

УДК 621.373.826

ЛАЗЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

© 2005 г. В. А. Серебряков*, доктор физ.-мат. наук; К. В. Грацианов*; А. С. Еременко*; М. В. Волков**; А. А. Тимофеев*; S. Zou***

* НИИ лазерной физики, Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

*** Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing, China

Представлены результаты экспериментов по упрочнению поверхности металлов лазерными импульсами с интенсивностью 10^9 – 10^{10} Вт/см². В качестве источника излучения использован лазер на неодимовом стекле с энергией до 50 Дж с длительностью импульса ~30 нс. Результаты лазерного упрочнения при различной площади облучаемой поверхности определялись с помощью микроструктурного анализа. Обсужден новый подход к созданию индустриального лазера для наклепа.

Коды OCIS: 140.3300, 160.3900, 350.3850.

Поступила в редакцию 18.10.2004.

Введение

Первые эксперименты по упрочнению металлов с помощью метода лазерного наклепа, вызывающего сжимающие напряжения в поверхностных слоях, делаая материал более стойким к усталости и коррозии, имели место более 30 лет назад. Однако только в настоящее время благодаря развитию высокомоощных моноимпульсных лазеров с высокой частотой повторения этот метод начинает конкурировать с традиционными методами наклепа, использующими бомбардировку материала маленькими металлическими шариками.

Лазерный наклеп использует импульсы с интенсивностью $\sim 10^9$ – 10^{10} Вт/см² [1]. Лазерная энергия, поглощаемая приповерхностным сильно поглощающим слоем, частично испаряет его, вызывая ударную волну в вышележащем слое воды (рис. 1). Пластическая деформация, вызванная ударной волной (давление несколько гигапаскаль), создает сжимаю-

щие остаточные напряжения, которые могут прости- раться более чем на 1 мм по глубине.

На основании сравнительных эксперименталь- ных исследований лазерного упрочнения металлов при различной площади облучения показана перс- пективность применения для наклепа импульсно- периодического Тm-Но-лазера с диодной накачкой.

Экспериментальная установка

Моноимпульсный лазер с энергией 50–100 Дж, как правило, строится на неодимовом стекле. Это связано как с возможностью изготовления активных элементов больших размеров, так и с высокой лу- чевой прочностью неодимового стекла, на порядок величины превышающей лучевую прочность кри- сталлов Nd:YAG.

В экспериментах по упрочнению использовался лазер на неодимовом стекле с энергией 45 Дж в им- пульсе длительностью 30 нс (рис. 2). Задающий гене-

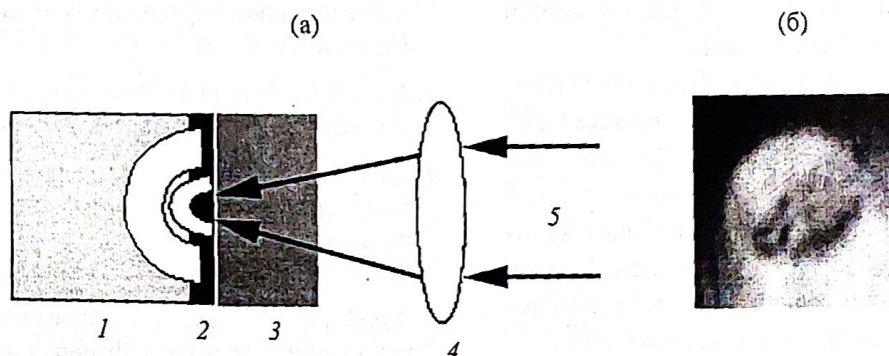


Рис. 1. а – схема экспериментов по лазерному наклепу. б – наклеп титанового сплава ($\varnothing 5$ мм, $E = 45$ Дж). 1 – образец, 2 – краска, 3 – вода, 4 – линза, 5 – лазер.

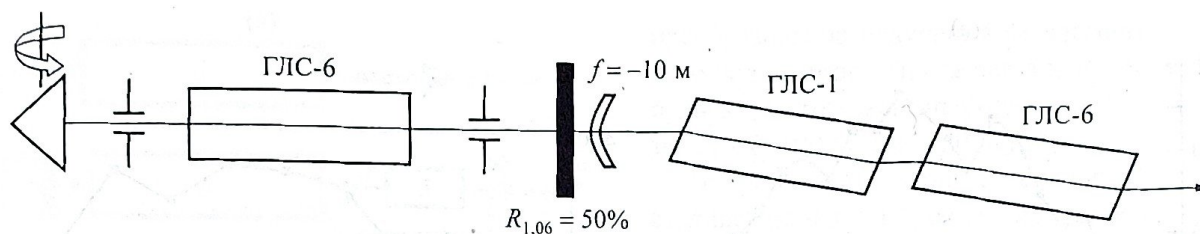


Рис. 2. Оптическая схема излучателя лазера.

ратор на стекле ГЛС-6 (стержень $\varnothing 20 \times 280$ мм) с вращающейся призмой (33 000 об/мин) выдает ~ 10 Дж неполяризованного излучения на частоте 0,1 Гц.

Селекция поперечных мод с целью получения минимальной длительности импульса осуществляется с помощью двух диафрагм с диаметрами 18 мм, установленных с обеих сторон активного элемента. Далее излучение проходит в двухкаскадный усилитель, причем окончательный усилитель выполнен на неодимовом стекле ГЛС-6, имеющем максимальную для неодимовых стекол лучевую прочность (более 20 Дж/см²).

Интенсивность на выходе второго усилителя на максимальной частоте 0,1 Гц превышает 15 Дж/см² и близка к порогу лучевой прочности Nd-стекла, поскольку усиливаемое излучение подфокусируется положительной термолинзой (суммарный $f \approx 7$ м), наводимой в обоих активных элементах усилителя (рис. 3а, позиция С).

Чтобы избежать повреждения лазерных стержней (рис. 3б), приняты меры к увеличению однородности интенсивности излучения на выходе второго усилителя. Во-первых, в осветителях использованы квантроны с диффузным отражением, во-вторых, перед усилителем установлена отрицательная линза ($f = -10$ м), компенсирующая термолинзу, наводимую на максимальной частоте 0,1 Гц (рис. 3а, позиция D).

Снижение усиления при введении линзы и диффузной накачки вынуждает использовать в первом

усилителе менее атермальное и менее стойкое неодимовое стекло ГЛС-1, имеющее, однако, большее сечение поглощения и, следовательно, большее усиление, чем ГЛС-6.

Перепад температуры в активном элементе на частоте 0,1 Гц достигает ~ 15 °С (термопрочность стекла ГЛС-6 63 °С), что ограничивает максимальную частоту лазера 0,2 Гц. Дальнейшее повышение частоты повторения импульсов до единиц герц и соответственно средней мощности лазера возможно лишь при переходе на термопрочные стекла типа APG-2, НАР-4.

Результаты лазерного наклепа

Упрочнение алюминиевых и титановых сплавов проводилось пучками с диаметрами 1,5–6 мм с энергией до 50 Дж и длительностью 30 нс. На рис. 4а представлено распределение твердости полированной поверхности металлографических образцов из Al-Li-сплава 1420, которые были обработаны пучком с $\varnothing 6$ мм и энергией 30 Дж. После наклепа твердость поверхности увеличилась с HV125 до HV155 на глубину до 1 мм при размере упрочненной зоны, равном размеру пятна облучения (рис. 4б).

Поскольку предел прочности на разрыв титановых сплавов много выше алюминиевых, упрочнение титановых сплавов требует более интенсивного облучения. На рис. 4в представлено распределе-

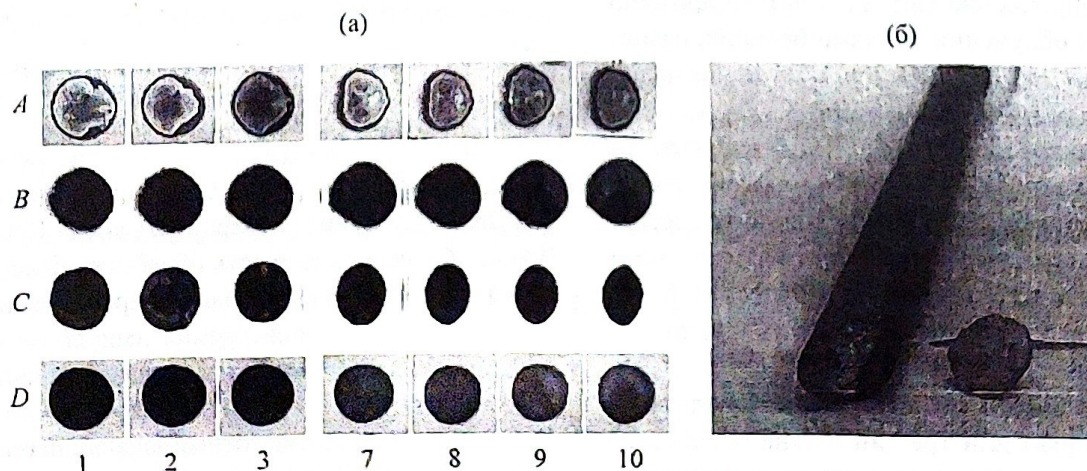


Рис. 3. а – распределение плотности энергии излучения на выходе лазера (0,1 Гц). А – задающий генератор с зеркальным отражателем; В – задающий генератор с диффузным отражателем; С – В с усилителем; D – С с компенсирующей линзой перед усилителем. Числа внизу – номер импульса в серии. б – разрушение Nd-стержня окончательного усилителя (более 15 Дж/см²).

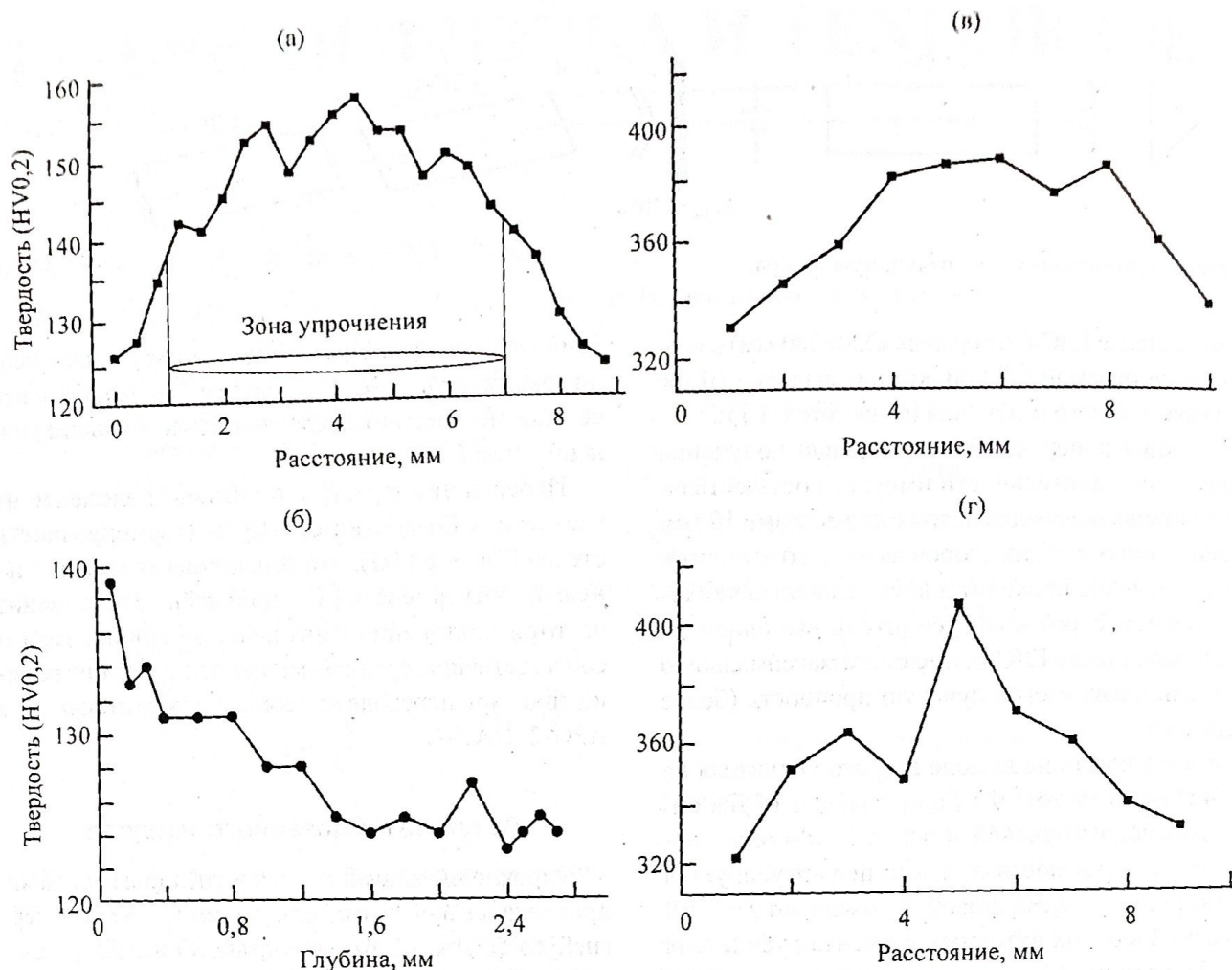


Рис. 4. Упрочнение алюминиевого и титанового сплавов. а – распределение твердости полированной поверхности Al-Li-сплава 1420, обработанного пучком с $\varnothing 6$ мм и энергией 30 Дж. б – распределение по глубине твердости Al-Li-сплава 1420, обработанного пучком с $\varnothing 6$ мм и энергией 30 Дж. в – распределение твердости поверхности Ti-сплава TC6, обработанного пучком с $\varnothing 5$ мм и энергией 45 Дж. г – распределение твердости поверхности Ti-сплава TC6, обработанного восемью перекрывающимися пучками с $\varnothing 1,5$ мм и энергией 3 Дж.

ние твердости образцов из Ti-сплава TC6, которые были обработаны пучком с $\varnothing 5$ мм и энергией до 50 Дж. После наклепа твердость поверхности увеличилась с HV325 до HV385.

Процесс упрочнения металла идет эффективно не только при облучении пучками больших размеров с энергией ~ 45 Дж, но и при облучении малыми пятнами с $\varnothing 1,5$ мм и энергией 3,1 Дж (восемь перекрывающихся пучков) (рис. 4г). Средняя твердость в зоне наклепа выше HV360, максимальная твердость достигала HV400. Несколько менее однородное распределение твердости по сечению зоны облучения по сравнению с облучением большим пучком говорит о необходимости более точного выставления пучков.

После лазерного наклепа не наблюдалось искажений формы или трещин в зоне обработки. Поле остаточных напряжений измерялось рентгеновским анализатором напряжений MSF-2MX в пятне 4×4 мм, что не позволяло измерять распределение величины остаточных напряжений в зоне на-

клепа. Средняя величина остаточных напряжений в титановых сплавах ~ 300 МПа и в алюминиевых ~ 200 МПа.

Индустриальный лазер для упрочнения металлов

В настоящее время для наклепа используют лазеры на неодимовом стекле с большой энергией (до 100 Дж), облучающие поверхность до $50-100 \text{ мм}^2$ [2]. Чтобы обеспечить скорость обработки более $1 \text{ м}^2/\text{ч}$, промышленный лазер с такой энергией должен работать на частотах повторения импульсов в сотни герц при средней мощности в диапазоне от сотен ватт до киловатта. Однако такой лазер достаточно сложен (одномодовый и одночастотный задающий генератор, многопроходовой slab-усилитель с системами анаморфотной ретрансляции и обращения волнового фронта), имеет большие размеры и при ламповой накачке имеет низкую эффективность и низкую на-

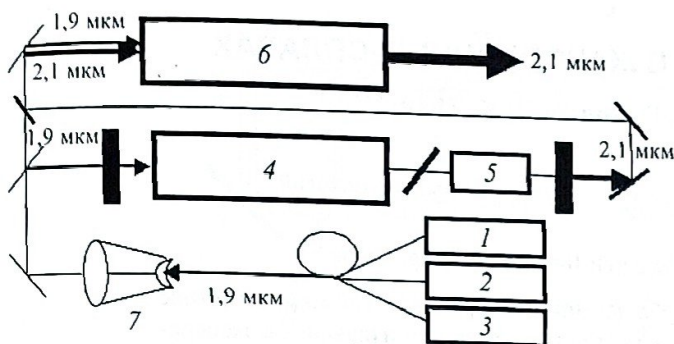


Рис. 5. Оптическая схема мощного Тм-Нo-лазера (2 Дж-300 Гц-15 нс, накачка – Тм-лазеры TLR-150-1940 IPG Photonics[5]). 1-3 – Тм-лазеры, 4 – задающий генератор (Нo:YAG-лазер, Ø6×100 мм), 5 – электрооптический затвор на кристалле КТР, 6 – усилитель (Нo: YAG-лазер, Ø10×100 мм), 7 – расширяющий телескоп.

Как показали наши исследования, процесс упрочнения металла идет эффективно не только при облучении пучками больших размеров с энергией ~45 Дж, но и при облучении малыми пятнами. Это позволяет использовать для наклепа моноимпульсный лазер на кристаллических средах с относительно небольшой энергией и большой частотой повторения импульсов.

преобразование излучения 48-ваттного непрерывного волоконного Тm-лазера в излучение моноимпульсного импульсно-периодического Ho:YAG-лазера (400–1000 Гц, 15–20 нс) [4].

Безопасное для глаз излучение также является существенным преимуществом Тm:Ho-лазера.

Процесс лазерного упрочнения металла идет эффективно не только при облучении пучками больших размеров ($\varnothing 5\text{--}10\text{ мм}$) с энергией $50\text{--}100\text{ Дж}$, но и при облучении малыми пятнами ($\varnothing 1\text{--}1,5\text{ мм}$) с энергией $2\text{--}3\text{ Дж}$. Таким образом, для наклепа можно использовать моноимпульсный лазер на кристаллических средах с относительно небольшой энергией и большой частотой повторения импульсов. Одним из наиболее перспективных для промышленного наклепа может стать мощный двухступенчатый импульсно-периодический Tm-Ho:YAG -лазер с диодной накачкой.

1. *Daly J.* High-energy laser blasts metals // Technology Appl. Report. Manufacturing Technol. 1998. P. 50–51.
2. *Dane C.B., Hackel L.A., Halpin J., Daly J., Harrisson J., Harris F.* High-throughput laser peening of metals using a high-average-power Nd:Glass laser system // UCRL-JC-134266. 1999. Nov.
3. *Shen D.Y., Abdolvand A., Cooper L.J., Clarkson W.A.* Efficient Ho:YAG laser pumped by a cladding-pumped tunable Tm:silica fiber laser // Appl. Phys. B. 2004. V. 79. № 5. P. 559–561.
4. *Dergachev A., Moulton P.F.* High power, high energy diode pumped Tm:YLF–Ho:YLF–ZGP laser system // Q–peak. ASSP03. 2003.
5. *IPG Photonics Corporation.* TLR Series. High Power Single Mode Thulium Fiber Lasers. Prospect. 2004.