

## УДК 621

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА ИМПУЛЬСОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО НАКЛЁПА

Зо Йе Мьят<sup>(1)</sup>, Анна Владимировна Бурак<sup>(2)</sup>, Дмитрий Михайлович Мельников<sup>(3)</sup>

*Аспирант 1 года<sup>(1)</sup>, студент 4 курса<sup>(2)</sup>, доцент<sup>(3)</sup>  
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Д.М. Мельников,  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»*

*Ключевые слова: лазер, наклёп, твёрдость, импульсное излучение, насыщение*

*Аннотация:* В данной работе описано исследования влияния перекрытия импульсов лазерного излучения на эффект лазерного наклёпа алюминиевого сплава АМг-3. Эффект оценивался по показателю твёрдости материала, а так же по размеру поверхностной деформации. В ходе исследования образец из сплава АМг-3 облучался импульсным лазерным излучением с длительностью импульса 7 нс с полным перекрытием импульсов. В работе показано, что повторное облучение образца увеличивает твёрдость поверхности, вплоть до достижения некоторого насыщения. Результаты работы могут быть использованы при разработке технологии лазерного наклёпа при помощи лазерного излучения малой мощности.

#### **Введение**

Технология лазерного наклёпа, впервые описанная в конце 60-х, начале 70-х годов [1], представляет собой холодный процесс при котором интенсивное лазерное излучение падает на поверхность и служит причиной образования ударных волн [2]. При определённой амплитуде ударных волн в материале происходит пластическая деформация, которая приводит к формированию зоны сжимающих остаточных напряжений и измельчению структуры материала. При этом достигается улучшение ряда характеристик материала, таких как твёрдость, усталостная прочность, коррозионная стойкость и др.

Актуальность данной работы связана с особенностями лазерной сварки алюминиевых сплавов по причине которых между сварным швом и зоной термического влияния наблюдается резкий скачок микроструктуры [3], что показано на рисунке 1. Данный скачок – характерная особенность, он наблюдался во всех работах по данной теме [4], и даже применение комбинированных источников не всегда решает эту проблему. Скачок в микроструктуре приводит к скачку в микротвёрдости, что можно отметить на рисунке 2. Как правило он приходится на переходную зону между сварным швом и ЗТВ [5]. Такая ситуация приводит к тому, что разрушение при испытаниях на растяжение происходит как раз по этой зоне (Рисунок 3) [5].

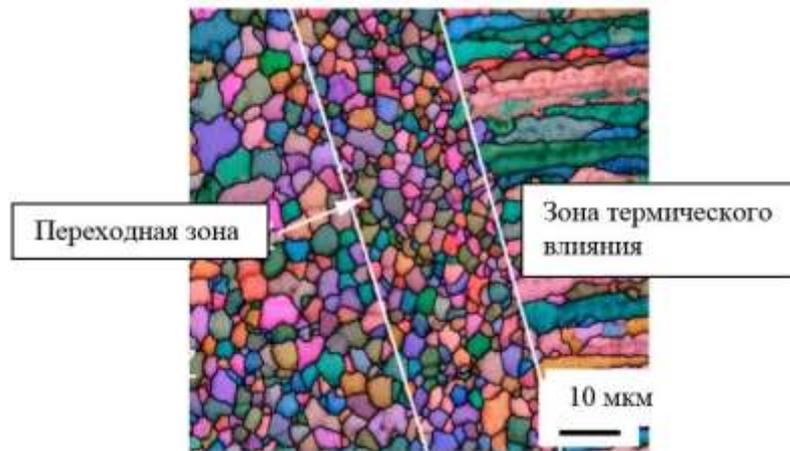


Рисунок 1 – скачок в микроструктуре Al-сплава после лазерной сварки [3]

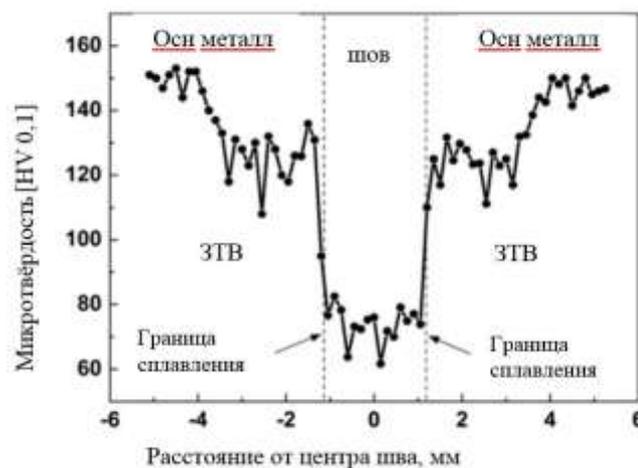


Рисунок 2 – Скачок в микротвёрдости Al-сплава после лазерной сварки [5]

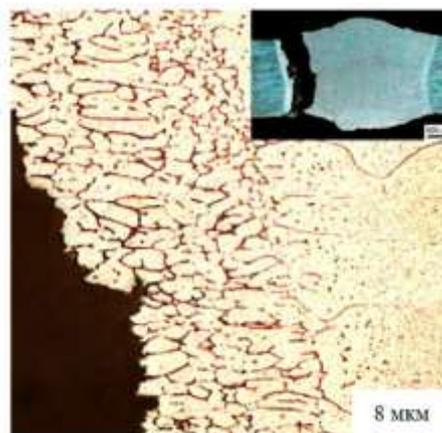


Рисунок 3 – Разрушение Al-сплава после лазерной сварки [5]

Борьба с этой проблемой чаще всего на сегодняшний день решается последующей термообработкой, которая для алюминиевых сплавов сводится к принудительному старению. При этом происходит снятие остаточных напряжений и некоторое измельчение микроструктуры. Несколько выравнивается и микротвёрдость, что повышает прочность соединения в целом. [6].

Другой способ выравнивания микроструктуры – ударная обработка, самый распространённый метод которой – дробеструйная обработка. На рисунке 4 [7] так же показан скачок микротвёрдости, который существенно сглаживался после соответствующей

дробеструйной обработки. Подобная обработка повышает прочность соединения, однако обладает рядом недостатков, к которым относятся: малая глубина эффекта и присутствие остаточных растягивающих напряжений в глубине материала, что серьёзно ограничивает метод. [4].

Так же к распространённым методам ударной обработки относится ультразвуковая ударная обработка. Она показывает большую амплитуду остаточных сжимающих напряжений, однако они распространяются на меньшую глубину, а так же больше подвержены последующей релаксации [8].

Применение метода лазерного наклёпа позволяет достичь большей амплитуды и глубины остаточных сжимающих напряжений, при меньшей склонности к релаксации напряжений, что имеет важную роль для авиационных задач. Проблемой здесь остаётся появление остаточных растягивающих напряжений, «в хвосте» зоны обработки. Однако эта проблема может быть решена технологически – обработкой с двух сторон [9], что при глубине зоны остаточных напряжений более 1 мм вполне оправдано.

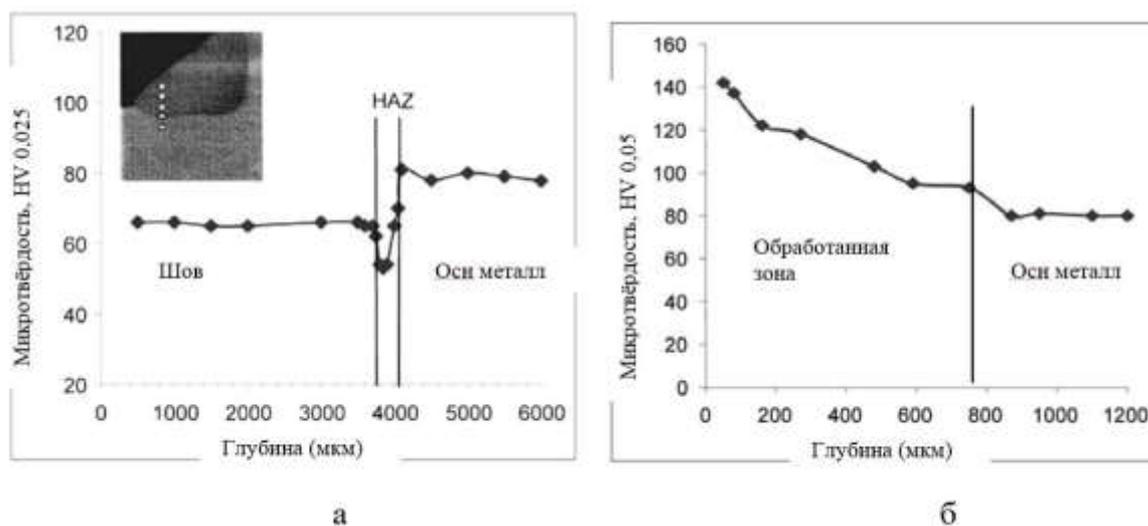


Рисунок 4 – Скачок микротвёрдости после сварки (а) и его выравнивание после дробеструйной обработки (б) [4].

Серьёзным недостатком технологии лазерного наклёпа является требование к источникам лазерного излучения. Лазерный наклёп – дорогой метод. Для эффективной обработки больших областей требуется широкое пятно, а для достижения механизмов лазерной абляции – служащих инициаторами образования плазменного факела и дальнейшей генерации ударных волн, требуется высокая интенсивность излучения [4]. Оба этих фактора приводят к тому, что на сегодняшний день для лазерного наклёпа применяются мощные импульсные установки с энергией импульса более 50 Дж [4].

Однако, как показывают исследования [9,10], при повторном облучении получаемый эффект увеличивается вплоть до некоторого насыщения. Многократное облучение и перекрытие точек для покрытия большой площади оказывают существенное влияние на профиль напряжений. Чем больше количество импульсов, тем выше пластическая деформация, вплоть до достижения точки насыщения [11]. Более того в зонах перекрытия обнаруживается более однородный профиль напряжений [12]. Причиной большей глубины напряжений может быть пластическая деформация, которая создаёт больше движений дислокаций.

Из этого можно сделать вывод о том, что возможно применение менее мощных (чем 50 Дж) установок за счёт обработки в несколько проходов. Основным условием процесса останется генерация ударной волны с энергией, способной задать для материала нагрузку превышающую предел текучести. Применение такого технологического приёма позволит

снизить стоимость лазерной установки и повысить конкурентоспособность метода лазерного наклёпа.

Целью данной работы является изучение влияния перекрытия импульсов лазерного излучения на показатели процесса лазерного наклёпа.

#### Методика эксперимента

Схема метода лазерного наклёпа показана на рисунке 5 [4]. В ходе исследований использовалась твердотельная лазерная установка с длительностью импульса около 7 нс и энергией 0,1 Дж.

Основные этапы образования ударных волн можно описать в следующей последовательности:

а) Мишень покрывается поглощающим покрытием. Этот слой испаряется образуя плазменный факел оказывающий давление в течение длительности импульса. Поглощающий слой предотвращает плавление и абляцию мишени, за счёт чего достигается высокое качество поверхности. Без этого слоя преобразование энергии от плазменного факела к ударной волне производится неэффективно. В качестве поглощающего слоя в данной работе использовалась чёрная краска.

б) Прозрачный слой применяется для того, чтобы плазма не распространялась от поверхности, благодаря чему увеличивается интенсивность ударных волн. Выбор ограничивающей среды зависит исключительно от материала подложки, плотности и скорости звука, которые могут создать так называемый «эффект акустического импеданса». В качестве поглощающего слоя в данной работе использовалась вода.

Пластическая деформация возникает, когда нагрузка от ударных волн превышает динамический предел пластичности металла [10]. Пластическая деформация приводит к значительному увеличению и движению дислокаций, что оказывает влияние на микроструктуру и свойства материала.

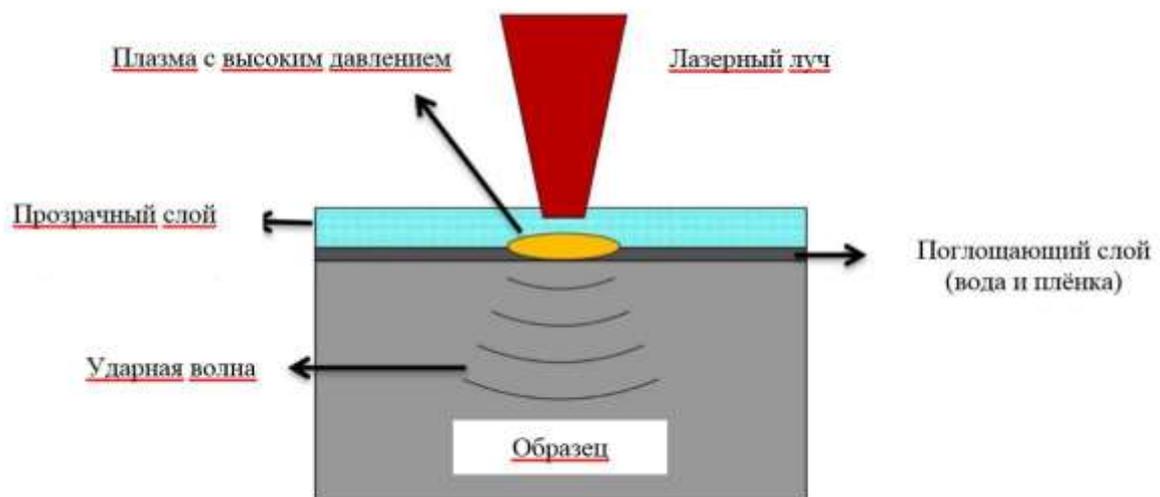


Рисунок 5 – Схема процесса лазерного наклёпа [4]

Эффект от воздействия ударных волн оценивался на основе измерений твёрдость облучённых зон. Облучались как отдельные точки в фокусе лазерного излучения, так и зоны, где сфокусированное излучение сканировалось по поверхности абляционного слоя. Условием прекращения облучения служило полное удаление абляционного слоя с поверхности в области взаимодействия.

### Результаты

На рисунке 6 показана зависимость микротвёрдости сплава АМг-3 от количества импульсов при облучении одной точки. На данной зависимости отчётливо видно, что параметр микротвёрдости увеличивается после нескольких импульсов, при итоговом увеличении микротвёрдости на уровень около 100 %. После нескольких импульсов интенсивность увеличения микротвёрдости снижается, что может быть связано с достижением насыщения.

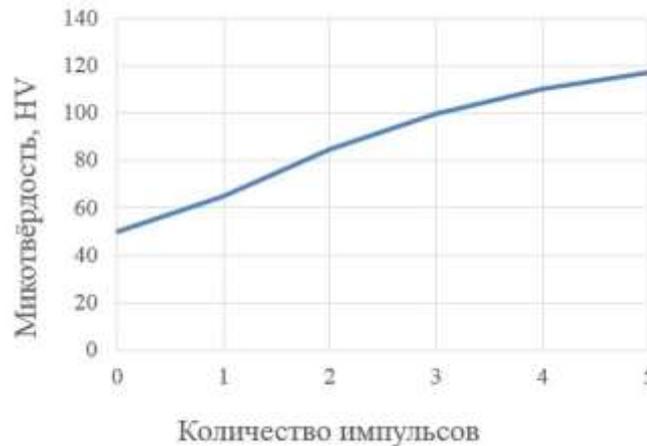


Рисунок 6 – Зависимость микротвёрдости сплава АМг-3 от количества импульсов при облучении одной точки

### Выводы

В данной работе исследовалось влияние перекрытия импульсов лазерного излучения на эффективность процесса лазерного наклёпа.

Показано:

- при повторном облучении микротвёрдость обработанной поверхности продолжает расти,
- рост микротвёрдости продолжается до достижения некоторого насыщения.

Учитывая полученный эффект для применения технологического процесса лазерного наклёпа может использоваться лазерный источник с относительно низкой энергией (около 0,1 Дж), что может существенно расширить применения метода.

### Литература

1. Clauer, A.H.; Fairand, B.P.; Wilcox, B.A. Laser shock hardening of weld zones in aluminum alloys // Metall. Trans. 1977. №8 p. 1871–1876.
2. Генерации ударных волн и образование кратеров в твёрдом веществе при кратковременном воздействии лазерного импульса / Гуськов С.Ю. [и др.] // Квантовая электроника, 2004 №11 с. 989-1003
3. Zhang L., Li X., Nie Z. Microstructure and mechanical properties of a new Al–Zn–Mg–Cu alloy joints welded by laser beam // Materials and Design 2015, № 83 p. 453–458
4. Gujba A. Medraj M. Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening // Materials 2014, № 7, p. 7925-7974
5. Zhang X., Yang W., Xiao R. Microstructure and mechanical properties of laser beam welded Al–Li alloy 2060 with Al–Mg filler wire // Materials and Design 2015, № 88 p. 446–450
6. Dong Peng, Jun Shen, Qin Tang Effects of aging treatment and heat input on the microstructures and mechanical properties of TIG-welded 6061-T6 alloy joints // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 2013 V. 20, № 3, p. 259-265
7. Dane, C.; Hackel, L.; Daly, J. Shot peening with laser. Adv. Mater. Process. 1998, 153, 37–48.

8. *Mordyuk, B.N. Milman, Y.V. Iefimov, M.O.*. Characterization of ultrasonically peened and laser shock peened surface layers of AISI 321 stainless steel // *Surf. Coat. Technol.* 2008. № 202. p.4875–4883.

9. *Wang, F.; Yao, Z.; Deng, Q.* Experimental study on laser shock processing of brass. // *Metall. Mater.* 2007. №14. p. 529–532

10. *Zhang, X.C.; Zhang, Y.K.; Lu, J.Z.; Xuan, F.Z.; Wang, Z.D.; Tu, S.T.* Improvement of fatigue life of Ti-6Al-4V alloy by laser shock peening. *Mater. Sci. Eng. A* 2010, 527, 3411–3415.

11. *Ocatia, L.; Morales, M.; Molpeceres, C.; Porro, J.A.; Abascal, J.G.; Zupaneic, M.* Laser shock processing as a method for surface properties modification of metallic materials // 9th International Conference on Shot Peening, Paris, France. 2005. p. 466–471.

12. *Luo, K.; Lu, J.; Zhang, L.; Zhong, J.; Guan, H.; Qian, X.* The microstructural mechanism for mechanical property of LY2 aluminum alloy after laser shock processing // *Mater.* 2010. №31. p. 2599–2603.