

УДК 53.043

## ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЦЕЛЬЮ ЗАЛЕЧИВАНИЯ ДЕФЕКТОВ

© Ю.В. Баранов, Г.Ж. Сахвадзе, В.В. Столяров

*Институт машиноведения РАН, Россия, Москва*

***Аннотация.** Работа посвящена решению фундаментальной проблемы материаловедения – увеличения прочностных и функциональных свойств наноструктурных сплавов путем залечивания микродефектов импульсными методами. Прикладной аспект работы – получение эффективного инструмента для залечивания трещин, что даст возможность управления прочностными и функциональными характеристиками деталей и конструкций. Такой инструмент необходим при проектировании новых перспективных материалов. В настоящей работе залечивание дефектов осуществляется импульсными воздействиями на наноструктурные сплавы: импульсным током и лазерной ударной волной.*

***Ключевые слова:** долговечность элементов конструкций, залечивание микродефектов импульсными воздействиями.*

### **Введение.**

Наличие в материале микродефектов, возникающих как при изготовлении, так и при эксплуатации, является одним из факторов, существенно снижающим долговечность элементов конструкций [1,2]. Перспективным направлением, потенциально способным существенно повысить ресурс конструкций, является залечивание микродефектов импульсными воздействиями, в частности, лазерной ударной волной и импульсным током [3,4]. В настоящей работе исследованы возможности данных методов применительно к алюминиевым и титановым наноструктурным сплавам, полученным методами интенсивной пластической деформации (ИПД).

Исследования характера образующихся дефектов и кинетики их накопления при деформировании наноструктурных титановых сплавов показали, что для различных материалов степень поврежденности при разрушении не является постоянной величиной, а зависит от значительного числа факторов (химического состава, структуры, термической обработки и пр.) и в значительной степени определяется режимами ударного нагружения [5].

Образование микродефектов в процессе деформации приводит к снижению конструкционной прочности и надежности металла; кроме того, изменяются его физические свойства, в частности, плотность. Известно, что относительное изменение плотности в результате появления дефектов может достигать величины порядка нескольких процентов. В работе был оценен вклад кристаллических дефектов и напряжений в изменение плотности при деформации. В частности, было показано, что уменьшение плотности материала за счет увеличения плотности дислокаций не превышает  $10^{-6}$  г/см<sup>3</sup>; вклад в изменение плотности от увеличения концентрации вакансий –  $10^{-13}$  г/см<sup>3</sup>; от ориентированных микронапряжений –  $10^{-6}$  г/см<sup>3</sup>. Таким образом, был сделан вывод, что изменение плотности порядка нескольких процентов может быть только результатом образования микродефектов (микропор и микротрещин). В последствии этот вывод был подтвержден прямым наблюдением дефектов с помощью растровой и электронной микроскопии.

Исследование ранних стадий деформации при растяжении показало, что первые поры образуются при напряжениях, меньших предела текучести. Количество дефектов с увеличением степени деформации растет по линейному закону. После образования в образце

шейки возникающие касательные напряжения, в основном, влияют на процессы образования

новых трещин и практически не влияют на рост пор. Однако, было установлено, что импульсные воздействия, в частности, импульсный ток и лазерные ударные волны, могут существенно уменьшить размеры существующих дефектов.

В качестве критерия, используемого для оценки поврежденности материала, была выбрана плотность [6]. Измеренная методом гидростатического взвешивания с прецизионной точностью, плотность очень чувствительна к наличию в материале микродефектов, присутствующих в виде микропор, несплошностей, микротрещин. Необходимо отметить, что плотность материала и ее изменения также зависят от фазовых превращений, а именно, от выделения или растворения фаз. По этой причине любое исследование, связанное с залечиванием дефектов, наличие которых устанавливается по изменению плотности, должно включать в себя и комплекс рентгеноструктурных исследований, направленных на выявление в материале состава фаз и их количества.

Плотность металла образца рассчитывается по формуле [6]:

$$\rho = [P_B \rho_{ж} - P_{ж} \rho_B] / [P_B - P_{ж}]$$

где:  $\rho$  - плотность образца;  $P_B, P_{ж}$  – вес образца на воздухе и в жидкости, соответственно;  $\rho_B$  – плотность воздуха,  $\rho_{ж}$  - плотность тетрабромэтана. Прецизионный метод гидростатического взвешивания позволяет определить плотность различных металлов и сплавов с точностью до  $10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>.

### Экспериментальные исследования по залечиванию микродефектов электроимпульсным током.

В качестве материала был выбран наноструктурный сплав  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ . Дефектность в образцах создавалась деформацией растяжением. Для построения зависимости изменения плотности от степени деформации были приготовлены образцы с разной степенью деформации, из центральной части которых вырезали фрагменты массой  $m=6$  г. На рис. 1 и 2 представлены диаграмма растяжения и зависимость изменения плотности от степени деформации для выбранного сплава. Как видно из рисунка, с увеличением деформации плотность монотонно убывает и при деформации больше 34% происходит резкое снижение плотности.

Перед электроимпульсной обработкой (ЭИО) на каждом из образцов задавалась определенная степень деформации 15 или 50%. Затем образцы помещались в захваты генератора электроимпульсов, и на каждый из образцов оказывалось электроимпульсное воздействие по индивидуальному режиму. В работе использовался широкий температурно-временный интервал. Длительность импульса изменялась от 0,04 до 1,3 сек, диапазон температур от 90 до 800°C. Для определения средней температуры нагрева образцов, происходящее при ЭИО, в центральной части каждого образца была приварена хромель-алюмелевая термопара  $\varnothing 0,4$  мм. После ЭИО на центральной части образцов механической резкой, при интенсивном охлаждении, вырезались навески  $m=6$  г. для определения плотности методом гидростатического взвешивания.

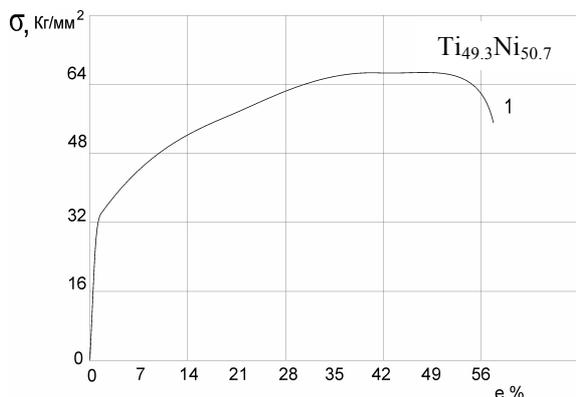


Рис. 1. Диаграмма растяжения наноструктурного сплава  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$

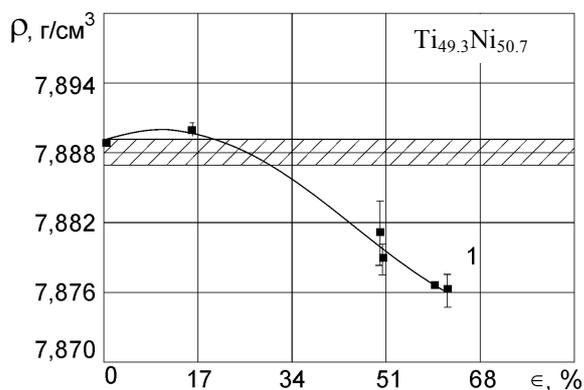


Рис. 2. Зависимость изменения плотности сплава  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$  от степени деформации

По результатам экспериментов были построены графические зависимости изменения плотности от температуры при  $\tau_c = \text{const}$ , и изменения плотности от длительности импульса при  $t^\circ C = \text{const}$ , на каждую степень деформации, для двух исследуемых сплавов.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости изменения плотности образцов из  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$  от длительности импульса при температуре нагрева  $210^\circ C$

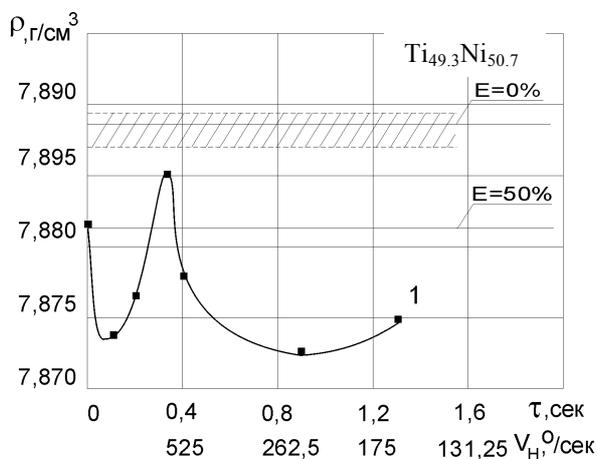


Рис. 3. Зависимость изменения плотности наноструктурного сплава  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$  при степени деформации 50%, от длительности импульса. Температура нагрева  $210^\circ C$ .

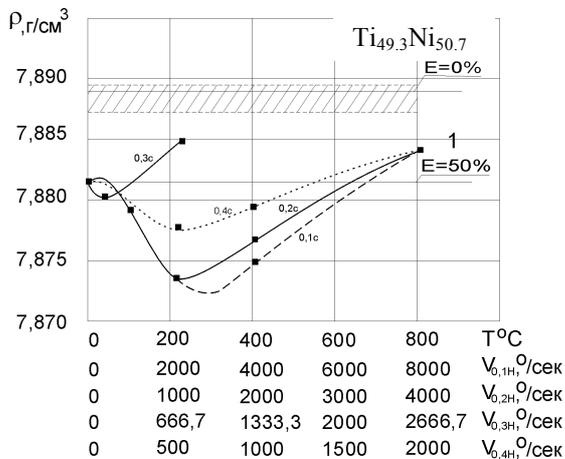


Рис. 4. Зависимость изменения плотности наноструктурного сплава  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$  при степени деформации 50% от температуры нагрева при различных длительностях импульса

### Результаты и их обсуждение.

Различия в изменениях плотности от длительности импульса наблюдается при температурах  $150-600^\circ C$ . Причем, импульс с длительностью 0,3 сек. приводит к восстановлению плотности при температурах  $300-500^\circ C$ , в отличие от других длительностей, реализация которых в данном температурном интервале способствует резкому снижению

плотности, а, следовательно, увеличению дефектности исследуемых сплавов.

Анализ изменения плотности от температуры показывает, что возможно восстановление плотности материала при длительностях импульса 0,3 сек и нагреве от 250 до 400°C, либо при температурах нагрева выше 800°C. При этом длительность импульса является несущественным параметром, и данный способ переходит в разряд скоростного - нагрева прямым пропусканием тока.

Рентгеновское исследование фазового состава наноструктурного сплава  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$  после деформации и обработки импульсным током проведено на дифрактометре «АРДАНС-1». Определялось количество мартенсита и аустенита. В результате установлено, что в исходных образцах однофазная аустенитная структура при деформации 15-20% частично, а при более высокой степени деформации полностью, трансформируется в мартенситную составляющую.

### **Экспериментальные исследования по залечиванию микродефектов лазерными ударными волнами.**

При фокусировке короткого (в диапазоне 3-30 нс) и интенсивного ( $> 10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup>) лазерного импульса на поверхность наноструктурного материала, поверхностные слои мгновенно испаряются (явление абляции) и образуется поверхностная плазма с высокими температурой (приблизительно 10000 К) и давлением ( $> 1$  ГПа). Эта плазма при расширении от облучаемой поверхности излучает ударные волны, и механические импульсы распространяется как в среде, так и в конструкции (рис. 5). В наших экспериментах использовался неодимовый импульсный лазер, генерирующий выходную мощность 80-100 Дж. с продолжительностью импульса около 20 нс, форма которого может быть как гауссовской, так и иметь несимметричный профиль с укороченным временем нарастания (УВН) [7,8].

Разработана методика определения оптимальных параметров воздействия лазерной ударной волной с целью достижения максимального залечивания дефектов. Они связаны со значениями пикового давления в ударной волне, которые, в свою очередь, зависят от плотности мощности лазерного излучения и длительности лазерного импульса, а также от механических характеристик исследуемых материалов. Показано также, что при повторных воздействиях лазерного импульса наблюдается дальнейшее уменьшение размеров дефектов вплоть до их «схлопывания».

Определены оптимальные параметры воздействия лазерной ударной волной с целью залечивания дефектов в наноструктурном сплаве  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ . Эксперименты показали, что при расположении эллиптических дефектов с длинной осью перпендикулярно фронту лазерной ударной волны при пиковом давлении 5 ГПа, размеры дефектов уменьшаются до 25 %. При двух последующих воздействиях наблюдается дополнительное уменьшение размеров дефектов примерно на 10 %. После этого «залечивающий эффект» прекращается [9].

Отличительной особенностью применения обоих импульсных методов (в особенности, ЭИО) для залечивания дефектов в наноструктурных сплавах (по сравнению с их крупнозернистыми аналогами) является залечивание внутренних дефектов, возникающих при пластической деформации, в то время как для крупнозернистых сплавов ярко выражен эффект залечивания поверхностных дефектов. Поэтому в дальнейшем перспективным представляется разработка методики комбинированной обработки материалов через ЭИО и лазерной ударной волной.

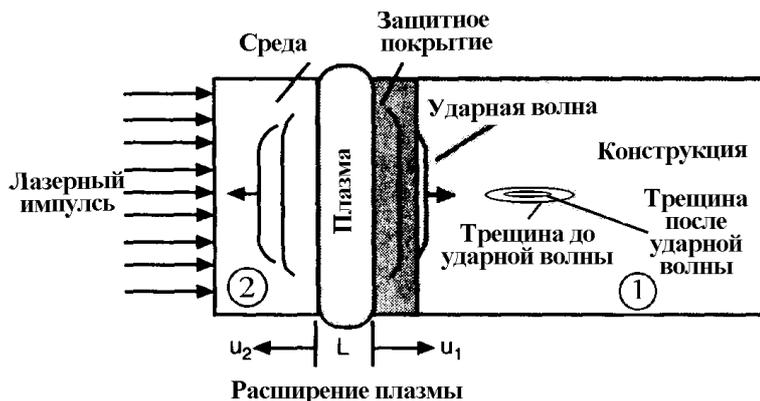


Рис. 5. Схема экспериментальной установки по залечиванию дефектов лазерной ударной волной

### Выводы:

1. Электроимпульсная обработка является прогрессивным методом залечивания микротрещин в наноструктурном сплаве  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ , о чем свидетельствует почти полное восстановление их плотности. Так, в наноструктурном состоянии в сплаве, подвергнутом деформации 15%, залечивание микродефектов происходит при низких температурах 200-350°C за время 0.1 сек.

2. При степени деформации образцов 50% тенденция к залечиванию проявляется при температурах нагрева выше 800°C, причем время воздействия существенного влияния не оказывает. При низкотемпературной электроимпульсной обработке ( $T = 200-450^\circ C$ ) выявлен временной режим обработки  $\tau = 0.3$  сек, при котором происходят процессы залечивания дефектов. Причем, восстановление плотности достигает исходных значений также, как и при высокотемпературном нагреве

3. Разработана методика воздействия лазерной ударной волной с целью достижения максимального эффекта залечивания дефектов. Показано, что при расположении эллиптических дефектов с длинной осью перпендикулярно фронту лазерной ударной волны при пиковом давлении 5 ГПа, размеры дефектов уменьшаются до 25 %. При двух последующих воздействиях наблюдается дополнительное уменьшение размеров дефектов примерно на 10 %. После этого «залечивающий эффект» прекращается.

4. Отличительной особенностью применения импульсных технологий (в особенности, МЭХО) в наноструктурных сплавах (по сравнению с их крупнозернистыми аналогами) является существенно более эффективное залечивание внутренних дефектов, возникающих при их пластической деформации, в то время как для крупнозернистых сплавов ярко выражен эффект залечивания поверхностных дефектов.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (Проект 07-08-12132-офи).

### Литература

1. Куманин В.И., Ковалева Л.А., Сизов И.Г., Чертов Л.М. Залечивание дефектов в аустенитных сталях методом печного нагрева. // Структура, механические и физические свойства металлических материалов. М.: МИП, 1983. С.3-27.
2. Лариков Л.Н. Залечивание дефектов при механико-термической обработке металлов. Киев.: Наукова думка, 1982. 460 с.

3. Слезов В.В. Теория дислокационного механизма роста и залечивания пор и трещин под нагрузкой // ФТТ. 1974. Т.16. №3. с.785-794.
4. Финкель В.М., Иванов В.М., Головин Ю.И. Залечивание трещин в металлах скрещенным электрическим и магнитным полями // Проблемы прочности. 1983, №4. с.54-58.
5. Баранов Ю.В., Тананов А.И., Корягин С.Н. и др. Субструктурные изменения в меди при импульсном воздействии электрического тока //ФИЗХОМ. 1990, №4. с.113-118.
6. Тройцкий О.А., Баранов Ю.В., Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы и технологий обработки современных материалов. В 2-х томах. – Москва-Ижевск, 2004.
7. Сахвадзе Г.Ж., Баранов Ю.В., Столяров В.В., Валиев Р.З. Перспективы получения градиентных наноструктурных материалов с использованием лазерных ударных и электроимпульсных волн. Сборник трудов международной научно-практической конференции «НАНОТЕХНОЛОГИИ – ТЕХНОЛОГИИ XXI века» (24-26 мая 2006г., г. Москва). С. 114-118.
8. Столяров В.В., Сахвадзе Г.Ж., Баранов Ю.В. Импульсные технологии обработки для получения наноструктурных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2007. Выпуск 3. С. 13-20.
9. Сахвадзе Г.Ж., Столяров В.В., Баранов Ю.В. Лазерно-ударно-волновые и электроимпульсные методы обработки объемных наноструктурных материалов // Труды международной конференции «Неклассические задачи механики». Том 1. – Кутаиси (Грузия), 25-27 октября 2007 г. С. 75-84.

*Поступила: 03.08.10.*