

## ОЦЕНКА УРОВНЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ НА НОПОРИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

© 2011 С.П. Мурзин, В.И. Трегуб

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 09.03.2011

Выполнена оценка уровня внутренних напряжений в приповерхностном слое нанопористых металлических материалов, полученных методом селективной лазерной сублимации. При исследовании образцов из медно-цинкового сплава использовался дифрактометр ДР-01 «Радиян». Установлено, что в результате селективной лазерной сублимации в приповерхностном нанопористом слое образуются относительные внутренние напряжения величиной около  $11 \cdot 10^{-3}$ , что при оценке главных остаточных напряжений для плосконапряженного состояния соответствует значению  $\sigma = 2,8$  ГПа. Ключевые слова: материал металлический, напряжения внутренние, слой приповерхностный, обработка лазерная, дифрактометр рентгеновский.

### ВВЕДЕНИЕ

В работах [1-5] обоснована целесообразность формирования наноразмерных пористых структур в металлических сплавах типа твердый раствор путем сублимации атомов компонента сплава с более высокой упругостью пара при повышенной температуре. Как при термической обработке в вакууме, так и при лазерной обработке сублимация с поверхности заготовки компонента сплава с более высокой упругостью паров приводит к образованию вакансий. При этом в материале создается градиент концентраций, и в дальнейшем данный компонент сублимирует с поверхности в той мере, в какой будет обеспечена его диффузия к поверхности.

Значительное влияние на интенсивность протекания диффузионных процессов оказывают структура материала и наличие внутренних напряжений. Несмотря на то, что фронт зерен намного шире фронта границ, эффективный коэффициент диффузии растет с измельчением зерен за счет усиления роли границ, т.к. на границах зерен решетка сильно искажена, следовательно, плотность дефектов значительно выше, чем внутри зерна. Известно, что при реализации как межузельного, так и вакансионного механизмов диффузии наличие дефектов и действие внутренних напряжений значительно ускоряют диффузионные процессы [6, 7 и др.]. Целесообразно провести оценку уровня внутренних напряжений в приповерхностном слое нанопористых твердокристаллических материалов.

*Мурзин Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок. E-mail: murzin@ssau.ru.*

*Трегуб Валерий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения. E-mail: murzin@ssau.ru.*

### ОЦЕНКА УРОВНЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА РЕНТГЕНДИФРАКЦИОННОГО АНАЛИЗА

Выполнены исследования приповерхностного слоя нанопористого металлического материала типа твердый раствор – латуни Л62, полученного методом селективной лазерной сублимации. Использовались следующие параметры и режимы дифрактометра ДР-01 «Радиян», позволяющего проводить измерения спектров дифракции в геометрии Дебая-Шерера и Брэгга-Брентано:

- тип трубки: 0,15-БСВ-33-Сц;
- бета-фильтр: никелевая фольга 30 мкм;
- детектор СЕС-06: сцинтилляционный с кристаллом CsI;
- щель на детекторе: 0,3 мм.

Образцы для проведения исследований получали лазерным воздействием с высокой частотой следования импульсов. Применялся СО<sub>2</sub> слаб-лазер ROFIN DC 010 с диффузионным охлаждением и высокочастотной накачкой. Выходная мощность лазерной установки регулировалась в диапазоне 100...1000 Вт. Диаметр выходного пучка с гауссовским распределением интенсивности составлял  $20 \cdot 10^{-3}$  м, а расходимость – не более  $0,15 \cdot 10^{-3}$  рад. Дифрактограммы центральной и периферийной областей зоны термического влияния образца из латуни Л62 после проведения селективной лазерной сублимации с образованием в приповерхностном слое нанопористой структуры представлены на рис. 1 и 2. Дифрактограмма образца из латуни Л62 в состоянии поставки приведена на рис. 3.

Анализ представленных дифрактограмм показал, что наиболее существенные изменения ин-

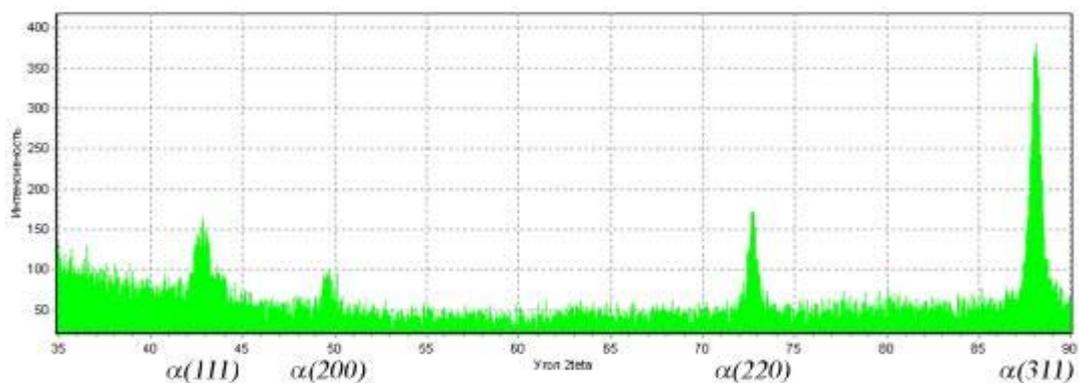


Рис. 1. Дифрактограмма центральной области зоны термического влияния образца из латуни Л62 после проведения селективной лазерной сублимации

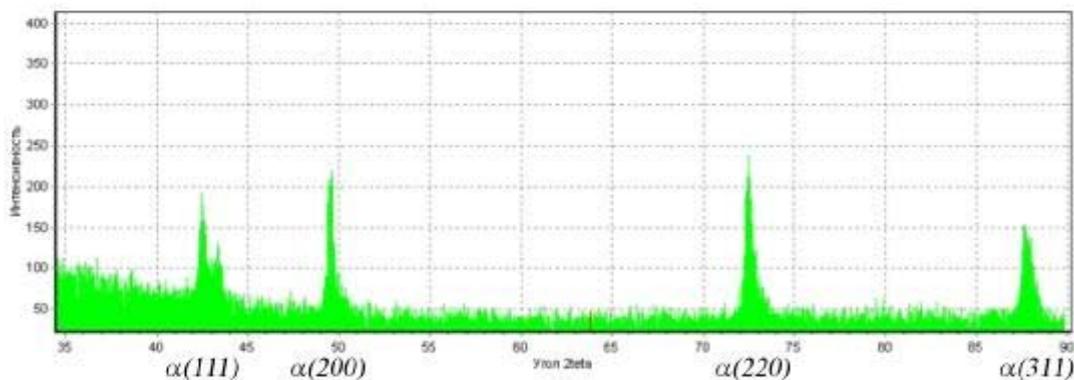


Рис. 2. Дифрактограмма периферийной области зоны термического влияния образца после проведения селективной лазерной сублимации

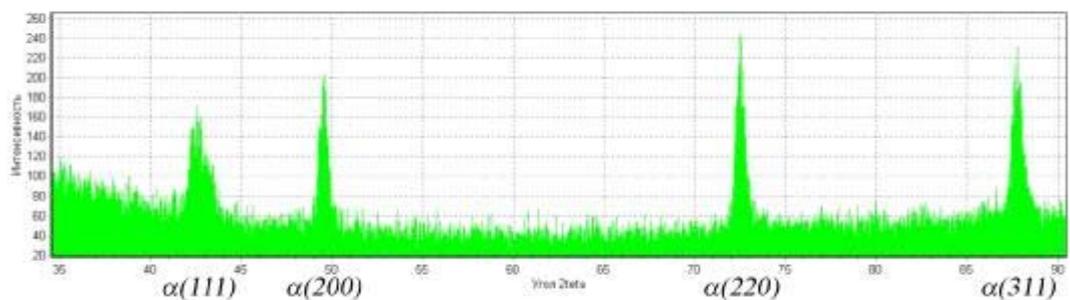


Рис. 3. Дифрактограмма образца из латуни Л62 в состоянии поставки

тенсивности после проведения селективной лазерной сублимации при различных режимах обработки происходят по линиям атомной межкристаллической плоскости с индексом интерференции (311), имеющим высокую разрешимость, поэтому данные линии были выбраны для проведения количественной оценки результатов рентгенографического анализа латуни Л62. Для данных линий проведен программный расчет максимумов интенсивностей пиков, определено значение фона и углов  $2\theta$  и  $\theta$ . На рис. 4, 5 приведены участки дифрактограмм линий  $\alpha(311)$  в центральной и периферийной областях зоны термического влияния после проведения селективной лазерной сублимации образца из латуни Л62. На рис. 6 приведен участок дифрактограммы ли-

ний  $\alpha(311)$  латуни Л62 в состоянии поставки.

В табл.1 приведены результаты рентгеноструктурных исследований латуни Л62 после лазерной обработки в центральной и периферийной областях зоны термического влияния, а также в состоянии поставки по линии атомной межкристаллической плоскости с индексом интерференции (311).

Величины интенсивностей линий  $I_{расч}$ , приведенные в таблице 1, получены при осуществлении программной коррекции (вычитании) полученных полных интегральных интенсивностей линий на величину фона. Определение полученных полных интегральных интенсивностей линий осуществлялось при аппроксимации рентгенограммы по всем точкам фона методом наи-

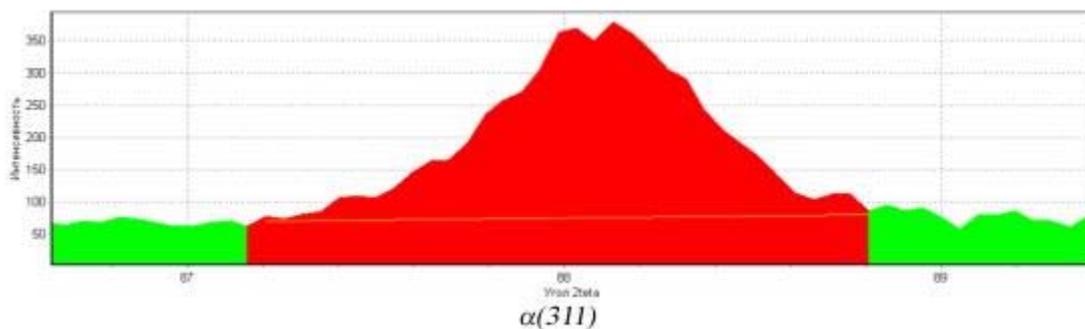


Рис. 4. Участок дифрактограммы линии  $\alpha$  (311) в центральной области зоны термического влияния образца после проведения селективной лазерной сублимации

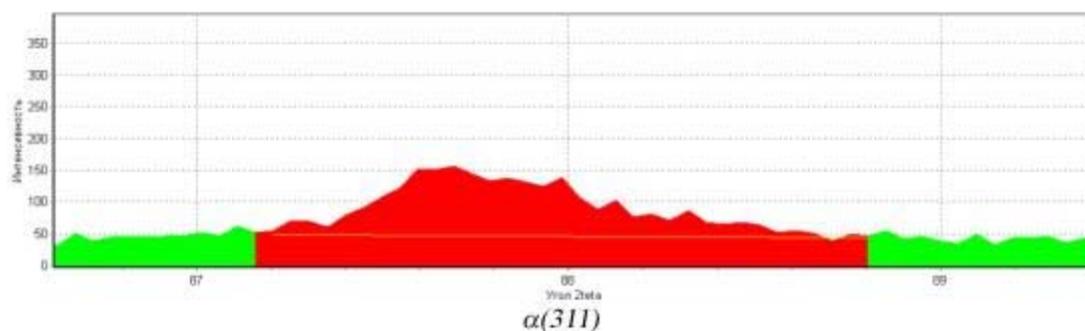


Рис. 5. Участок дифрактограммы линии  $\alpha$  (311) в периферийной области зоны термического влияния образца после проведения селективной лазерной сублимации латуни Л62

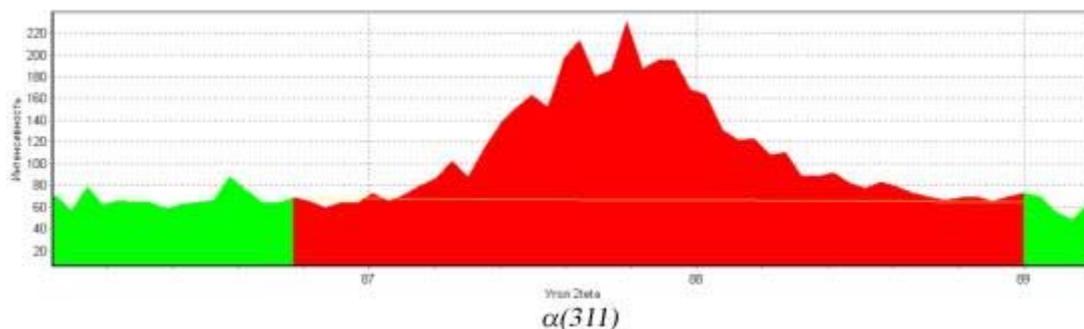


Рис. 6. Участок дифрактограммы линии  $\alpha$  (311) латуни Л62 в состоянии поставки.

Таблица 1. Результаты рентгеноструктурных исследований латуни Л62 после лазерной обработки при различных режимах и в состоянии поставки по линии атомной межкристаллической плоскости с индексом интерференции (311)

Фаза	Режим обработки	Индекс интерференции линии hkl	Межплоскостное расстояние $d/n, \text{Å}$	Интенсивность линий		Угол	
				$I_{\text{полн}}$	$I_{\text{расч}}$	$2\theta$	$\theta$
Твердый раствор Cu-Zn	В центральной области зоны термического влияния	(311)	1,110	6774	4212	88,01	44,005
	В периферийной области зоны термического влияния	(311)	1,112	3122	1547	87,80	43,90
	Материал в состоянии поставки	(311)	1,112	5216	2161	87,78	43,89

меньших квадратов, при этом интервал съемки разбивался на несколько участков, и коэффици-

енты полинома фона определялись для каждого участка при сохранении постоянной степени

полинома. Для подтверждения адекватности результатов проведенных рентгеноструктурных исследований нанопористого металлического материала типа твердый раствор проведен рентгенографический анализ материала после термической обработки без реализации механизма селективной сублимации, в качестве модельного материала выбрана медь М1.

Анализ результатов рентгеноструктурных исследований металлического материала типа твердый раствор – латуни Л62 после проведения лазерной обработки и в состоянии поставки показал, что:

– при формировании нанопористой структуры методом селективной лазерной сублимации изменения фазового состава материала не происходит;

– лазерная обработка в центральной области зоны термического влияния приводит к увеличению (в 1,9 раза) интенсивности линии  $\alpha$  (311) по сравнению с интенсивностью данной линии для материала в состоянии поставки; в периферийной области зоны термического влияния имеет место ее уменьшение (в 1,4 раза), что свидетельствует о существенном перераспределении ориентации зеренной структуры сплава;

– изменение ширины и угла линий после лазерной обработки свидетельствует об изменении плотности дислокаций и распределении внутренних напряжений. Установлено, что в результате селективной лазерной сублимации в приповерхностном нанопористом слое образуются относительные внутренние напряжения величиной около  $11 \cdot 10^{-3}$ , что при оценке главных остаточных напряжений (при условии плосконапряженного состояния) соответствует значению  $\sigma = 2,8$  ГПа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выполнена оценка уровня внутренних напряжений в приповерхностном слое нанопористого металлического материала типа твердый раствор – латуни Л62, полученного методом селективной лазерной сублимации. Для проведения рентгенодифракционного анализа использовался дифрактометр ДР-01 «Радан». Анализ результатов проведенных исследований показал, что наиболее существенные изменения интенсивности после проведения селективной лазерной сублимации при различных режимах обработки происходят по линиям атомной межкристаллической плоскости с индексом интерференции (311), имеющим высокую разрешимость, поэтому данные линии были выбраны для проведения количественной оценки результатов рентгенографического анализа латуни Л62. Для данных линий проведен программный расчет максимумов интенсивностей

пиков, определено значение фона и углов  $2\theta$  и  $\theta$ . Величины расчетных интенсивностей линий получены при осуществлении программной коррекции (вычитании) полученных полных интегральных интенсивностей линий на величину фона. Определение полученных полных интегральных интенсивностей линий осуществлялось при аппроксимации рентгенограммы по всем точкам фона методом наименьших квадратов, при этом интервал съемки разбивался на несколько участков, и коэффициенты полинома фона определялись для каждого участка при сохранении постоянной степени полинома.

Анализ результатов рентгеноструктурных исследований металлического материала типа твердый раствор – латуни Л62 после проведения лазерной обработки и в состоянии поставки показал, что:

– при формировании нанопористой структуры методом селективной лазерной сублимации изменения фазового состава материала не происходит;

– лазерная обработка в центральной области зоны термического влияния приводит к увеличению (в 1,9 раза) интенсивности линии  $\alpha$  (311) по сравнению с интенсивностью данной линии для материала в состоянии поставки; в периферийной области зоны термического влияния имеет место ее уменьшение (в 1,4 раза), что свидетельствует о существенном перераспределении ориентации зеренной структуры сплава;

– изменение ширины и угла линий после лазерной обработки свидетельствует об изменении плотности дислокаций и распределении внутренних напряжений. Установлено, что в результате селективной лазерной сублимации в приповерхностном нанопористом слое образуются относительные внутренние напряжения величиной около  $11 \cdot 10^{-3}$ , что при оценке главных остаточных напряжений (при условии плосконапряженного состояния) соответствует значению  $\sigma = 2,8$  ГПа.

## БЛАГОДАРНОСТИ

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение фокусаторов излучения при формировании нанопористых структур твердокристаллических материалов / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.В. Меженин // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31, № 2. С. 48-51.
2. Лазерное наноструктурирование металлических материалов с применением подвижных фокусаторов

- излучения / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.В. Меженин, Е.Л. Осетров // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32, № 4. С. 353-356.
3. Создание нанопористых металлических материалов с применением лазерного воздействия / С.П. Мурзин, Е.Л. Осетров, Н.В. Трегуб, А.М. Никифоров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11, № 5. С. 102-105.
  4. Повышение равномерности глубины зоны образования нанопористых структур при формировании лазерного воздействия фокусатором излучения / С.П. Мурзин, Е.Л. Осетров, Н.В. Трегуб, С.А. Малов // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, № 2. С.219-224.
  5. Оптическая система для проведения селективной лазерной сублимации компонентов металлических сплавов / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, В.И. Трегуб // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, № 4. С. 481-486.
  6. Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей и импульсных деформаций. в 2 т. / В.Ф. Мазанко, А.В. Покоев, В.П. Миронов и др. М.; Самара: Машиностроение-1; Изд-во Самарского университета, 2006. Т. 2. 320 с.
  7. Каур И., Густ В. Диффузия по границам зерен и фаз. М.: Машиностроение, 1991. 448 с.

## ESTIMATION OF LEVEL OF INTERNAL PRESSURE IN NEAR-SURFACE A LAYER NANOPOROUS THE METAL MATERIALS

© 2011 S.P. Murzin, V.I. Tregub

Samara State Aerospace University

The investigation of internal stress level in near-surface layer of nanoporous metal materials, received by the method of selective laser sublimation, is executed. Researches of copper-zinc alloy specimens were spent with use of diffractometer DR-01 «Radian». It is established that as a result of selective laser sublimation in near-surface nanoporous layer relative internal stress about  $11 \cdot 10^{-3}$  is formed, that at investigation of main temper for planar stressed state condition corresponds to value  $\sigma = 2,8$  GPa.

Keywords: metal material, internal stress, near-surface layer, laser treatment, X-ray diffractometer.

---

*Serguei Murzin, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Power Plant Automatic Systems sub-department.*

*E-mail: murzin@ssau.ru*

*Valerij Tregub, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Process Metallurgy and Aeronautical Materials Science sub-department. E-mail: murzin@ssau.ru*