные изменения в структуре (рис. 3). Непосредственно у поверхности - зона оплавления – преимущественно аустенитная с пониженным количеством карбидов. Причиной этого является преимущественное растворение первичного и эвтектического цементита в расплаве, что способствует образованию пересыщенного аустенита. Далее по глубине ЗТВ наблюдается область, имеющая столбчатое строение с кристаллами, вытянутыми в направлении обратном теплоотводу. Следует отметить, что в пределах ледебуритной области наблюдается выделение тонких пластин избыточного легированного цементита, высокой микротвердости - более 10 000 МПа. Далее по глубине расположена зона закалки из твердого состояния, которая характеризуется повышенным количеством аустенита. По глубине данный слой характеризуется структурной неоднородностью: ближе к поверхности наблюдаются дендриты аустенита, карбидные включения и мелкие участки ледебурита. Это характеризуется понижением микротвердости до 6000 МПа. В верхней области твердый раствор перенасыщен углеродом и марганцем, что способствует образованию повышенного количества аустенита. В нижней части ЗТВ его содержание значительно меньше, а преимущественно мартенситно-карбидная структура характеризуется максимальной твердостью более 13000 МПа. Постепенно структура по глубине переходит в исходную, рассмотренную выше (рис. 1).

На образцах чугуна, полученных в различных условиях плазменного упрочнения, была исследована микроструктура и поэлементный состав химических элементов с помощью энергодисперсионного микроскопа «JEOL / JSM-5510LV». Полученные профили распределения химических элементов вдоль заданной линии для структуры чугуна ЧГ5Д2Ф4 после ПУ по режиму IV: закалка 1100 °С (без оплавления) представлены на рис. 4. Элементный состав позволил установить, что образовавшиеся округлой формы включения, отличающиеся характерным серым, слегка светящимся цветом (рис. 4, а), являются сфероидальным карбидом ванадия V_xC так, как энергодисперсионный спектр данных химических элементов имеет достаточно высокую интенсивность. В матрице количество ванадия невелико - светлая и темная фазы имеют очень низкое содержание V, соответственно в карбиде V_xC обнаруживается пониженное содержание марганца по сравнению с твердыми растворами и карбидами Fe_xC (рис. 4, б).

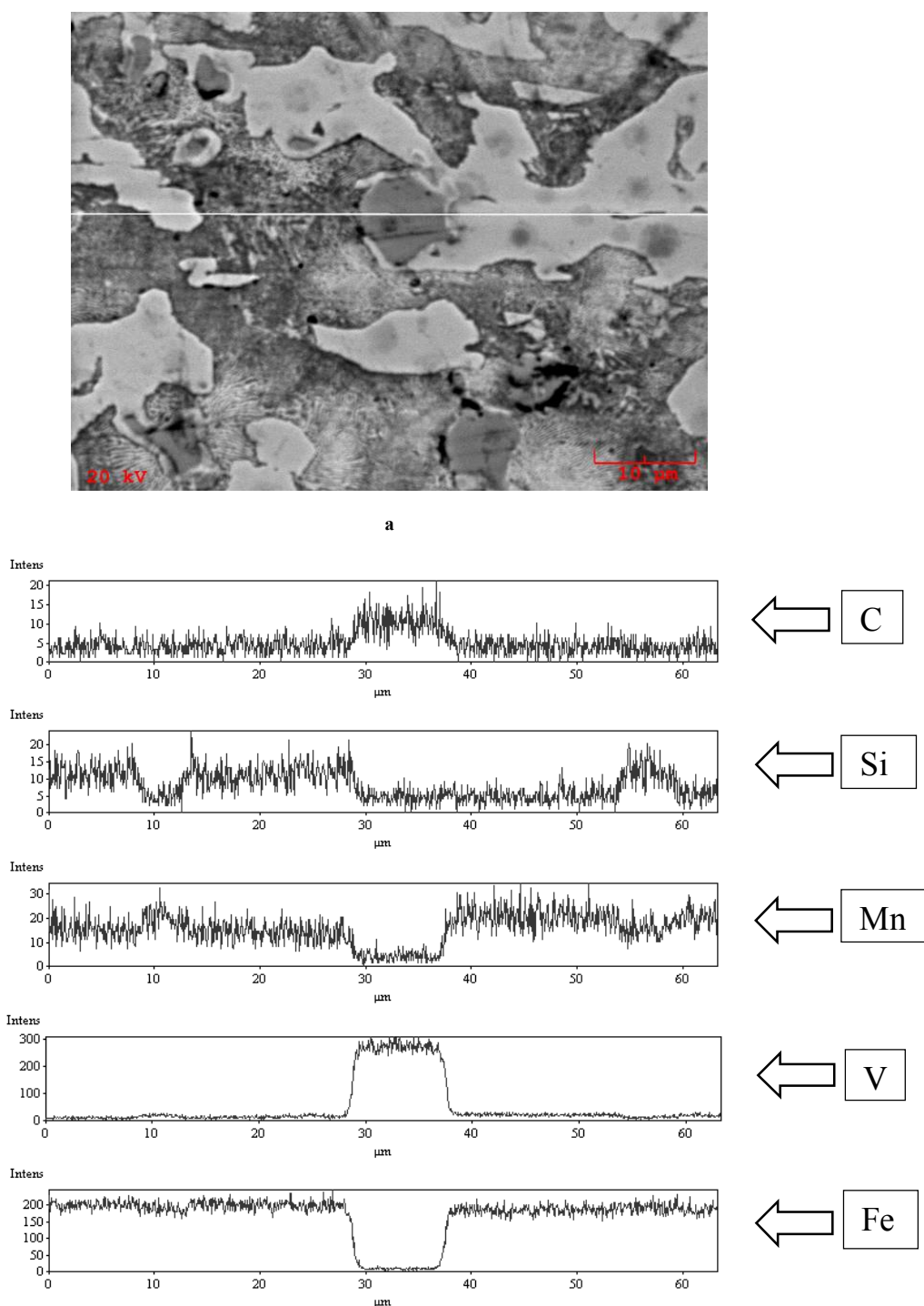


Рис. 4 – Микроструктура чугуна ЧГ5Д2Ф4 после плазменной закалки при 1100 °С (без оплавления) с заданной линией анализируемой области (а); б – профиль распределения химических элементов по заданной линии

При этом, темная фаза содержит Fe, Si, частично Mn и C (по-видимому, эвтектоидная смесь), в ней находятся отдельные мелкие разветвленные выделения. Обращает на себя внимание, что содержание кремния в местах карбидов значительно ниже, чем в твердых растворах, что можно объяснить его способностью к вытеснению углерода из твердого раствора.

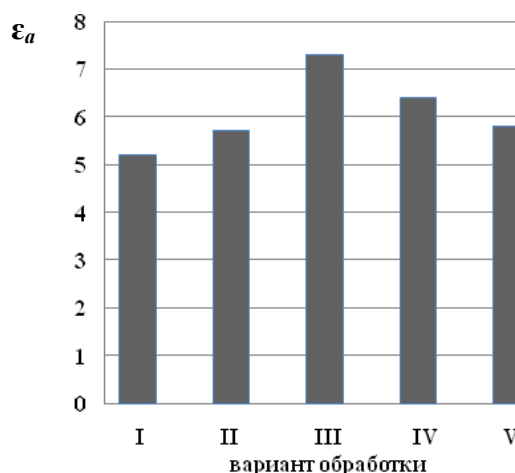


Рис. 5 – Относительная абразивная износостойкость образцов из чугуна ЧГ5Д2Ф4 после плазменного упрочнения (см. табл.)

Зависимость относительной абразивной износостойкости чугуна ЧГ5Д2Ф4 при абразивном изнашивании корундом после плазменной обработки по различным режимам приведены на рис. 5. Испытания показали, что наиболее высокую абразивную износостойкость марганцовистый чугун имеет после плазменной закалки 800 ... 900 °С без оплавления поверхности, которая в 1,3 раза выше по сравнению с исследованным чугуном в закаленном состоянии с печным нагревом. Это можно объяснить получением в ЗТВ сфероидизированных карбидных включений ванадия, которые придают чугуну повышенное сопротивление абразивному и эрозионному изнашиванию благодаря меньшей концентрации напряжений [9] и измельчению аустенитного зерна. Дополнительный вклад в формирование износостойкости вносит метастабильность остаточного аустенита, который претерпевает $\gamma_{ост} \rightarrow \alpha'$ ДМПИ в тонком поверхностном слое образцов. Это вызывает дополнительное самоупрочнение поверхностного рабочего слоя и релаксацию микронапряжений. Кроме того на это превращение расходуется часть механической энергии внешнего воздействия абразива и меньшая ее часть остается на разрушение [7].

Следует заметить, что плазменная закалка чугуна 1100 °С без оплавления также дает хорошие результаты по повышению износостойкости, что соответствует твердости HRC57. Положительную роль в повышении износостойкости в этих случаях играет деформационная метастабильность аустенита, обуславливающая развитие $\gamma \rightarrow \alpha'$ ДМПИ и вызывающее эффект деформационного самоупрочнения в тонком поверхностном слое.

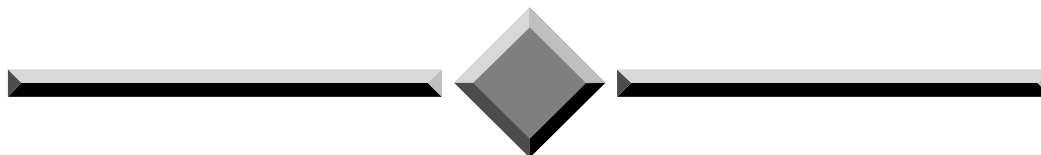
Выводы

1. Плазменная закалка в твердом состоянии при температурах нагрева 800...900 °С формирует и существенно измельчает аустенитно-мартенситно-карбидную структуру чугуна ЧГ5Д2Ф4 с повышенным содержанием метастабильной γ – фазы, обуславливающей развитие $\gamma \rightarrow \alpha'$ ДМПИ и эффект дополнительного самоупрочнения при изнашивании.
2. Плазменная обработка с оплавлением поверхности ($t = 1300 \dots 1400$ °С) обеспечивает дифференциацию микроструктуры чугуна по сечению зоны воздействия с повышенным содержанием метастабильного аустенита.
3. Рентгеновский микроанализ позволил подтвердить наличие сфероидальных карбидов ванадия V_xC , аустенитно-карбидную эвтектику, пониженное содержание кремния в местах расположения карбидов ванадия и цементита в сравнении с твердыми растворами.
4. Плазменное упрочнение чугуна по оптимальному режиму без оплавления поверхности ($t = 800 \dots 900$ °С) обеспечивает повышение его абразивной износостойкости в 1,3 раза, в сравнении с закалкой при печном нагреве.

Литература

1. Самоугин С.С. Плазменное упрочнение инструментальных материалов / С.С. Самоугин, Л.К. Лещинский. – Донецк: Новый мир, 2002. – 338 с.
2. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т.Ю. Степанова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.- Иваново, 2009.– 64 с.
3. Самоугин С.С. Повышение износостойкости высокопрочного чугуна плазменным поверхностным упрочнением / С.С. Самоугин, Л.С. Малинов, Ю.С. Самоугина // Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. праць № 14. – Маріуполь, 2004. – С. 156-160.
4. Самоугин С.С. Анализ напряженного состояния поверхностного упрочненного слоя при плазменной обработке чугуна с шаровидным графитом / С.С. Самоугин, Б.А. Ляшенко, Ю.С. Самоугина // Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. праць № 18. – Маріуполь, 2008. – С. 126-129.
5. Ляшенко Б.А. Плазменная поверхностная модификация белого высокохромистого чугуна / Б.А. Ляшенко, Ю.С. Самоугина // Новітні технології в машинобудуванні. Зб. наук. праць вип. № 2. – Маріуполь, 2010. – С. 140-152.
6. Олійник І. М. Розробка економнолегованих зносостійких чавунів з метастабільним аустенітом і способів управління їх властивостями: дис. ... канд. техніч. наук: 05.16.01. / Олійник Інна Михайлівна. – Маріуполь, 2006. – 148 с.
7. Чейлях А.П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии / А.П. Чейлях. – Мариуполь: ПГТУ, 2009. – 483 с.
8. Лашенко Г. И. Плазменное упрочнение и напыление / Г.И. Лашенко. – К.: – «Екотехнология», 2003. – 64 с.
9. Ефременко В.Г. Межфазное распределение химических элементов в комплекснолегированном белом чугуне / В.Г. Ефременко, А.П. Чейлях, Т.В. Козаревская, К. Шимидзу, Ю.Г. Чабак, А.В. Ефременко // Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. праць № 28. – Маріуполь, 2014. – С. 89-99.

Поступила в редакцію 07.12.2016



Проблеми трибології
“Problems of Tribology”
E-mail: tribosensor@gmail.com

Cheiliakh A.P., Kutsomelya Yu.Yu., Cheilyakh Y.A., Mikula Y. **Plasma hardening wear resistant cast iron.**

The aim of the research is the study of the regularities of structure formation and the formation of metastable austenite condition for increase of wear resistance of white cast iron. Plasma hardening in solid state at temperatures heat up 800 ... 900° c significantly refines the microstructure of cast iron ChG5D2F4 with high content of residual metastable austenite. Plasma processing with melting surface ($t = 1300 \dots 1400$ °C) provides the differentiation of the microstructure of cast iron on the plane of the impact zone with high content of metastable austenite. X-ray microanalysis allowed us to confirm the presence of spheroidal carbides of vanadium V_xC , austenitic-carbide eutectic, low content of Silicon in vanadium carbides and cementite locations in comparison with solid solutions. Plasma hardening of cast iron on the optimal regime without melting the surface ($t = 800 \dots 900$ °C) enhances its abrasive wear resistance in 1.3 times in comparison with the quenching with furnace heating, which corresponds to the austenite-martensite-carbide structure with metastable γ - phase. This is grinding of the structure and metastable austenite realizing deformation induced martensitic $\gamma \rightarrow \alpha'$ transformation and self-strengthening effect in a thin surface layer.

Keywords: The wear-resistant cast iron, plasma hardening, martensite, metastable austenite, carbide, abrasive wear-resistance.

References

1. Samotugin S.S. Plazmennoe uprochnenie instrumental'nyh materialov. S.S. Samotugin, L.K. Leshinskij. Doneck: Novyj mir, 2002. 338 s.
2. Stepanova T.Ju. Tehnologii poverhnostnogo uprochnenija detalej mashin: uchebnoe posobie. T.Ju. Stepanova; Ivan. gos. him.-tehnol. un-t.- Ivanovo, 2009. 64 s.
3. Samotugin S.S. Povyshenie iznosostojkosti vysokoprochnogo chuguna plazmennym poverhno-stnym uprochneniem. S.S. Samotugin, L.S. Malinov, Ju.S. Samotugina. Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehničnogo universitetu. Zb. nauk. prac' № 14. Mariupol', 2004. S. 156-160.
4. Samotugin S.S. Analiz naprjazhennogo sostojanija poverhnostnogo uprochnennogo sloja pri plazmennoj obrabotke chuguna s sharovidnym grafitom. S.S. Samotugin, B.A. Ljashenko, Ju.S. Samotugi-na. Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehničnogo universitetu. Zb. nauk. prac' № 18. Mariupol', 2008. S. 126-129.
5. Ljashenko B.A. Plazmennaja poverhnostnaja modifikacija belogo vysokohromistogo chuguna. B.A. Ljashenko, Ju.S. Samotugina. Novitni tehnologii v mashinobuduvanni. Zb. nauk. prac' vip. № 2. Mariupol', 2010. S. 140-152.
6. Olijnik I. M. Rozrobka ekonomnologovanih znosostijkih chavuniv z metastabil'nim austenitom i sposobiv upravlinnja ih vlastivostjami: dis. ... kand. tehnič. nauk: 05.16.01. Olijnik Inna Mihajlivna. Mariupol', 2006. 148 s.
7. Chejljah A.P. Jekonomnologirovannye metastabil'nye splavy i uprochnjajushhie tehnologii. A.P. Chejljah. Mariupol': PGTU, 2009. 483 s.
8. Lashhenko G. I. Plazmennoe uprochnenie i napylenie. G.I. Lashenko. K.: «Ekotehnologija», 2003. 64 s.
9. Efremenko V.G. Mezhfaznoe raspredelenie himicheskijh jelementov v kompleksno-legirovannom belom chugune. V.G. Efremenko, A.P. Chejljah, T.V. Kozarevskaja, K. Shimidzu, Ju.G. Chabak, A.V. Efremenko. Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehničnogo universitetu. Zb. nauk. prac' № 28.– Mariupol', 2014. S. 89-99.