

УДК 621.771.07.001.5

Самотугин С.С.¹, Ляшенко Б.А.², Самотугина Ю.С.³

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО
УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ ЧУГУНА
С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ**

На основании исследований напряженного состояния поверхностного слоя высокопрочного чугуна ВЧ 80 после поверхностной обработки высококонцентрированной плазменной струей, изучено влияние технологии плазменного поверхностного упрочнения на величину и характер распределения остаточных напряжений.

Одним из наиболее перспективных направлений развития современного производства является внедрение интенсивных технологий упрочнения материалов высококонцентрированными источниками нагрева (ВКИН) – лазерным и электронным лучами, плазменной струей. Высокая плотность мощности и возможность регулирования продолжительности воздействия при использовании данных источников нагрева позволяют получить свойства материала, недоступные для известных способов. К перспективным областям использования поверхностного упрочнения ВКИН относится повышение работоспособности деталей и инструмента из чугуна. Это обусловлено их большой номенклатурой, тяжелыми условиями работы, трудностью, а во многих случаях и невозможностью применения традиционной термической обработки. При определенных условиях именно после поверхностного упрочнения детали из чугуна, как более дешевые и технологичные в изготовлении (например, направляющие станков или прокатные валки) могут эффективно заменить детали из дорогостоящих легированных сталей.

Работоспособность упрочненных слоев при поверхностной обработке материалов концентрированными источниками нагрева будет определяться степенью дисперсности структуры, фазовым составом металла упрочненной зоны, величиной, знаком и характером распределения внутренних остаточных напряжений [1 – 4]. Влияние технологии и режимов поверхностного термического упрочнения на характер распределения остаточных напряжений в чугунах применительно к индукционной закалке и лазерной обработке в настоящее время достаточно хорошо изучен. Однако, для плазменной обработки такие данные в литературе отсутствуют.

При индукционной закалке массивных деталей из серого и высокопрочного чугуна без оплавления поверхности в верхних слоях закаленного слоя толщиной – 2,5 мм возникают сжимающие напряжения величиной 650 – 750 Н/мм², а в глубине детали – растягивающие напряжения в пределах 450 – 600 Н/мм² [5]. При индукционной закалке полых чугунных деталей с двухсторонним охлаждением картина качественно меняется – на поверхности возникают растягивающие напряжения величиной до 400 Н/мм². Это вызывает микрорастрескивание чугуна по графитным включениям и снижение абразивной износостойкости [6]. При лазерной обработке чугунов без оплавления поверхности во многих опубликованных работах установлено образование у поверхности упрочненной зоны остаточных напряжений сжатия [3, 7 – 9].

В целом для случая поверхностного термического упрочнения чугунов с нагревом до температур, не превышающих температуру плавления (индукционным, лазерным и, по-видимому, с применением других источников нагрева) можно согласиться с выводами, полученными еще в ранних работах [10]: остаточные напряжения в закаленном слое образуются в результате алгебраического сложения растягивающих термических и сжимающих структурных напряжений. Мартенситные $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения в матрице чугуна закаленного слоя вызывают увеличение объема и появление сжимающих напряжений, которые в образцах из перлитных

¹ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

²Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, д-р техн. наук, проф.

³ПГТУ, ассистент

чугунов имеют большую величину, чем в образцах из ферритных чугунов, так как в первых мартенсит образуется во всем слое, а во вторых – только в некоторой части слоя. Термические напряжения возникают на большей глубине, чем напряжения от структурных превращений: структурные превращения происходят в слое, нагретом выше критических температур, а термические напряжения растяжения возникают в слое, нагретом на более низкие температуры. Алгебраическое сложение сжимающих и растягивающих напряжений во всех случаях дает в закаленном слое результирующие напряжения сжатия [10].

При поверхностной обработке чугунов с нагревом до температур, превышающих температуру плавления (с микро- и макроплавлением), когда тепловложение в материал значительно увеличивается, термические растягивающие напряжения могут стать больше сжимающих структурных и алгебраическое сложение их может дать в поверхностном закаленном слое результирующие напряжения растяжения. В свою очередь структурные напряжения сжатия будут зависеть не только от механизма фазовых превращений, но и от механизма кристаллизации металла оплавленного слоя [12]. Так в работах [3, 7, 12] при лазерной обработке с оплавлением поверхности перлитных и ферритных чугунов импульсным и непрерывным излучением установлено образование в оплавленном слое остаточных растягивающих напряжений, снижающих механические характеристики и вызывающих образование трещин. Применительно к плазменной обработке чугунов сведения о механизме образования и характере распределения остаточных напряжений в литературе отсутствуют.

Цель работы – исследование остаточных напряжений в поверхностных слоях на высокопрочном чугуне ВЧ-80 при различных технологических вариантах обработки сверхмощной плазменной струей. Значение и характер распределения остаточных напряжений по глубине модифицированной зоны определяли на поперечных микрошлифах (рис. 1), приготовленных по методике, приведенной в работе [13], с применением $\sin^2\psi$ -метода при рентгеноструктурном анализе – одном из наиболее точных и локальных из современных методов исследований остаточных напряжений [14 – 15]. Рентгеновскую съемку образцов проводили на дифрактометре ДРОН-3,0 в железном K_α -излучении при непрерывной записи отражений от плоскостей (211) α -фазы. Остаточные напряжения определяли по формуле:

$$\sigma_{ост} = \frac{E}{\nu} \left(1 - \frac{\sin \Theta_s}{\sin \Theta_0} \right), \quad (1)$$

где E , ν – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона чугуна ВЧ-80;

Θ_s , Θ_0 – соответственно угол отражения кристаллографической плоскости в кристаллической решетке образца-эталоны (чугун ВЧ-80 в исходном состоянии) и исследуемого образца.

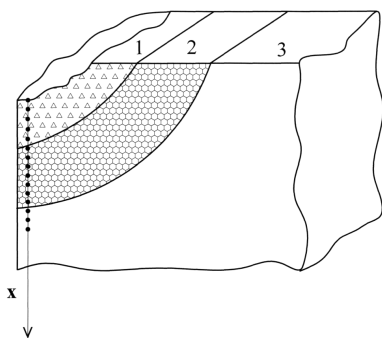


Рис. 1 – Схема образцов для исследований (точками указаны места определения остаточных напряжений после послыонного стравливания): 1 – оплавленная зона; 2 – зона закалки в твердом состоянии; 3 – исходный материал

Образцы перед каждой съемкой подвергали послыонному стравливанию с поверхности электролитическим методом. По результатам исследований и расчетов строили эпюры распределения остаточных напряжений для образцов, обработанных на оптимальных режимах [17] без оплавления, с микро- и макрооплавлением поверхности (рис. 2).

Исследованиями установлено, что при плазменной обработке чугуна с шаровидным графитом без оплавления, но с нагревом до температуры, превышающей температуру аустенизации, при последующем сверхскоростном охлаждении перлитная матрица в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода превращается в высокодисперсный пластинчатый мартенсит. Происходит закалка матрицы в твердом состоянии. В структуре модифицированной зоны имеется также остаточный аустенит (до 15 %) и полностью сохраняется графит. Структура по всей глубине ЗПВ (2,5 мм) достаточно однородна. При обработке без оплавления в металле зоны плазменного воздействия возникают остаточные сжимающие напряжения, равные 735 МПа у поверхности и 650 МПа на границе с исходным металлом.

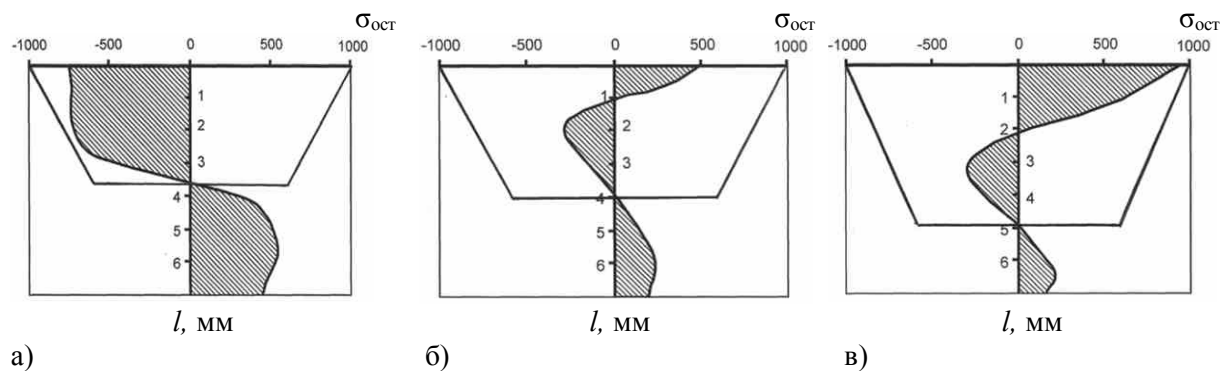


Рис. 2 – Характер распределения остаточных напряжений при плазменной обработке чугуна ВЧ-80 без оплавления (а), с микрооплавлением (б), с макрооплавлением (в) поверхности

При снижении скорости перемещения плазмотрона или увеличении удельной тепловой мощности плазменной струи температура нагрева поверхности чугунных образцов увеличивается, становится выше температуры плавления чугуна и образуется поверхностный слой, в котором ввиду очень высокой скорости охлаждения закалка происходит непосредственно из жидкого состояния. Графит растворяется в расплаве и после охлаждения формируется структура белого чугуна – квазиледебурит. При этом структура оплавленного слоя зависит от глубины оплавления и механизма кристаллизации. При микрооплавлении (на глубину порядка 0,1 мм) скорость охлаждения расплава очень высока (10^5 °C/c) и структура квазиледебурита представляет собой тонкий конгломерат фаз. При макрооплавлении на глубину порядка 1 мм скорость охлаждения расплава снижается, хотя и остается достаточно высокой (10^4 °C/c) – ячейки квазиледебурита имеют пластинчатое или дендритное строение. При обработке с оплавлением графит частично или полностью растворяется, содержание остаточного аустенита значительно увеличивается по сравнению с обработкой без оплавления поверхности и составляет: 36 % при микрооплавлении и 50 % при макрооплавлении.

Исследования показали, что с увеличением температуры нагрева поверхности чугуна и переходом от закалки в твердом состоянии к закалке в жидком состоянии происходит изменение знака остаточных напряжений в модифицированной зоне – при обработке с оплавлением поверхности образуются остаточные растягивающие напряжения. При микрооплавлении они

составляют 485 МПа, при макрооплавлении 920 МПа у поверхности и 255 МПа у границы с нижележащим слоем закалки в твердом состоянии.

Таким образом, более предпочтительной схемой обработки можно считать плазменное упрочнение без оплавления поверхности, когда в поверхностном слое возникают остаточные сжимающие напряжения. Выполненные исследования показывают возможность регулирования величины и знака внутренних остаточных напряжений при плазменном упрочнении высокопрочного чугуна в достаточно широких пределах за счет изменения режимов и технологии концентрированного поверхностного нагрева.

Выводы

1. При поверхностной обработке чугуна с нагревом до температур, превышающих температуру плавления (с микро- и макрооплавлением), когда тепловложение в материал значительно увеличивается, термические растягивающие напряжения превышают структурные сжимающие – в оплавленном слое результирующие напряжения являются растягивающими, в закаленном слое – сжимающими. С увеличением толщины оплавленного слоя растягивающие напряжения в нем увеличиваются.
2. При плазменном упрочнении высокопрочного чугуна без оплавления поверхности (с закалкой матрицы в твердом состоянии) в упрочненном слое возникают результирующие остаточные напряжения сжатия.

Перечень ссылок

1. Головин Г.Ф. Высокочастотная термическая обработка / Г.Ф. Головин, М.М. Замятнин. – Л.: Машиностроение, 1990. – 239 с.
2. Григорьянц А.Г. Методы поверхностной лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов. – М.: Высшая школа, 1987. – 191 с.
3. Леонтьев П.А. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов / П.А. Леонтьев, Н.Т. Чеканова, М.Г. Хан. – М.: Metallurgy, 1986. – 192 с.
4. Самотугин С.С. Плазменное упрочнение инструментальных материалов / С.С. Самотугин, Л.К. Лецинский. – Донецк: Новый мир, 2002. – 338 с.
5. Яковлев Ф.И. О превращениях при индукционном нагреве перлитного и ферритного чугуна с шаровидным графитом / Ф.И. Яковлев // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1987. – № 6. – С. 2 – 5.
6. Яковлев Ф.И. Количественная связь между размером зерна литой структуры матрицы, дисперсностью мартенсита и прочностью закаленного чугуна / Ф.И. Яковлев // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1993. – 8. – С. 31 – 33.
7. Коваленко В.С. Лазерная технология / В.С. Коваленко. – К.: Выща школа, 1989. – 280 с.
8. Лихошва В.П. Металлургические особенности лазерного оплавления чугунов / В.П. Лихошва // *Процессы литья*. – 2004. – № 2. – С. 14 – 22.
9. Molian P.A. Fatigue characteristics of laser surface – hardened cast irons / P.A. Molian // *Journal of engineering materials and technology*. – 1987. – Vol. 109. – P. 179 – 187.
10. Климочкин М.М. Поверхностная закалка чугуна с шаровидным графитом / М.М. Климочкин // *Электротермическая обработка и электроискровое упрочнение деталей*. – Труды ЦНИИТМАШ. – М.: Машгиз, 1958. – С. 87 – 115.
11. Мазур В.А. Исследование остаточных напряжений в инструментальных сталях с поверхностным оплавленным слоем / В.А. Мазур, С.С. Самотугин // *Защита металлургических машин от поломок*. – Мариуполь: ПГТУ, 2003. – Вып. 7. – С. 184 – 189.
12. Гиржон В.В. Влияние импульсной лазерной обработки на структуру легированного чугуна / В.В. Гиржон, Д.И. Анпилогов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1997. – № 4. – С. 11 – 13.
13. Самотугин С.С. Плазменная обработка инструментальных сталей / С.С. Самотугин // *Сварочное производство*. – 1997. – № 9 – С. 8 – 11.

14. *Васильев Д.М.* Современное состояние рентгеновского способа измерений макронапряжений / *Д.М. Васильев, В.В. Трофимов* // Заводская лаборатория. – 1984. – № 7. – С. 20 – 29.
15. *Withers P.J.* Residual stress. Part 1 – measurement techniques / *P.J. Withers, H.K.D Bhadeshia* // Materials Science and technology. – 2001. – Vol. 17. – P. 355 – 365.
16. *Withers P.J.* Residual stress. Part 2 – nature and origins / *P.J Withers, H.K.D. Bhadeshia* // Materials Science and technology. – 2001. – Vol. 17. – P. 66 – 375.
17. *Ляшенко Б.А.* Влияние режимов плазменной обработки на структуру и фазовый состав высокопрочного чугуна / *Б.А. Ляшенко, Ю.С. Самотугина* // Металлургические процессы и оборудование. – 2006. – № 1. – С. 13 – 19.

Рецензент: Гулаков С.В.
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 19.02.2008