

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.785.048.7

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ СЕРОГО ЧУГУНА
СОВМЕЩЕННОЙ ЛАЗЕРНОЙ
И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ

Докт. техн. наук, проф. ДЕВОЙНО О. Г.¹⁾, канд. техн. наук КУКИН С. Ф.²⁾,
докт. техн. наук, проф. СПИРИДОНОВ Н. В.¹⁾, канд. техн. наук КОБЯКОВ О. С.¹⁾, БУЗУН Е. Л.²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾Минский тракторный завод

Серые чугуны широко используются в машиностроении для изготовления корпусных деталей. Выбор марки чугуна зависит от типа детали, ее функционального назначения, контактно-силовых нагрузок в процессе эксплуатации, а также характера и типа износа испытываемых сопрягаемыми поверхностями деталей. В ряде случаев из-за тяжелых локальных нагрузок и значительного износа (абразивный, адгезионный, усталостный и другие виды износа) возникает необходимость в поверхностном упрочнении проблемных зон. С позиций экономичности, эффективности и качества в настоящее время наиболее предпочтительным методом поверхностного упрочнения является лазерное термоупрочнение [1].

Лазерная обработка с оплавлением поверхности в ряде случаев диктуется необходимостью получения ледебуритных упрочненных слоев, обладающих утонченной структурой с метастабильными фазами, а также для устранения поверхностных дефектов, измельчения и перераспределения различных включений, присущих данному типу чугунов [1]. Однако лазерная обработка с проплавлением поверхности на определенную глубину требует лазерных установок большой удельной мощности и более длительного времени воздействия на обрабатываемую поверхность, необходимого для полного растворения графита в расплаве [2]. При этом значительно ухудшается исходная шероховатость обрабатываемой поверхности.

Лазерная закалка чугуна из твердого состояния в большей мере лишена недостатков, при-

сущих лазерной закалке чугуна из жидкого состояния. Однако данный процесс упрочнения необходимо осуществлять в узком температурном диапазоне между температурой закалки 900 °С и температурой плавления 1140 °С. Кроме того, при лазерной обработке чугуна в режиме, когда температура на поверхности ниже 1140 °С, происходят микроплавление вершин неровностей поверхности и изменение ее исходного микрорельефа [3].

Известно, что температура начала α - γ -превращения в сталях (A_{c1}) снижается после их пластического деформирования [4, 5]. Эффект объясняется возможной релаксацией части энергии наклепа в процессе фазового превращения, вследствие чего равенство термодинамических потенциалов фаз, определяющее температуру фазового равновесия, достигается при меньших температурах. В [6] на основе концепции о предельном состоянии вещества в точке фазового перехода и использовании дилатации решетки в качестве меры запасенной материалом энергии получено выражение для энергии наклепа $\Delta U/\Delta T$, релаксация которой приводит к снижению температуры A_{c1} на один градус, и само смещение температуры фазового равновесия ΔT за счет пластической деформации равно

$$\Delta T = \rho a^2 / a_\alpha + a_\gamma,$$

где ρ – плотность дислокаций; a – параметр решетки; a_α и a_γ – коэффициенты линейного термического расширения α - и γ -фазы соответственно.

Согласно данному выражению для характерных значений предельной плотности дислокаций при пластической деформации $\rho = (2 \dots 4) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ максимально возможная величина смещения температуры A_{c1} не превышает 50–100 °С. Таким образом, предварительное пластическое деформирование поверхности позволяет в пределе расширить область α - γ -превращения в стали на 100 °С.

Среди методов пластического деформирования можно отметить следующие: обкатку шариками или роликами, дробеструйную обработку, обработку ультразвуковым инструментом. Последний метод является наиболее эффективным в силу своей многоцикличности и легкости встраивания в технологические процессы обработки поверхности высококонцентрированными потоками энергии. Многократность деформирования при ультразвуковой обработке значительно уменьшает исходную шероховатость поверхности и ведет к возрастанию максимальной глубины деформированного слоя. Вследствие изменения шероховатости и структуры поверхности ультразвуковая обработка в зоне лазерного воздействия должна повлиять на изменение поглощательной способности поверхности и теплофизических характеристик материала. Это наряду с изменением кинетики протекания фазовых превращений и диффузии находит свое проявление в изменении геометрических размеров и микродюриметрических характеристик зон лазерного воздействия [7].

В этой связи значительный интерес представляет использование предварительного ультразвукового поверхностно-пластического деформирования (УЗППД) поверхностей деталей из чугуна СЧ20 при последующем лазерном термоупрочнении без оплавления поверхности с целью не только улучшения параметров шероховатости поверхности и микродюриметрических характеристик зон лазерного воздействия, но и формирования данным методом большей глубины слоя, полученной закалкой из твердого состояния [8, 9].

Методика исследования. Исследования проводили на цилиндрических образцах из серого чугуна СЧ20. Предварительно часть заготовки была обработана методом УЗППД. Затем

осуществили термоупрочнение поверхности заготовки лазером так, чтобы термоупрочненный участок поверхности пересекал участок, обработанный методом УЗППД. Режим лазерного термоупрочнения предварительно рассчитывался, а затем экспериментально подбирался таким образом, чтобы температура на поверхности в процессе лазерного термоупрочнения находилась в диапазоне (900–950) °С. При таком режиме обработки на практике невозможно получить термоупрочненный слой, так как температура α - γ -превращения для СЧ20 составляет 900 °С. Исходя из того, что предварительное УЗППД поверхности расширяет область α - γ -превращения в железоуглеродистых сплавах на 100 °С [7], при таком режиме лазерного термоупрочнения в зоне предварительного УЗППД должен сформироваться термоупрочненный слой, так как температура α - γ -превращения для СЧ20 должна составить 800 °С.

Ультразвуковое поверхностно-пластическое деформирование образцов проводили на специальной установке. Деформирующий элемент, изготовленный из сплава ВК-6М и имеющий форму ролика диаметром 6 мм, длиной 12 мм, жестко впаян в торец концентратора ультразвуковой колебательной системы на базе магнито-стрикционного преобразователя ПМС-15А-18. Сам преобразователь помещен в специальный корпус с возможностью его поворота относительно своей оси на угол в диапазоне 50° и прижима деформирующего элемента к обрабатываемой поверхности под фиксированной статической нагрузкой 20 кгс. Питание магнито-стрикционного преобразователя осуществляли от ультразвукового генератора УЗГ-3-4. Корпус преобразователя ПМС-15А-18 закрепляли в резцедержателе токарно-винторезного станка, а обрабатываемый образец – в патроне, которому придавали вращение, а деформирующему элементу – соответствующую подачу. Амплитуду ультразвуковых колебаний рабочей поверхности деформирующего элемента при ультразвуковой обработке устанавливали в диапазоне 20–25 мкм при частоте 18 кГц и измеряли бесконтактным виброметром типа УВМ-4М.

Лазерное термоупрочнение осуществляли с использованием иттербиевого волоконного лазера ЛС-2 номинальной мощностью излучения 2,00 кВт и длиной волны излучения 1,07 мкм.

Предварительно методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS 11.0 рассчитывали температурное поле, наводимое движущимся пятном лазерного луча диаметром 3 мм с плотностью мощности $6 \cdot 10^7$ Вт/м² в образце из СЧ20. Скорость перемещения пятна ($50 \cdot 10^{-3}$ м/с) выбирали из условия получения максимальной температуры на поверхности, но не выше 950 °С. Структуру и размеры термоупрочненного слоя, полученного после лазерной обработки при вышеуказанных режимах, исследовали с помощью металлографического комплекса Olympus GX51.

Микрорельеф поверхности после ультразвуковой обработки оценивали по профилограммам, полученным на профилометре-профилографе модели 130.

Обсуждение результатов. Температурное поле в поперечном сечении следа лазерной обработки, перпендикулярном направлению перемещения пятна лазерного луча, представлено на рис. 1.

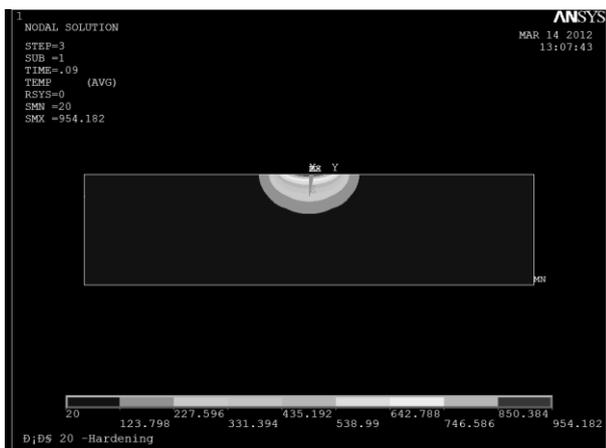


Рис. 1. Распределение температуры в осях Y–Z от лазерного воздействия движущегося (по оси X) круглого пятна ($P = 6 \cdot 10^7$ Вт/м²; $v = 50 \cdot 10^{-3}$ м/с; $R = 1,5$ мм; $t = 2R/v$); $Y \times 6,85$; $Z \times 5,7$

Из анализа, полученного расчетом температурного поля, размеры термоупрочненной зоны при температуре α – γ -превращения 800 °С должны составлять: ширина ~ 1,6 мм, глубина по центру ~ 0,15 мм. Реальные значения размеров термоупрочненной зоны поверхности СЧ20, предварительно подвергнутой УЗППД, представлены на рис. 2 и составляют: ширина ~ 1,4 мм, глубина по центру ~ 0,12 мм.

Некоторые расхождения в значениях размеров зон, полученных расчетным и экспериментальными путями, указывают, что реальная температура α – γ -превращения для СЧ20 несколько выше 800 °С из-за погрешности применяемого метода расчета температурных полей.

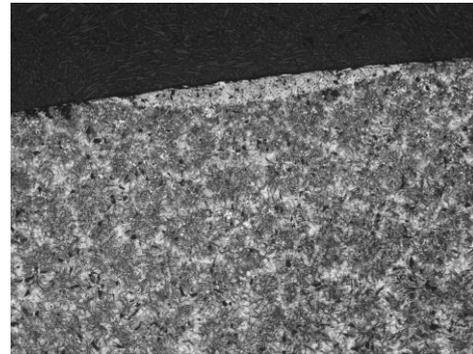


Рис. 2. Конфигурация термоупрочненной зоны от лазерного воздействия после УЗППД ($\times 50$)

Таким образом, за счет предварительного УЗППД можно расширить технологические возможности лазерного термоупрочнения чугуна СЧ20 из твердого состояния с получением упрочненных слоев большей глубины и ширины, за счет расширения температурного диапазона с 240 до 340 °С, в котором происходит данный вид закалки. Здесь также немаловажную роль играет то, что ультразвуковое поверхностно-пластическое деформирование перлитных чугунов способствует вытеснению феррита и увеличению процентного содержания перлита в приповерхностном слое (зоне ультразвукового воздействия). Это, в свою очередь, при последующем лазерном термоупрочнении позволяет получать более равномерные по глубине и твердости упрочненные поверхностные слои [10].

Использование в качестве предварительной операции перед лазерной обработкой ультразвукового поверхностно-пластического деформирования значительно повышает эффективность и качество лазерного термоупрочнения. Как видно из приведенных на рис. 3 и 4 профилограмм поверхности СЧ20, обработанной УЗППД, значительно снижается шероховатость поверхности и последующая лазерная обработка в режиме без оплавления практически не искажает исходного микрорельефа, сформированного УЗППД (рис. 4).

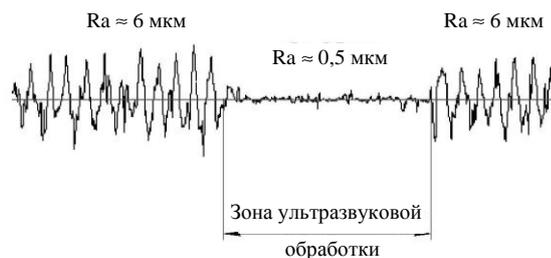


Рис. 3. Профилограмма поверхности чугуна СЧ20 – исходная и после УЗППД (параметры УЗППД: частота УЗ колебаний – 18 кГц; амплитуда колебаний – 20–25 мкм; усилие статического прижима – 45 кг; поперечная подача деформирующего элемента – 0,6 мм/об; продольная скорость перемещения деформирующего элемента – 2,6 м/мин)

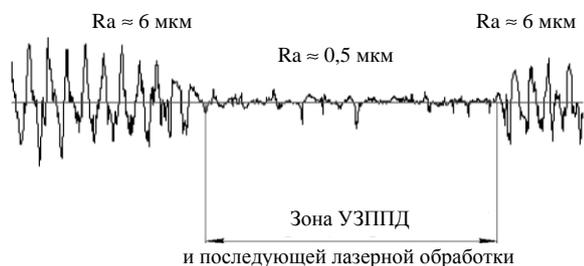


Рис. 4. Профилограмма поверхности чугуна СЧ20 после УЗППД и последующей лазерной обработки

ВЫВОДЫ

Ультразвуковое поверхностно-пластическое деформирование позволяет получать поверхности с минимальной шероховатостью и наибольшей опорной поверхностью за счет формирования микрорельефа с большим средним радиусом скругления вершин микронеровностей. Поэтому ультразвуковое поверхностно-пластическое деформирование перед лазерной обработкой является предпочтительным, и особенно при лазерном термоупрочнении деталей из чугунов, так как обеспечивает эффективное проникновение углерода в металлическую матрицу по бездиффузионному механизму, снижая его содержание в свободном виде, а также более интенсивное измельчение, выкрашивание и удаление графита, выходящего на поверхность, с последующей ликвидацией пор и пус-

тот на месте бывших графитовых включений за счет деформационного уплотнения. Это позволяет избежать микрооплавлений поверхности в зонах выхода частиц углерода на поверхность, который выгорает с образованием кратеров с оплавленными кромками даже в режиме обработки без оплавления поверхности [8, 9].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mordike, B. L.** Improvement of wear properties by laser surface treatment / B. L. Mordike // Proc. 3d European Conf. «Laser Treatment of Materials. ECLAT'90» 2 Vol. Eds. H. W. Bergmann, R. Kupfer. – Vol. 1. – P. 371–376.
2. Pompe W., Schürich B., Luft A., Lepski D., Brenner B., Reitzenstein W., Müller H. // Proc. 3d European Conf. «Laser Treatment of Materials. ECLAT'90» 2 Vol. Eds. H. W. Bergmann, R. Kupfer Laser surface melting. – Vol. 1. – P. 399–410.
3. **Григорьянц, А. Г.** Основы лазерного термоупрочнения сплавов / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов. – М.: Высш. шк., 1988. – 158 с.
4. **Физические основы электротермического упрочнения стали** / В. Я. Гриднев [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1973. – 334 с.
5. **Дьяченко, С. С.** Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах / С. С. Дьяченко. – М.: Металлургия, 1982. – 127 с.
6. **Медников, С. И.** К вопросу о снижении температуры начала фазового превращения в сталях под действием пластической деформации / С. И. Медников, Д. М. Гурев // Письма в ЖТИ. – 1992. – Т. 18, № 5. – С. 25–27.
7. **Гурев, Г. Д.** Совмещение лазерного и ультразвукового воздействий для термообработки поверхности стали / Г. Д. Гурев, Д. М. Гурев // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2007. – № 1 (14). – С. 90–95.
8. **Способ** поверхностного упрочнения: пат. № 2735465 (RU) МКИ C21D1/09, C21D7/06 / С. Ф. Кукин, О. Г. Девойно, А. А. Баркун, А. С. Кукин; ВУ. – № 2008131983; заявл. 01.08.2008.
9. **Способ** поверхностного упрочнения изделия из легирующего или титанового сплава: пат. № 12978 (BY) МКИ C21D1/09, C21D1/78 / С. Ф. Кукин, О. Г. Девойно, А. А. Баркун, А. С. Кукин; ВУ. – № 20080514; заявл. 18.04.2008.
10. **Филяев, А. Т.** Изнашивание сталей в ультразвуковом поле / А. Т. Филяев. – Минск: Наука и техника, 1978. – 288 с.

Поступила 10.05.2012