

$$\exists \theta_{\alpha} \forall r_{i1} \forall r_{i2} [E_{\alpha}(r_{i1}) \wedge E_{\alpha}(r_{i2}) \wedge (\theta_{\alpha}^{r_{i1}} h \theta_{\alpha}^{r_{i2}}) \rightarrow (r_{i1} \approx r_{i2})],$$

где h – символ отношения предпочтения, который может принимать значения: «>», «≥», «<», «≤».

Такой подход позволяет формализовать условия выбора некоторого решения r_i по конкретному значению установленного критерия выбора t_q : $(\theta_{\alpha}^r h t_q)$.

Тогда совокупность предикатов позволяет выбрать решение r_i по нескольким критериям выбора $t_{q1}, t_{q2}, \dots, t_{qn}$, которые соответствуют n различным свойствам решения r_i . В этом случае условие выбора решения r_i принимает вид: $\bigwedge_{i=1}^n (\theta_{\alpha}^r h_i t_{q_i})$.

Применение формулы в задачах выбора разноименных конструкторско-технологических решений, обладающих различными свойствами α и δ , между которыми существует связь по взаимной зависимости свойств, т.е. выполняется условие: $E_{\alpha}(r_i) \rightarrow E_{\delta}(r_j)$, позволяет организовать выбор решений:

$$\exists \theta_{\alpha} \forall r_i \forall r_j [E_{\alpha}(r_i) \wedge E_{\delta}(r_j) \wedge (\theta_{\alpha}^r h_1 t_1) \wedge (\theta_{\delta}^r h_2 t_2) \rightarrow (r_i \approx r_j)].$$

Однако в общем случае полученное условие не выполняется, так как часто неизвестны взаимосвязи свойств решений r_i и r_j : $E_{\alpha}(r_i) \rightarrow E_{\delta}(r_j)$.

При обосновании выбора конструкторско-технологических решений и синтезе комбинированных методов, совмещающая электрофизические, электрохимические, термомеханические и др. воздействия, необходимо учитывать стабильность формирования параметров качества обработки и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического процесса путем применения обратных связей между механизмами воздействия. Поэтому в качестве целевой функции вместо конкретных значений совокупности критериев выбора $t_{q1}, t_{q2}, \dots, t_{qn}$ предлагается использовать критерии процессов совместного действия конструкторско-технологических факторов. Управление надежностью и адаптивностью гибкой системы электрофизической обработки на этапе проектирования оборудования в виде замкнутых технологических комплексов должно осуществляться путем ограничения номенклатуры универсальных производственных модулей и средств их технологического оснащения с последующей унификацией номенклатуры объектов и процессов производства. Рациональные параметры унификации при выборе конструкторско-технологических решений принимаются либо аналитически по критериям переноса, либо статистически по информации о конкретной производственной системе с учетом технико-экономического анализа.

ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЕ УПРОЧНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Сахвадзе Г.Ж.

Учреждение Российской академии наук Институт машиноведения
им. А.А.Благонравова РАН (ИМАШ РАН), Москва, Россия, sakhvadze@mail.ru

Существенный прорыв в разработке новых материалов может дать подход, основанный на импульсных технологиях воздействия, на комбинировании высокотехнологических методов структурного модифицирования материалов с современными методами их объемной или поверхностной обработки. В работе рассматриваются

возможности и примеры применения принципов наноструктурирования сплавов на основе интенсивной пластической деформации при лазерно-ударно-волновой обработке материалов [1-3]. Исследуется титановый сплав Ti-6Al-4V.

Лазерноударно-волновая обработка (ЛУВО), как один из импульсных методов обработки конструкционных материалов и сплавов, может быть применена к материалам для увеличения усталостной прочности, трещиностойкости, трибологических характеристик за счет образования приповерхностного наноструктурированного слоя с толщиной до 1-1,5 мкм., а также для придания повышенной термостойкости образованных при этом сжимающих остаточных напряжений. Суть метода заключается в следующем (Рис. 1). При фокусировке короткого (в диапазоне 3-30 нсек) и интенсивного ($> 10^{13}$ Вт/м²) лазерного импульса на поверхность наноструктурного материала, поверхностные слои мгновенно испаряются (явление абляции) и образуется поверхностная плазма с высокими температурой (приблизительно 10000 К) и давлением (> 5 ГПа) [4, 6]. Плазма при расширении от облучаемой поверхности излучает ударные волны, и механические импульсы распространяется в конструкции. В экспериментах используется неодимовый импульсный лазер (Nd:YAG) с длиной волны 1064 нм с модулируемой добротностью, генерирующий выходную мощность 80-100 Дж. Продолжительность импульса - около 20 нс., форма которого может быть как гауссовской, так и иметь несимметричный профиль с укороченным временем нарастания (УВН).

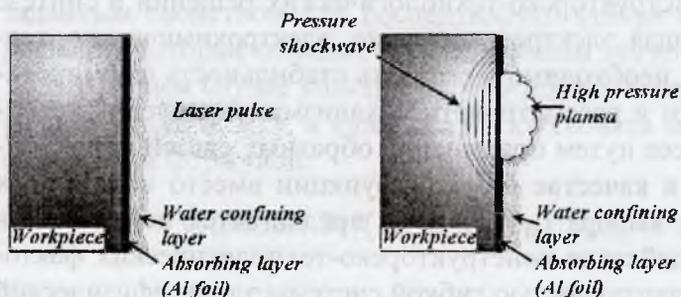


Рис. 1. Принцип ЛУВО.

Лазерная ударная волна рассматривается как волна напряжений сжатия, распространяющаяся в перпендикулярном от поверхности материала направлении в течение очень короткого времени [7].

В экспериментах используются две плотности импульсов: 2500 импульс/см² и 5000 импульс/см². Образец – титановый сплав с размерами 50x50 мм. с толщиной 5 мм, закрепленный на прецизионный x-y столик с прецизионным управлением. Размещающая способность системы - 1 мкм., предельная скорость перемещения - 20 мм/сек. Управляя скоростью системы, получаем желательную плотность импульсов. Обработанная область образца составляет 15x15 мм (рис. 2), где также показано направление сканирования. Максимальные главные сжимающие остаточные напряжения измеряются в центре образца методом сверления отверстий.

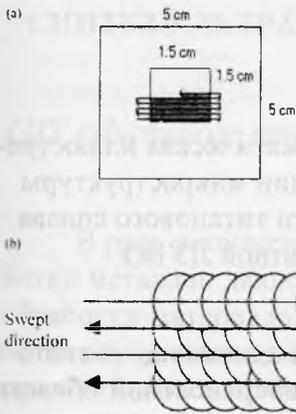


Рис. 2. Схема обработки образца.

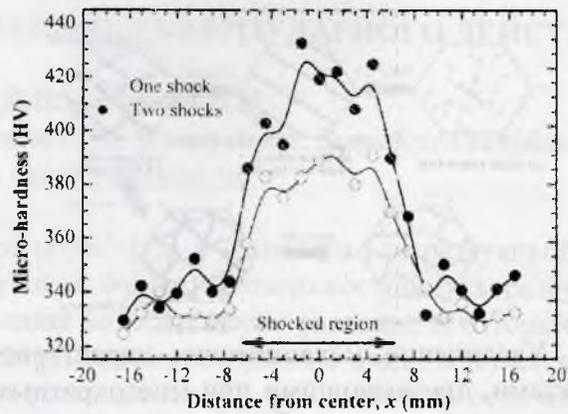


Рис. 3. Распределение микротвердости при однократном и двукратном ЛУВО

На рис. 3 показаны профили микротвердости на поверхности сплава Ti-6Al-4V при однократном и двукратном ЛУВО-воздействиях. При двукратном воздействии микротвердость увеличивается за счет образования высокой плотности дислокаций в приповерхностной области. При первом воздействии увеличение микротвердости (по сравнению с необрабатываемой поверхностью) составляет примерно 15 %, при втором – 24%.

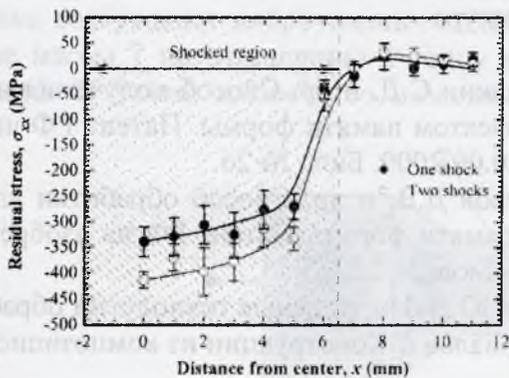


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений при однократном и двукратном ЛУВО

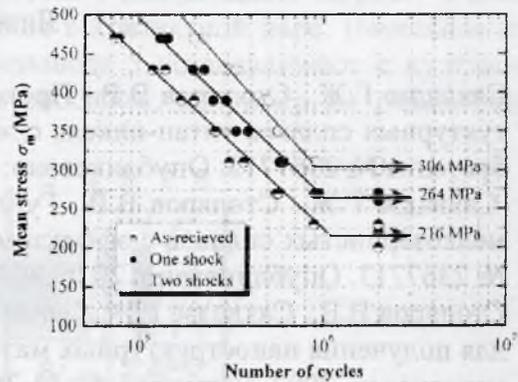


Рис. 5. Кривые усталости необработанного титанового сплава и того же сплава при однократном и двукратном ЛУВО

На рис. 4 показаны распределения остаточных напряжений в области воздействия. При удалении от центра области воздействия сжимающие остаточные напряжения уменьшаются, и даже на окраине переходит в растягивающие, но далее быстро падают к нулю. Как видим, при повторном ЛУВО-воздействии, максимальное значение сжимающих остаточных напряжений возрастают от 340 МПа до 420 МПа.

На рис. 5 показаны кривые усталости необработанного титанового сплава и того же сплава при однократном и двукратном ЛУВО. Видно, что предел выносливости растет от 216 МПа (для необработанного материала) до 264 МПа (при однократном ЛУВО), и до 306 МПа (при двукратном ЛУВО), что составляет рост на 22,2 % и 41,7 %, соответственно.

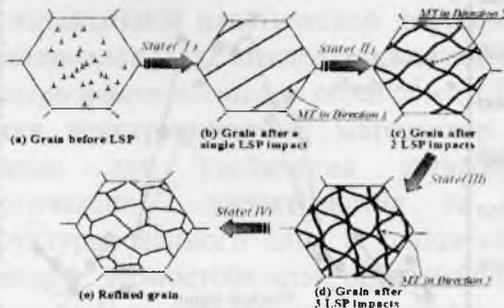


Рис. 6. Схематическая иллюстрация эволюции микроструктуры поверхности титанового сплава при трехкратной ЛУВО

Увеличение механических характеристик, по всей видимости, связано с эффектами, протекающими при многократных ЛУВО в приповерхностной области, сопровождаемыми сверхбыстрыми интенсивными пластическими деформациями. При этом крупнозернистая структура (рис. 6 а) превращается в ультрамелкозернистую (иногда – наноструктуру) структуру (рис. 6 е) через сложные механизмы взаимодействия сеток дислокаций с механическими двойниками (МТ). При этом минимальный размер зерна около поверхности составлял приблизительно 50–200 нм. Экспериментальные результаты и анализы показывают, что высокая степень деформации (до 10^7 с⁻¹) играет решающую роль в процессе преобразования зерна при ЛУВО [8].

Литература

1. Сахвадзе Г.Ж., Столяров В.В., Прокошкин С.Д. и др. Способ получения наноструктурных сплавов титан-никель с эффектом памяти формы. Патент РФ на изобретение № 2367712. Опубликовано: 20.09.2009. Бюл. № 26.
2. Сахвадзе Г.Ж., Столяров В.В., Гундеров Д.В. и др. Способ обработки ультрамелкозернистых сплавов с эффектом памяти формы. Патент РФ на изобретение № 2367713. Опубликовано: 20.09.2009. Бюл. № 26.
3. 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.
4. Peyre, P., Fabbro, R., Berthe, L., and Dubouchet, C., 1996, "Laser Shock Processing of Materials, Physical Processes Involved and Examples of Applications," J. Laser Appl., 8, pp. 135–141.
5. P.J. Golden, A. Hutson, V. Sundaram, J.H. Arps, Int. J. Fatigue 29 (2007), 1302–1310.
6. C. Rubio-González, J.L. Ocaña, G. Gomez-Rosas, C. Molpeceres, M. Paredes, A. Banderas, J. Porro, M. Morales, Mater. Sci. Eng. A386 (2004) 291–295.
7. A. King, A. Steuwer, C. Woodward, P.J. Withers, Mater. Sci. Eng. A 435–436, (2006) 12–18.
8. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials processed by severe plastic deformation. – Progr. Mater. Sci., 2000, v. 45, p. 103.