

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН В ЗОНЕ ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА АМОРФНЫХ СПЛАВОВ

А.М. Глезер^{1*}, И.Е. Пермякова¹, В.А. Федоров²

¹ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»,

Институт металловедения и физики металлов им.Г.В. Курдюмова, ул.Радио 23/9, Москва, 105005, Россия

²Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,

Интернациональная 33, Тамбов, 392000, Россия

*e-mail: a.glezer@mail.ru

Аннотация. Изучены особенности микрокартин деформации и разрушения в зоне лазерной обработки аморфных сплавов. Предложена методика определения склонности аморфных сплавов к образованию трещин в условиях локального нагружения и тепловой предыстории, позволяющая в свою очередь оценивать температуру отжига, соответствующую вязко-хрупкому переходу материала и температуры нагрева в зоне термовоздействия сфокусированным лазерным излучением.

1. Введение

Важными обстоятельствами, осложняющими практическое применение аморфных сплавов (АС), является их низкая термическая стабильность, возможность возникновения неоднородностей структуры, механических напряжений, например, вследствие локального нагрева. Результатом таких воздействий может быть изменение ряда свойств материала, что, в свою очередь, приведет к выходу из строя соответствующих устройств. С другой стороны, известны технологии специальной термической обработки АС для контролируемого изменения их структуры и механических свойств. Примерами могут служить: термический отжиг до температуры охрупчивания, но ниже температур, соответствующих изменению магнитных свойств АС [1], или термовоздействие сфокусированного импульсного излучения лазера [2].

В настоящее время наблюдается возрастающий интерес к использованию лазеров в технологии производства АС и совершенствовании их свойств [3-6]. Благодаря свободе выбора состава стеклообразной фазы, образующейся при лазерной закалке, появилась возможность создавать специфические метастабильные кристаллы при кристаллизации аморфной фазы требуемого состава [4]. В связи с этим актуальной задачей является и изучение эволюции свойств и структуры АС под воздействием излучения лазеров [7].

2. Методика и материалы

Объектами исследования являлись ленточные образцы АС $\text{Co}_{70,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Cr}_4\text{Si}_7\text{B}_{18}$, полученного методом спиннингования, размером 10×20 мм, толщиной 30 мкм. Лазерную обработку поверхности АС осуществляли с помощью оптического квантового генератора «КВАНТ-15» с длиной волны излучения $\lambda = 1064$ нм. Плотность энергии импульса варьировали в пределах 4-6 Дж/см². Термическую обработку АС проводили отжигом в печи в интервале $T_{\text{отж}} = 533-903$ К с выдержкой $t=10$ мин при каждой

температуре. Дифференциально-сканирующей калориметрией установлена температура кристаллизации исследуемого сплава: $T_{crys} \approx 803$ К. Деформирование и разрушение отожженных образцов АС исследовали методом микроиндентирования по Виккерсу на микротвердомере ПМТ-3. Перед индентированием образцы наносили на эластичную подложку толщиной ≈ 1 мм (клей «Момент»).

3. Результаты и обсуждение

Установлено, что в результате воздействия импульсного лазерного излучения на области АС диаметром $d = 300$ мкм–2 мм формируются локальные зоны отожженного материала. При малой площади облучаемой поверхности и достаточной энергии излучения, образуется проплав в центре зоны. Размеры зон проплава и отжига изменяются в зависимости от энергии и площади облучаемой поверхности (Рис. 1) [8].

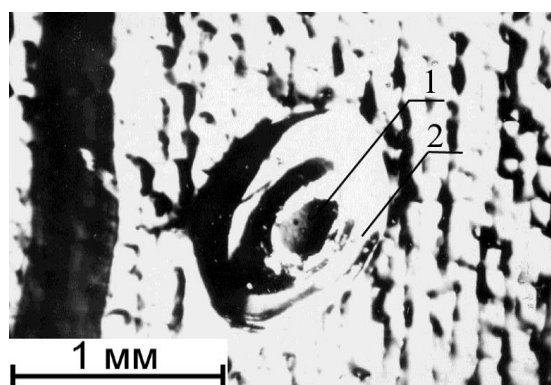


Рис. 1. Область поверхности АС, подвергнутая воздействию лазерного импульса: 1 – зона проплава, 2 – термически обработанная зона.

При увеличении площади облучаемой поверхности и равномерном распределении энергии зона проплава отсутствует, материал в зоне облучения остается аморфным или частично кристаллизуется.

В общем случае следует выделить следующие стадии взаимодействия лазерного излучения с АС: подвод светового потока и передача энергии АС, нагрев материала без видимого разрушения, расплавление материала, испарение продуктов реакции, остывание материала после лазерного воздействия [7].

При микроиндентировании термической зоны воздействия лазера формируются характерные картины разрушения (рис. 2): отпечаток от индентора окружен трещинами ориентированными параллельно его сторонам. Аналогичные микрокартины наблюдали на образцах, подвергнутых отжигу в печи (Рис. 3) [9].

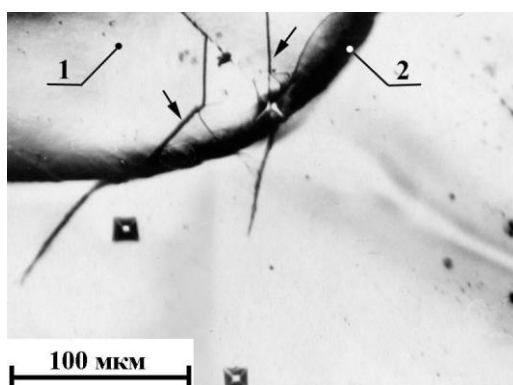


Рис. 2. Трещины, образующиеся при индентировании АС (отмечены стрелками), в зоне термического воздействия (1) лазерного пучка и на ее границе (2).

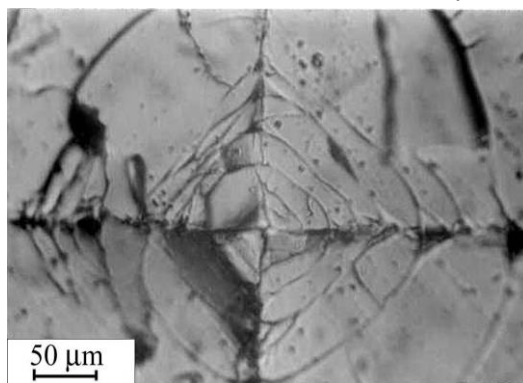


Рис. 3. Разрушение АС с формированием характерной сетки трещин параллельных граням пирамиды Виккерса, $T_{an} = 800$ К, $P = 130$ г (печной отжиг).

Вследствие действия сравнительно мощного и непродолжительного лазерного импульса, приводящего к локальному нагреву материала, отмечается резкое изменение механических характеристик на границе зоны термического воздействия. Трещины зарождаются при индентировании только зоны термического воздействия или на ее границе. Вне термически обработанной зоны трещинообразования не наблюдали (Рис. 2).

Для граничных участков термического воздействия лазера, полученных идентичными импульсами и равноудаленных от центра проплава, определена зависимость вероятности образования трещин от нагрузки на индентор при микроиндентировании на подложке. Экспериментальные результаты представлены линейной зависимостью – 1 на Рис. 4 с коэффициентом корреляции $R = 0,92$. Данная зависимость была сопоставлена с зависимостями $W(P)$ при печном отжиге для разных температур, полученных индентированием на идентичной подложке (Рис. 5).

Установлено, что нагрев граничной области зоны облучения эквивалентен отжигу в печи при $T_{an} = 658$ К в течение $t = 10$ мин. Прямая $W(P)$ для этой температуры термообработки – 2 на Рис. 5 наиболее хорошо согласуется с аналогичной линейной зависимостью 1 при лазерном облучении (Рис. 4).

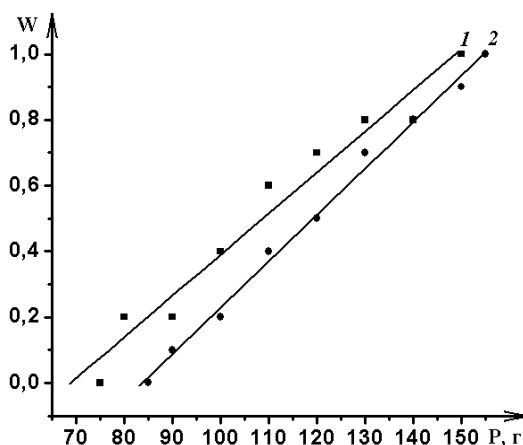


Рис. 4. Вероятность образования трещин (W) от нагрузки (P) на индентор для образца АС, подвергнутого импульсному лазерному облучению – 1 и термической обработке при температуре $T_{an} = 658$ К – 2.

Таким образом, метод определения вероятности образования трещин в АС от нагрузки на индентор позволяет, на основании сопоставления зависимостей $W(P)$, полученных на образцах, отожженных в печи, оценить эквивалентную температуру нагрева при локальной лазерной обработке. Ограничением в применении метода является температура начала

процесса кристаллизации АС. В нашем случае, экзотермический пик кристаллизации, установленный методом ДСК, для исследуемых АС соответствует $T_{crys} = 803$ К. В области этой температуры и при ее превышении зависимости $W(P)$ совпадают друг с другом или пересекаются (Рис. 5), что лишает возможности практического использования предложенного метода для определения температуры нагрева.

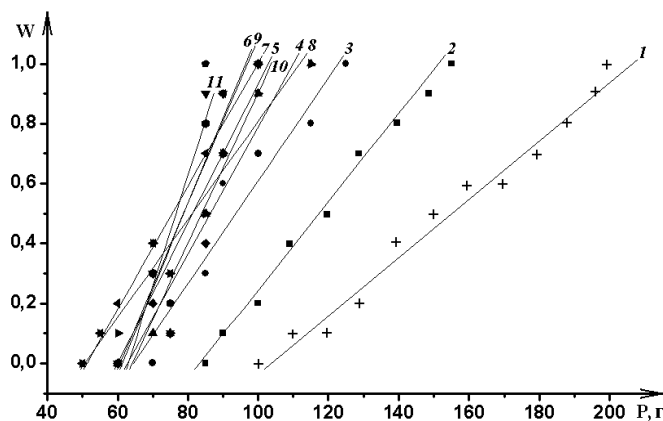


Рис. 5. Зависимости вероятности образования трещин при индентировании АС на подложке от нагрузки для различных температур отжига: 1 – 628 К; 2 – 658 К; 3 – 688 К; 4 – 718 К; 5 – 748 К; 6 – 773 К; 7 – 803 К; 8 – 823 К; 9 – 853 К; 10 – 888 К; 11 – 903 К.

4. Выводы

1. Предложена и экспериментально апробирована методика определения вероятности образования трещин в условиях локального нагружения и тепловой предыстории АС, обеспечивающая удовлетворительную точность и воспроизводимость результатов.

2. Вероятность образования трещин в процессе индентирования АС, отожженного при температурах выше критической, прямо пропорциональна нагрузке на индентор. Критическая температура, при которой возможно трещинообразование в АС, зависит от материала подложки и наиболее достоверна на «эластичной» подложке. Склонность к образованию трещин в АС носит экспоненциальный характер при температуре выше критической, что обусловлено термоактивированными атомными перестройками, сопровождающими процессы структурной релаксации и начала кристаллизации.

3. Предложенная методика определения вероятности формирования трещин в условиях локального нагружения на эластичной подложке позволяет достоверно определить температуру отжига, соответствующую вязко-хрупкому переходу АС, которая близка при ее оценке альтернативными методами (U -методом на изгиб АС). Главным достоинством метода является возможность проведения исследований в микрообъемах образцов (например, отдельных составляющих композитов из АС, а также областей локального нагрева или термовоздействия лазера), не приводя к катастрофическому макроразрушению материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-02-00075 «А»).

Литература

- [1] М.А. Хусаинов, Н.Н. Белякова, О.В. Летенков, В сборнике: *Научные труды I Международного семинара «Актуальные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева* (Великий Новгород, 15-18 октября 1997), с. 204.

- [2] Н.А. Скулкина, М.А. Горланова, О.А. Иванов, И.А. Попова, Л.Е. Цветкова, Е.А. Степанова, А.С. Смышляев, П.Е. Маркин // *Физика металлов и металловедение* **83(5)** (1997) 54.
- [3] А.Л. Семенов, А.А. Гаврилюк, А.В. Гаврилюк, А.В. Семиров, А.Н. Малов, Б.В. Гаврилюк, Н.В. Турик, А.Ю. Моховиков // *Неорганические материалы* **46(6)** (2010) 694.
- [4] *Металлические стекла. Атомная структура и динамика, электронная структура, магнитные свойства* (Мир, М., 1986), том 2.
- [5] В.В. Гиржон, А.В. Смоляков, Т.С. Ястребова // *Физика металлов и металловедение* **96(6)** (2003) 73.
- [6] Б. Ретфельд, К. Соколовски-Тинтен, В.В. Темнов, С.И. Кудрямов, Й. Биалковски, А. Кавалери, Д. фон дер Линде // *Известия Российской академии наук. Серия физическая* **65(4)** (2001) 502.
- [7] В.И. Бойко, А.Н. Валяев, А.Д. Погребняк // *Успехи физических наук* **169(11)** (1999) 1243.
- [8] I.V. Ushakov, V.A. Feodorov, I.J. Permyakova, In: *Proceedings of SPIE (The international Society for Optical Engineering). Sixth International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering* (Russia, St. Petersburg, June 10-16, 2002.), Vol. 5127, p. 246.
- [9] И.В. Ушаков, В.А. Федоров, И.Е. Пермякова // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов* **7** (2003) 43.

FEATURES OF CRACKS FORMATION IN THE LASER TREATMENT ZONE OF AMORPHOUS ALLOYS

A.M. Glezer^{1*}, I.E. Permyakova¹, V.A. Feodorov²

¹I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy, Radio, 23/9 build 2, Moscow, 105005, Russia

² Derzhavin Tambov State University, International, 33, Tambov, 392000, Russia

*e-mail: a.glezer@mail.ru

Abstract. The deformation and fracture of amorphous alloys in the zone of laser treatment were investigated. A technique of determination the liability to cracking of amorphous alloys under local loading and thermal history were proposed. This method allows to estimate the annealing temperature, which corresponds to the ductile-brittle transition of the material and heat temperature in the zone of laser treatment.

Acknowledgement

This work was financially supported by RFBR (grant № 14.02-00075 «А»).

References

- [1] M.A. Husainov, N.N. Belyakov, O.V. Letenko, In: *Proceedings of the International Seminar "Actual Problems of Strength" by V.A. Likhachev* (Russia, Veliky Novgorod, October 15-18, 1997), p. 204.

- [2] N.A. Skulkina, M.A. Gorlanova, O.A. Ivanov, E.A. Stepanova, A.S. Smyshlyaev, P.E. Markin, I.A. Popova, L.E. Tsvetkova // *The Physics of Metals and Metallography* **83(5)** (1997) 54.
- [3] A.L. Semenov, A.A. Gavriluk, N.V. Turik, A.Y. Mokhovikov, A.V. Gavriluk, A.V. Semirov, B.V. Gavriluk, A.N. Malov // *Inorganic Materials* **46(6)** (2010) 617.
- [4] *Glassy metals II: Atomic Structure and Dynamics, Electronic structure, Magnetic Properties* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1983).
- [5] V.V. Girzhon, A.V. Smolyakov, T.S. Yastrebova // *The Physics of Metals and Metallography* **96(6)** (2003) 73.
- [6] B. Retfeld, K. Sokolowski-Tinten, V.V. Temtov, S.I. Kudryamov, Y. Bialkovski, A. Cavaleri, D. von der Linde // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **65(4)** (2001) 502.
- [7] V.I. Boiko, A.N. Valyaev, A.D. Pogrebnyak // *Physics-Uspekhi* **42(11)** (1999) 1139.
- [8] I.V. Ushakov, V.A. Feodorov, I.J. Permyakova, In: *Proceedings of SPIE (The International Society for Optical Engineering). Sixth International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering* (Russia, St. Petersburg, June 10-16, 2002), Vol. 5127, p. 246.
- [9] I.V. Ushakov, V.A. Feodorov, I.E. Permyakova // *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* **7** (2003) 43. (In Russian).