

Костюк А.И., Семенченко А.И. и др. // Производство стали в XXI веке, прогноз, процессы, технология, экология. – К.: Днепродзержинск, 2000. – С. 12-18.

3. Водородная обработка расплава – как метод снижения водородной пористости отливок из алюминиевых сплавов / Г.П. Борисов, Ф.М. Котлярский // Водородная обработка материалов. – Донецк, ДонГТУ, 2001. – С. 202-204.

4. Влияние термической обработки на структуру и фазовый состав модифицированного сплава АК7ч / В.З. Куцова, Т.А. Аюпова // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – Вып. 42, ч. 1. – Днепропетровск: ПГАСиА, 2008. – С. 10-17.

5. Влияние гидроциркуляционной обработки расплава на формирование структуры и свойств металла

отливок из комплекснолегированного силумина типа АК7ч / В.З. Куцова, Т.А. Аюпова // МиТОМ. – 2009. – № 1. – С. 50-61.

6. Определение предельной степени технологической деформируемости металлов при прокатке клиновидных образцов / А.М. Должанский, В.З. Куцова, Т.А. Аюпова // Metallurg. i горноруд. пром-сть. – 2010. – № 3. – С. 50-52.

7. Пат. 89335 Украина. МКИ⁷ C21 C22/00. Ливарный сплав на основе алюминия / Куцова В.З., Аюпова Т.А., Слагін А.С., Яшук М.М. Заявник та патентотримувач Національна металургійна Академія України, заявл. 25.12.2008; 11.01.2010, Бюл. № 24.

Поступила 18.01.2013

УДК 621.791

Крымов В.Н. /к.т.н./, Алимов В.И. /д.т.н./
Донецкий НТУ

Наука

Особенности поверхностного упрочнения чугуна с графитом дуговым разрядом

Рассмотрено строение серого чугуна после поверхностного упрочнения высококонцентрированными источниками энергии. Проанализированы причины повышения шероховатости поверхности при упрочнении с оплавлением. Изучена структура и измерены краевые углы смачивания закристаллизовавшихся капель расплава на сером чугуне и графите после воздействия дугового разряда. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, серый чугун, высококонцентрированные источники энергии, смачиваемость поверхности, электрическая дуга

We consider the structure of cast iron after surface hardening of highly concentrated energy sources. The reasons for the increase of surface roughness at hardening with fusion. The structure and the measured contact angles crystallized melt droplets on a gray cast iron and graphite after exposure to an arc discharge.

Keywords: surface hardening, gray cast iron, highly concentrated source of energy, wettability of the surface, an electrical arc.

Чугуны с графитом являются перспективным конструкционным материалом для изготовления деталей, которые подвергаются поверхностному упрочнению. Это объясняется возможностью получения износостойкого «отбеленного» слоя, основной структурной составляющей которого является ледебурит. «Отбел» возможен только при обработках, сопровождающихся оплавлением поверхности. При этом наиболее эффективной упрочняющей технологией можно считать воздействие высококонцентрированными источниками энергии (ВИЭ) [1]. Анализ работ, посвященных поверхностному упрочнению серого чугуна с использованием ВИЭ, показывает, что в некоторых из них отмечается необычная особенность строения упрочненной поверхности. Она заключается в резком повышении шероховатости вплоть до кристаллизации металла зоны оплавления в виде отдельных капель. Очевидно, что это делает такую упрочняющую обработку мало применимой.

По-видимому, [2, 4 и др.] были первыми работами, сообщившими о подобном эффекте. Ухудшение качества поверхности при обработке серого чугуна наблюдали при образовании зон оплавления глубиной более 50 мкм. Расплав собирается и кристаллизуется в форме шариков. Такую макроструктуру авторы назвали «зоной оплавления капельного вида» [2, 3]. Во многих более поздних работах этот эффект также, вероятно, замечали, но трактовали неоднозначно [4]. В некоторых публикациях упоминание о нем вообще отсутствует [5]. Это можно объяснить либо небольшой глубиной зоны оплавления, либо игнорированием авторами этой особенности строения упрочненной поверхности.

Исследования по упрочнению чугунов [6] показали, что при обработке дуговым разрядом с использованием графитового электрода наблюдаются такие же закономерности, как и при лазерном воздействии.

Авторы [2, 3] объясняют собирание расплава в зоне оплавления в капли плохой смачиваемостью по-

верхности серого чугуна расплавом «из-за высокого межфазного натяжения». Это является следствием выделения газов, адсорбированных графитными включениями, которые вскрываются фронтом расплавления [2].

При растворении пластинчатого графита серого чугуна действительно выделяется больше адсорбированных газов (главным образом, азота), чем при растворении шаровидного графита [7]. Однако это не объясняет абсолютно нормального строения упрочненной поверхности при обработке с оплавлением высокопрочного или ковкого чугуна.

Нами было высказано предположение, что основной причиной низкой смачиваемости жидким металлом поверхности серого чугуна является сохранение графитных пластин на границе с твердой подложкой, которые не успевают полностью раствориться в расплаве зоны оплавления. Как известно [8, 9], графит не смачивается жидким чугуном. Причем для чугуна с шаровидным графитом краевой угол смачивания даже больше, чем для серого чугуна [8]. Это предположение подтверждается тем фактом, что с огрублением графитных пластин в чугуне смачиваемость ухудшается. Косвенно, эта закономерность была замечена и в [4].

Целью работы являлась экспериментальная оценка высказанного предположения о причинах низкой смачиваемости расплавом поверхности серого чугуна при упрочнении дуговым разрядом на основе прямых металлографических исследований.

Для этого был выполнен следующий эксперимент. Образцы серого чугуна размером 50x20x10 мм обрабатывали дугой прямой (графитовый электрод являлся катодом) и обратной полярности при силе тока 150-250 А. При этом на наибольшую грань наносили одну упрочненную дорожку. Затем образцы разрезали сечениями, которые проходили по вертикальным осям капель. На этих сечениях изготавливали микрошлифы, на которых измеряли краевые углы смачивания θ . Для исследования смачиваемости графита стальную проволоку \varnothing 3 мм расплавляли дугой разной полярности на полированной пластине графита марки ЭГСП. При воздействии дуги проволока расплавлялась и распадалась на капли с \varnothing 2-4 мм. При обработке дугой обратной полярности происходило науглероживание оплавленной проволоки [6]. Время нахождения капли на графите до кристаллизации не превышало 1 с. Затем капли отделяли. При этом на пластине оставался едва заметный след. То есть, вследствие взаимодействия графита с расплавом лунка на поверхности не успевала образоваться и поверхность оставалась абсолютно ровной. На каплях изготавливали шлифы таким образом, что бы плоскость шлифа проходила по вертикальной оси капли. На микрошлифах капель исследовали структуру и измеряли краевой угол смачивания графита.

С увеличением силы тока дугового разряда и, соответственно, ростом глубины зоны оплавления наблюдали те же закономерности, что и в [2], - при увеличении тока более 100 А получение однород-

ного по толщине упрочненного слоя становится невозможным. На поверхности упрочненной дорожки расплав собирается в капли \varnothing от 1,5-2 до 6-7 мм (рис. 1).

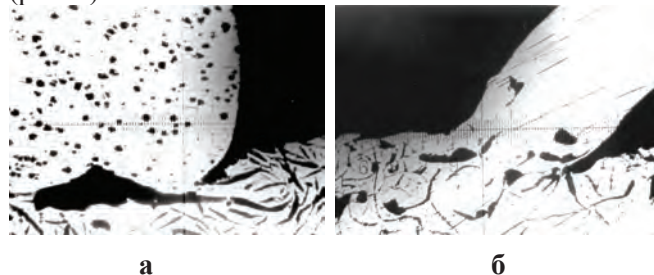


Рис. 1. Капли, образовавшиеся при обработке серого чугуна дугой обратной (а) и прямой (б) полярности, без травления; а – х50, б – х125

Структура металла в каплях представлена дисперсным ледебуритом, продуктами распада первичного аустенита и частицами пироуглерода (при обработке дугой обратной полярности, рис. 1а). Хорошо заметно, что капли, как бы, опираются на не растворившиеся пластины графита (рис. 1). При этом поры, отделяющие капли от чугунной подложки являются продолжением, выходящих на поверхность графитных пластин. Толщина сплошного отбеленного слоя незначительна и колеблется от 50 до 200 мкм (рис. 2).

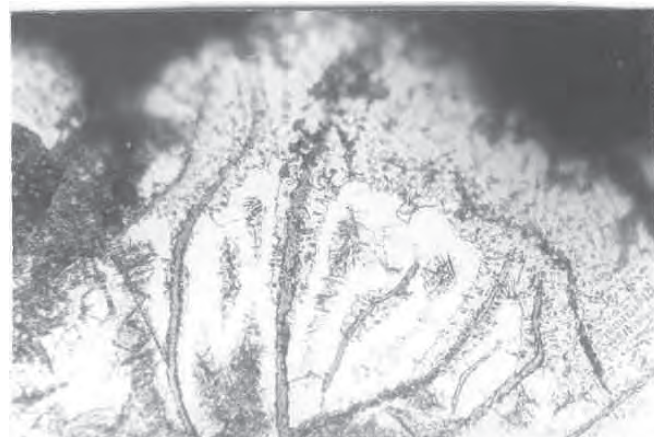


Рис. 2. Микроструктура чугуна СЧ-18, обработанного дугой обратной полярности, х500

Краевые углы смачивания капель на чугуне и графитовой подложке (табл. 1) после воздействия дуги прямой полярности очень близки. Разницей в содержании углерода в стали и чугуне СЧ-18 можно пренебречь из-за высокой скорости насыщения углеродом расплава, контактирующего с графитом. В работе [8] длительность контакта капли чугуна и графитовой подложки составляла 25-30 с, а в [9] около 3 с. При этом, в обеих работах утверждается, что за принятую длительность выдержки заметного науглероживания капли не происходит. На самом деле, несмотря на небольшую длительность контакта графитовой подложки и расплава до кристаллизации (не более 1 с), в нижней части капли успевает образоваться науглероженный слой толщиной 10-15 мкм (рис. 3).

Таблица. Средние значения (из 8-15 измерений) краевого угла смачивания θ в зависимости от полярности дуги и материала подложки

Материал подложки	Полярность дуги	Q, град	
		эксперимент	литературные данные
СЧ-18	Прямая	104	-
	Обратная	122	
Графит ЭГСП	Прямая	105	104-108 [8]
	Обратная	141	

Содержание углерода в слое превышает 2 %, о чем свидетельствует наличие в структуре ледебурита. Учитывая высокую скорость насыщения, науглероживание происходит, видимо, уже при растекании капли по подложке. Можно предположить, что насыщение оказывает влияние на смачиваемость, несмотря на то, что в [9] сообщается о постоянстве краевого угла смачивания при длительности выдержки до 2,5 ч. Автор объясняет стабильность угла явлением гистерезиса и образованием лунки на графите.

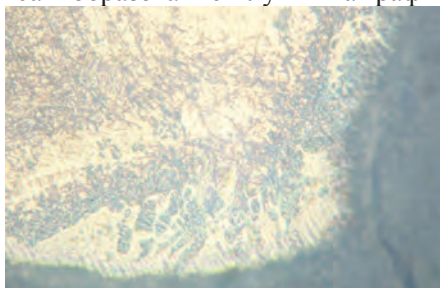


Рис. 3. Угол стальной капли, закристаллизовавшейся на графитовой подложке при воздействии дуги прямой полярности, $\times 400$

При воздействии дугой обратной полярности краевой угол смачивания больше на графитовой подложке, что закономерно. Отличие полученных значений угла θ на графите от результатов работ [8, 9] объясняется явлением гистерезиса смачивания и значительной пористостью (для графита ЭГСП пористость равнялась 25 %), которая, как известно, [8] увеличивает угол смачивания. Кроме того, эксперименты выполнялись в воздушной атмосфере. Возрастание угла при воздействии дуги обратной полярности связано с увеличением содержания углерода в каплях. В сплавах железо-углерод смачиваемость расплавом графитовой подложки снижается [8, 9] с ростом содержания углерода (θ для чистого железа составляет 37°).

Осаждение корки пироуглерода на поверхности образцов при воздействии дуги обратной полярности является еще одной причиной снижения смачиваемости чугуна расплавом (увеличения угла θ , таблица). Поскольку угольный пар конденсируется на протяжении всего времени горения дуги, поверхность вокруг капель имеет рельеф и черно-серый цвет, характерные для пироуглерода. При контакте с расплавом пироуглерод не успевает полностью раствориться, что подтверждается наличием частиц в капле (рис. 1а).

Полученные результаты подтвердились при упрочнении поверхностей скольжения пропусков и проводок сортопрокатных станов. Эти детали изготавливаются литьем из отходов литейного производства. На про-

водках, отлитых из высокопрочного чугуна, при всех режимах обработки дуговым разрядом получали упрочненный слой с высоким качеством поверхности. На деталях из серого чугуна получение упрочненного слоя приемлемого качества оказалось возможным только в случае, если размеры пластин графита не превышали 80-100 мкм, а их содержание должно быть не более 3 % по ГОСТ 3443-87 при феррито-перлитной основе.

Выводы

1. Упрочнение изделий из серого чугуна с получением отбеленного слоя вызывает значительное повышение шероховатости поверхности; причина этого заключается в кристаллизации металла зоны оплавления в виде капель.

2. Близость краевых углов смачивания металлическим расплавом серого чугуна и графитовой подложки свидетельствует о том, что ухудшение качества поверхности при локальном упрочнении серых чугунов вызвано сохранением графитных пластин на границе зон оплавления и термического влияния.

3. Локальное упрочнение чугуна дуговым разрядом обратной полярности приводит к увеличению угла θ до 120°, что связано с конденсацией слоя пироуглерода на поверхности образца.

Библиографический список

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. - М.: Машиностроение, 1985. - 496 с.
2. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера / М.А. Кришталл, А.А. Жуков, А.Н. Кокора. - М.: Металлургия, 1973. - 192 с.
3. Лазерная техника и технология: В 7 кн. Кн. 3: Методы поверхностной лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов; под ред. А.Г. Григорьянца. - М.: Высшая школа, 1987. - 191 с.
4. Лазерная закалка чугуновых деталей станков / В.И. Самсонов, В.С. Ан, А.Г. Шныпкин, П.Ю. Бойцов // МиТОМ. - 1989. - № 11. - С. 6-9.
5. Сафонов Е.Н. Электродуговая закалка чугуновых валков с оплавлением поверхности // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2008. - № 12. - С. 12-16.
6. Химико-термическое упрочнение сплавов с использованием плазмы дугового разряда / В.И. Алимов, В.Н. Крымов // Сварочное производство. - 2005. - № 5. - С. 51-54.
7. Поведение включений графита при нагреве и зародышеобразовании графитной фазы в чугуне / И.С. Ивахненко, Л.Б. Коган, Ю.П. Родин // В кн.: Физико-химические основы взаимодействия жидкого металла с газами и шлаками. - М.: Наука, 1978. - С. 117-127.
8. Измерение краевых углов смачивания чугуна на графитовой подкладке / А.Я. Храпов, В.П. Чернобровкин // Физика металлов и металлосведение. - 1957. - Т. IV, вып. 2. - С. 381-383.
9. Найдич Ю.В. Контактные явления в металлических расплавах. - К.: Наукова думка, 1972. - 196 с.

Поступила 24.12.2012