

05;11;12

## **Сверхтвердость и превращение графита в аморфный углерод в приповерхностном слое чугуна при лазерном воздействии**

© Г.И. Козлов

Институт проблем механики РАН, Москва

*Поступило в Редакцию 21 января 2000 г.*

Из анализа микроструктуры и спектров комбинационного рассеяния установлено, что образование сверхтвердых структур в приповерхностном слое чугуна при специальной лазерной обработке поверхности серого чугуна, покрытой тонким слоем индуктора-меди, связано с превращением графита, содержащегося в чугуне, в аморфный углерод. Высказаны соображения о возможном механизме этого процесса, включающем в себя стадии перехода графита в жидкую фазу, переохлаждения жидкого углерода и преобразования его в конденсированное аморфное состояние.

В предыдущей работе [1], впервые было обнаружено интересное явление: индуцированное образование сверхтвердых структур в чугуне при лазерной обработке поверхности серого чугуна, покрытой тонким слоем индуктора — меди.

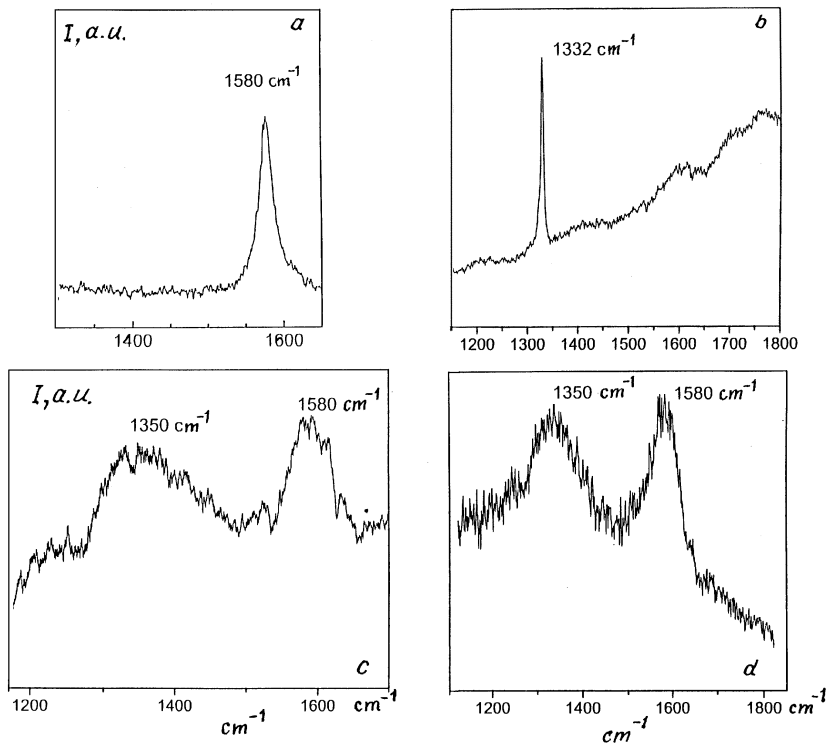
Явление индукции заключается в управляющем воздействии кристаллической структуры индуктора на развитие в определенном направлении процессов фазовых превращений, протекающих после лазерного воздействия в контактирующих с индуктором приповерхностных слоях металлов и сплавов в ходе процесса их охлаждения. В [1] было установлено, что индуцирующее влияние меди по отношению к серому чугуну сводится, во-первых, к значительному насыщению поверхностного слоя чугуна углеродом и, во-вторых, к аустенитно-стабилизирующему воздействию, приводящему к существенному снижению температуры превращения аустенита и благодаря этому к значительному измельчению образующихся в процессе охлаждения чугуна структур, включая карбиды и перлит. Определить же структурные составляющие, ответственные за высокие значения микротвердости, с помощью анализа фазового состава не удалось. Но он все-таки показал, что мартенсит

образуется лишь в небольших количествах и поэтому упрочнение серого чугуна при лазерной обработке поверхности, покрытой индуктором, не связано с образованием мартенсита. Единственной "зацепкой", позволившей подойти к разгадке высоких значений микротвердости, оказались результаты анализа микроструктуры, которые показали, что в зоне оплавления наблюдаются значительные выделения углерода, имеющего глобулярную форму.

В настоящей работе предпринята попытка установить, являются ли эти выделения углерода графитом или они представляют собой какую-то иную структуру углерода? С этой целью были получены и проанализированы спектры комбинационного рассеяния (КР) углеродных включений из зоны лазерного воздействия на первой ступеньке, т.е. на глубине 0.5 mm [1]. Спектр комбинационного рассеяния представлен на рис. 1, на котором для сравнения приведены также спектры КР для пирографита и алмаза [2]. Для последних характерно наличие узких пиков соответственно на частотах 1580 и 1332  $\text{cm}^{-1}$ .

Любопытно, что спектр КР глобулярного углерода имеет характерную двухгорбую структуру, охватывающую практически весь частотный диапазон от пирографита до алмаза. Это свидетельствует о том, что процесс лазерной обработки поверхности серого чугуна, покрытой тонким слоем меди, сопровождается значительным разупорядочиванием структуры графита, содержащегося в приповерхностном слое чугуна. Это разупорядочивание приводит практически к исчезновению дальнего порядка, характерного для упорядоченных кристаллических структур, измельчению и хаотизации взаимного расположения молекулярных структур углерода, т.е. к аморфизации углерода. Судя по ширине пиков в спектре КР, размер частиц очень небольшой и составляет примерно 50–80 nm, т.е. практически это наноуглерод.

Интересно было сопоставить спектр комбинационного рассеяния этих углеродных включений со спектром КР аморфного углерода, синтезированного из углеводорода, например, CVD-методом [3]. Такой спектр был получен и представлен на рис. 1, *d*. Удивительно, но спектры этих двух углеродных структур, образовавшихся в совершенно различных условиях, оказались почти идентичными по своей структуре, что подтверждает высказанное выше предположение о том, что глобулярный углерод, образующийся в процессе лазерной обработки серого чугуна с нанесенным на его поверхность тонким слоем индуктора — меди, представляет из себя аморфный углерод (glasscarbon).



**Рис. 1.** Спектры комбинационного рассеяния: *a* — пирографита, *b* — поликристаллической алмазной пленки, *c* — углеродных включений в зоне лазерного воздействия, *d* — аморфного углерода.

Естественно возникает вопрос: каков механизм превращения графита в аморфный углерод при лазерном облучении поверхности чугуна, покрытой слоем меди? Здесь следует прежде всего отметить, что графит, содержащийся в чугуне и образовавшийся в ходе кристаллизации чугуна из расплава, растет из одного центра и, разветвляясь в разные стороны, приобретает хлопьевидную форму с сильно искривленными лепестками. Поэтому в плоскости шлифа, как это видно из рис. 2, *a*, графит в чугуне обычно имеет вид прямолинейных и криволинейных пластинок, которые



**Рис. 2.** Фотографии микроструктуры серого чугуна (увеличение 80): *a* — структура графитовых пластинок в плоскости шлифа до лазерной обработки; *b* — структура аморфного углерода в приповерхностном слое чугуна после лазерного воздействия.

представляют собой различные сечения графитовых лепестков. Однако после лазерной обработки поверхности чугуна структура углерода в приповерхностном слое претерпевает значительные изменения, как это следует из анализа фотографии микроструктуры, приведенной на рис. 2, *b*. Фактически исходные пластинки различной формы в ходе лазерного воздействия как бы стягиваются в глобулы, причем некоторые глобулы имеют почти идеальную сферическую форму. Такой процесс

может происходить, если допустить, что углерод в приповерхностном слое чугуна в какой-то момент времени после лазерного воздействия находился в жидком состоянии. Это предположение, основанное на анализе микроструктуры чугуна после лазерного воздействия, объясняет и стягивание углерода в капли-глобулы и последующее образование аморфного углерода, представляющего собой сильно переохлажденную жидкую фазу, перешедшую в конденсированное состояние. Ведь известно, что при быстром охлаждении некоторых расплавов более вероятным оказывается образование аморфного конденсированного состояния, а не упорядоченной кристаллической решетки.

Однако углерод в виде жидкой фазы в условиях лазерной обработки, вероятно, может образовываться и существовать только при высоких давлениях. Поэтому возникает вопрос, могут ли в принципе высокие давления реализоваться в условиях наших экспериментов?

Расчет термических и фазовых напряжений, возникающих в приповерхностном слое при лазерном облучении поверхности чугуна, покрытой слоем меди, является сложной задачей и требует отдельного рассмотрения. Анализ литературы и оценка величины возможных напряжений в рамках упрощенной одномерной модели свидетельствует о том, что после лазерного воздействия и последующей кристаллизации чугуна и меди из расплава в ходе процесса охлаждения их из-за существенной разницы в температурных коэффициентах линейного расширения возникающие напряжения могут достигать примерно  $4 \cdot 10^8$  Па. Столь высокие значения напряжений могут способствовать переходу графита в жидкий углерод.

Таким образом, механизм образования аморфного углерода в приповерхностном слое чугуна при лазерном облучении поверхности, покрытой медью, вероятно, связан с реализацией ряда интереснейших процессов, включающих в себя возникновение значительных термических напряжений в ходе лазерного воздействия и последующего охлаждения чугуна и меди, переход графита в жидкое состояние с последующим переохлаждением жидкого углерода и преобразованием его в конденсированное аморфное состояние.

В заключение следует отметить, что описанные явления носят общий характер. Различные сочетания металлов и сплавов в совокупности с лазерным воздействием открывают широкие возможности для создания экстремальных условий с точки зрения управляющего воздействия на процессы фазовых превращений. Это может привести не только к целе-

направленному модифицированию поверхности с целью улучшения ее физико-механических характеристик, но и к созданию новых материалов с уникальными свойствами.

Автор выражает глубокую благодарность профессору В.И. Конову и И. Власову за плодотворную дискуссию и помощь.

## Список литературы

- [1] *Козлов Г.И.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 26. В. С.
- [2] *Конов В.И., Углов С.А.* // Квантовая электроника. 1998. Т. 25. С. 291–292.
- [3] *Hüttinger K.J.* // Chemical Vapour Deposition. 1998. V. 4. P. 151–158.