

УДК 621.787.6

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО УДАРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16

Д. Д. КОРОЛЕВ¹, Г. Д. КОЖЕВНИКОВ², Д. А. ТОКАЧЕВ³, М. А. ЛЯХОВЕЦКИЙ⁴

¹ korolev.mai@yandex.ru, ² kozhevnikov.mai@yandex.ru, ³ d.tokachev@yandex.ru, ⁴ lyakhovetskijma@mai.ru

¹⁻⁴ ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Поступила в редакцию 13.06.2023

Аннотация. В работе исследовалось влияние режимов лазерного ударного упрочнения на физико-механические свойства поверхностного слоя алюминиевого сплава Д16. Эксперименты проводились как с разными значениями интенсивности лазерного излучения, так и с фиксированными значениями. Получены зависимости максимальных деформаций и микротвердости в центре пятна от интенсивности излучения. Исследовано влияние увеличения энергии лазерного излучения на процесс расширения плазмы. Найдены «критические точки», после которых изменяется характер зависимостей микротвердости и максимальных деформаций от интенсивности лазерного излучения. Также сделан вывод о том, что применение модели Фаббро для моделирования процесса лазерного ударного упрочнения с имеющимися допущениями является недостоверным.

Ключевые слова: лазерное ударное упрочнение; поверхностное пластическое деформирование; алюминий; надежность.

ВВЕДЕНИЕ

Износ, коррозия и усталость являются причиной более чем 35% отказов элементов двигателей и энергетических установок [1,2]. Поскольку большинство отказов, вызванных данными причинами, начинаются вследствие повреждения поверхностного слоя элементов конструкции, решающее влияние оказывают технология их производства и, в частности, финишные технологии, которые определяют состояние поверхностного слоя материала: твердость, микроструктуру, морфологию, шероховатость, остаточные напряжения, фазовый состав и др.

Для повышения усталостной прочности деталей авиационной техники и энергетического оборудования широкое применение нашли методы поверхностного пластического деформирования (ППД).

Лазерное ударное упрочнение – это относительно новый метод обработки поверхности пластическим деформированием, который позволяет значительно повышать усталостную долговечность металлических изделий [3]. Более того, лазерное ударное упрочнение во многом превосходит хорошо известные методы ППД, такие как дробеструйная обработка, ультразвуковая обработка шариками, галтовка и т.д. При обработке лазерным ударом возникают остаточные сжимающие напряжения величиной до -1000 МПа, распространяющиеся на глубину

~1–2 мм, что значительно превышает характеристики, получаемые при использовании дробе-ударных методов [4,5].

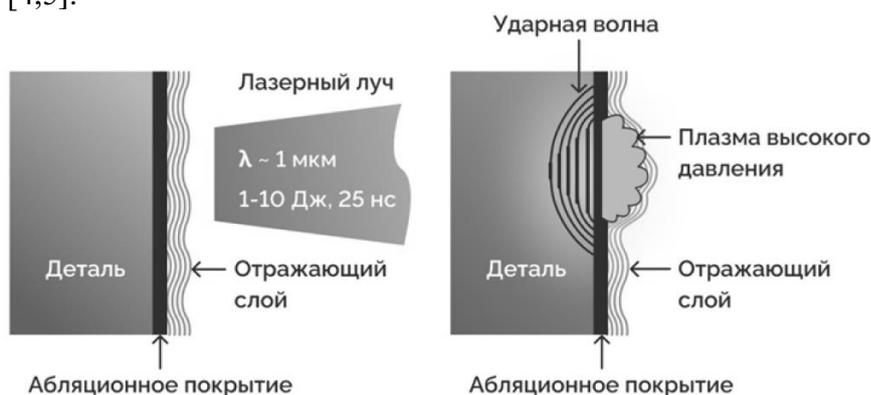


Рис. 1. Схема процесса лазерного ударного упрочнения

Схема процесса лазерного ударного упрочнения схематически представлена на рис. 1. Лазерный импульс длительностью ~10–70 нс с энергией ~1–10 Дж воздействует на поверхность обрабатываемой детали, при этом на нее может предварительно наноситься абляционное (защитное) покрытие. Под действием лазерного излучения с высокой интенсивностью ~1–10 ГВт/см² абляционное покрытие испаряется и образуется плазма с давлением в несколько ГПа. Высокая скорость нагрева вещества приводит к ее быстрому расширению и образованию ударной волны, которая направляется с помощью отражающего (чаще водяного) слоя в сторону упрочняемой детали. Ударная волна генерирует упругопластические волны в металле, которые распространяются по материалу на значительную глубину и деформируют поверхностный слой.

Значение характеристик поверхностного слоя после лазерного ударного упрочнения зависит от параметров излучения (энергия, длительность импульса, диаметр пучка), а также от параметров абляционного и отражающего покрытий. Параметр лазерного излучения определяется общей величиной – интенсивность излучения (ГВт/см²), которая выражается формулой (1) и влияет на величину давления, создаваемого плазмой (2) [6]:

$$I = \frac{E}{S * \tau} \quad (1)$$

$$P \sim \sqrt{I} \quad (2)$$

где I , ГВт/см² – интенсивность излучения; E , Дж – энергия импульса; S , см² – площадь воздействия излучения на поверхность; τ , нс – длительность импульса; P , Па – давление плазмы.

Используемые теоретические уравнения (1) и (2) показывают, что при варьировании параметров лазерного излучения (энергия, диаметр лазерного пучка, время импульса) при фиксированном значении интенсивности можно получать одни и те же значения давления плазмы, а следовательно, и одинаковые характеристики поверхностного слоя.

Таким образом, целью работы стало исследование влияния параметров процесса лазерного ударного упрочнения на характеристики поверхностного слоя при единичном импульсе. В работе исследовалось влияние типа абляционного покрытия, изменение значений энергии и диаметра пятна лазерного излучения на геометрические параметры и степень наклепа поверхностного слоя алюминиевого сплава Д16.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование проводилось на образцах из алюминиевого сплава Д16 размерами 20×80×4 мм. Предварительно поверхность образца шлифовалась и полировалась до шероховатости $Ra = 0,3 \text{ мкм}$, после чего образцы отжигались при температуре $T = 300 \text{ °C}$ в течение 60 минут.

Обработка образцов проводилась на лазере Nd: стекло с длиной волны излучения 1064 нм; временем импульса 55–60 нс, энергией лазерного импульса до 10 Дж, распределение лазерного излучения по пятну – Гаусс.

Для исследования влияния вида абляционного покрытия на характеристики поверхностного слоя использовалась ПВХ лента толщиной 120 мкм и алюминиевая лента толщиной 65 мкм. Для исследования влияния величины энергии лазерного импульса и диаметра пятна лазерного излучения проводилась обработка при 2 Дж, 5 Дж, 8 Дж и 1 мм, 1,4 мм, 1,8 мм соответственно (таблица 1). Помимо этого, часть экспериментов была реализована с фиксированными значениями интенсивности излучения – 1,5; 3; 6 ГВт/см² (таблица 2).

Таблица 1

Режимы обработки. Варьирование интенсивности лазерного излучения

№ режима	Интенсивность излучения, ГВт/см ²	Энергия, Дж	Диаметр лазерного излучения, мм
1	4,25	2	1
2	10,62	5	1
3	16,99	8	1
4	2,17	2	1,4
5	5,42	5	1,4
6	8,67	8	1,4
7	1,31	2	1,8
8	3,28	5	1,8
9	5,24	8	1,8

Таблица 2

Режимы обработки. Фиксированные значения интенсивности лазерного излучения

№ режима	Интенсивность излучения, ГВт/см ²	Энергия, Дж	Диаметр лазерного излучения, мм
1	1,5	1,4	1,4
2	1,5	2,31	1,8
3	1,5	3,53	2,2
4	1,5	4,85	2,6
5	3	4,67	1,8
6	3	9,73	2,6
7	6	2,86	1
8	6	5,4	1,4
9	6	9	1,8

Измерение диаметра лазерного излучения, приходящего на поверхность, проводилось по стандартной методике для лазерной техники с помощью измерения отпечатков на фотобумаге.

Микротвердость материала измерялась с помощью микротвердомера ПМТ-3М при нагрузке 1 Н. Профиль деформации поверхности измерялся на лазерном конфокальном микроскопе Olympus LEXT OLS5000.

ДЕФОРМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

При обработке лазерным ударным упрочнением с использованием абляционного покрытия шероховатость поверхности не изменяется, но из-за импульсно-периодического воздействия лазерного излучения возникает характерный микрорельеф поверхности [7]. Такой микрорельеф может оказывать негативное влияние, например при трении за счет возникновения площадок с повышенным давлением в зоне контакта трущихся тел, или возбуждать неравномерности течения газа или жидкости при обтекании. В связи с этим определение связи между технологическими параметрами и геометрическими характеристиками поверхностного слоя носит важный характер.

Использование гауссовского распределения энергии по сечению пятна приводит к различиям в поведении материала на периферии зоны воздействия лазера по сравнению с П-образным профилем распределения энергии [8]. Это связано с тем, что в центре пятна аккумулируется максимальная энергия, а на периферии располагаются «хвосты», значение энергии которых может быть недостаточно для превышения предела упругости Гюгонио (HEL) обрабатываемого материала, а следовательно, и его деформирования (рис. 2).

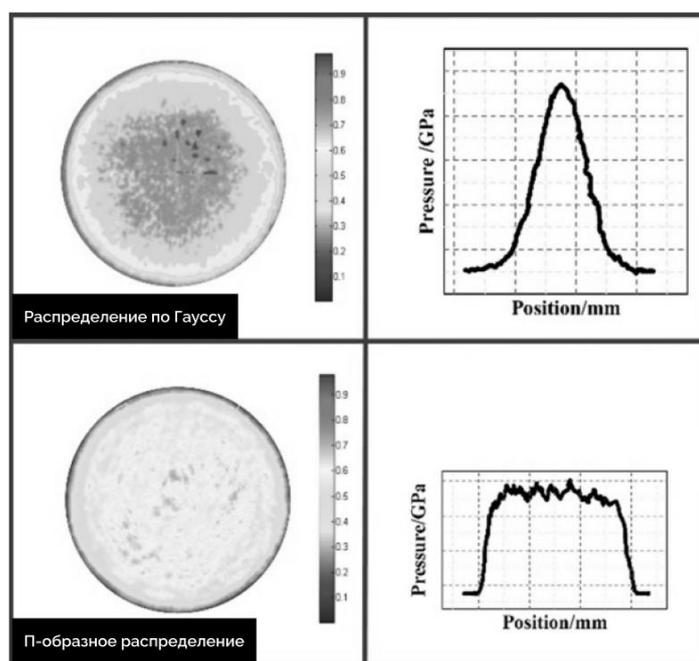


Рис. 2. Распределение энергии по диаметру лазерного излучения [9]

С другой стороны, источником упругопластической волны в материале является ударная волна, возникающая над поверхностью этого материала в результате расширения плазмы. В расчетных моделях, описывающих эти явления, например в аналитической модели Фаббро [6], принимается, что плазма расширяется только по нормали к поверхности, что не отражает реальной картины, т.к. она расширяется во все стороны, в том числе и в тангенциальном направлении к поверхности. Из-за этого возникают потери давления [10], а также возможен эффект расширения зоны воздействия ударной волны (вдоль поверхности) за границей зоны облучения, что может привести при повышении энергии к значительному увеличению зоны деформирования. Для исследования этих явлений был проведен эксперимент по измерению геометрии одиночных пятен, обработанных согласно таблице 2.

На рис. 3 приведены изображения деформированных зон материала, полученные при следующих диаметрах лазерного излучения, приходящего на поверхность: 1 мм, 1,4 мм, 1,8 мм. Значение энергии лазерного излучения устанавливалось таким образом, чтобы интенсивность излучения сохранялась на уровне 6 ГВт/см².

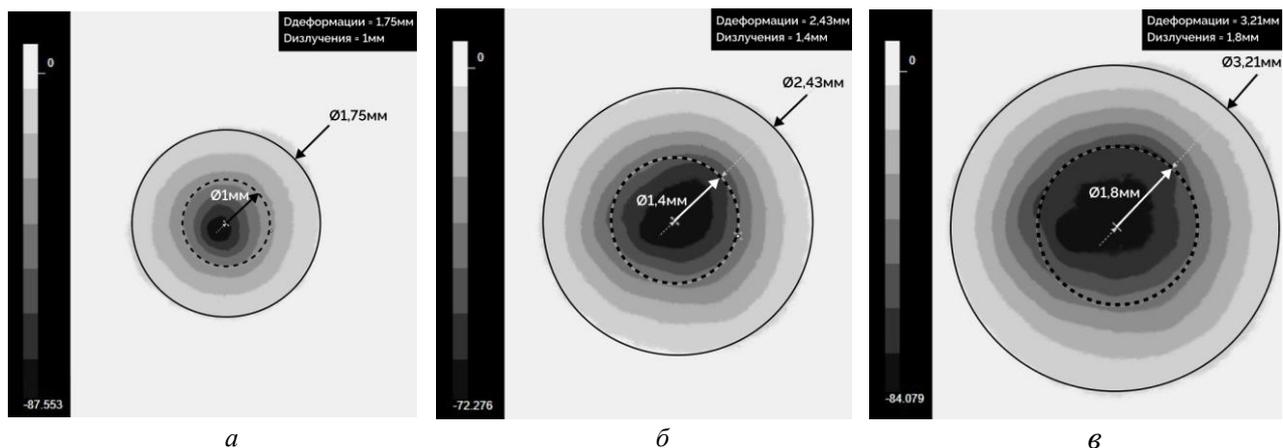


Рис. 3. Диаметры отпечатков на поверхности металла – 6 ГВт/см².
а – диаметр излучения 1 мм; б – 1,4 мм; в – 1,8 мм

Оценка и сравнение деформаций поверхности проводилось по максимальной глубине и фактическому диаметру пятна. Как видно из рис. 3, фактический диаметр деформированной зоны превышает диаметр исходного лазерного излучения, приходящего на поверхность, что может говорить о значительном влиянии эффекта расширения плазмы на процесс лазерного ударного упрочнения и достаточности величины формируемой ударной волны на периферии зоны воздействия плазмы для деформации алюминиевого сплава Д16.

Для определения зависимости фактического диаметра деформированного материала от энергии излучения, приходящего на поверхность, были проведены исследования во всем поле режимов обработки (таблица 1) с использованием двух типов защитных покрытий – ПВХ и алюминиевой ленты. Сводные результаты сравнения фактического диаметра деформированной поверхности с диаметром лазерного излучения представлены на рис. 4.

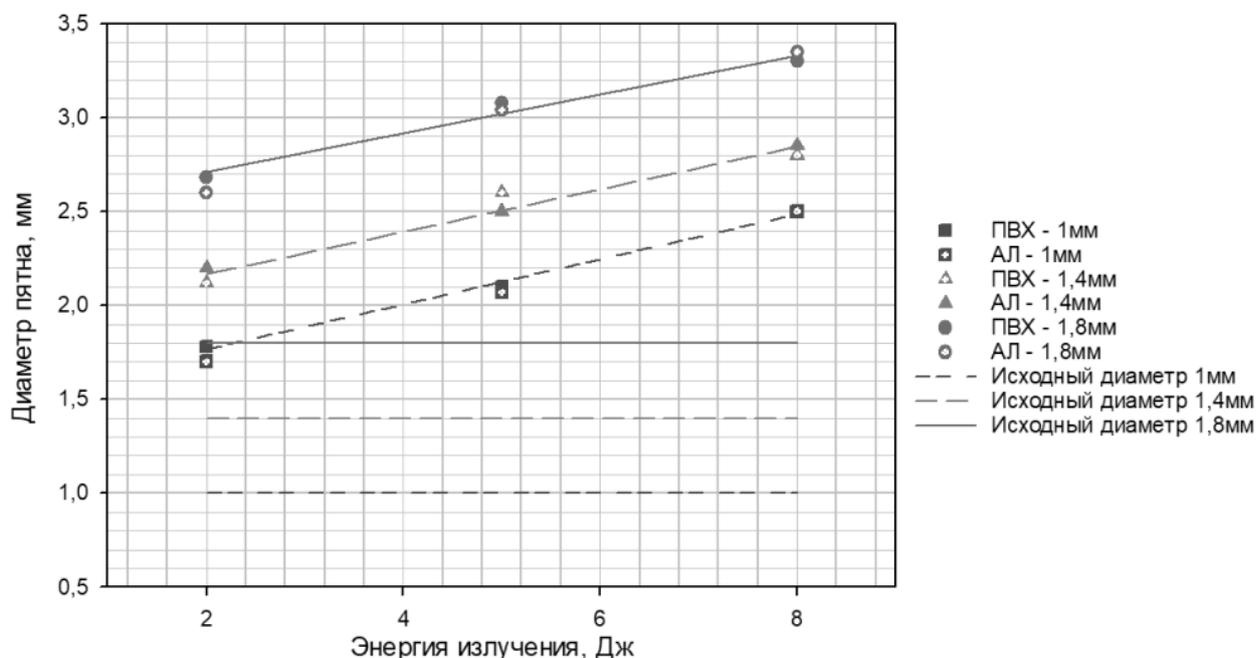


Рис. 4. Зависимость диаметра деформационного пятна в зависимости от энергии лазерного излучения

Из графика хорошо видно, что увеличение энергии лазерного излучения при фиксированном диаметре пучка излучения ведет к увеличению диаметра деформированной области,

причем для различных уровней диаметров пучков (1, 1,4, 1,8 мм) этот эффект сохраняется. В целом для уровня энергии в 2 Дж превышение диаметра деформированного участка над исходным диаметром излучения составляет ~75 %, для уровня энергии 5 Дж – ~110 %, 8 Дж – ~150 %. Также необходимо отметить, что использование ПВХ или алюминиевой ленты не оказывает влияния на диаметр деформированного участка во всем диапазоне используемых режимов.

Таким образом, зона расширения плазмы вдоль поверхности, давление которой превышает NEL, превышает исходный диаметр лазерного излучения и возрастает в зависимости от проходящей энергии. Полученные данные показывают, что большее влияние при обработке поверхности лазерным ударом оказывает расширение плазмы в тангенциальном направлении к поверхности и с увеличением энергии зона такого влияния возрастает значительно до 2,5 раз.

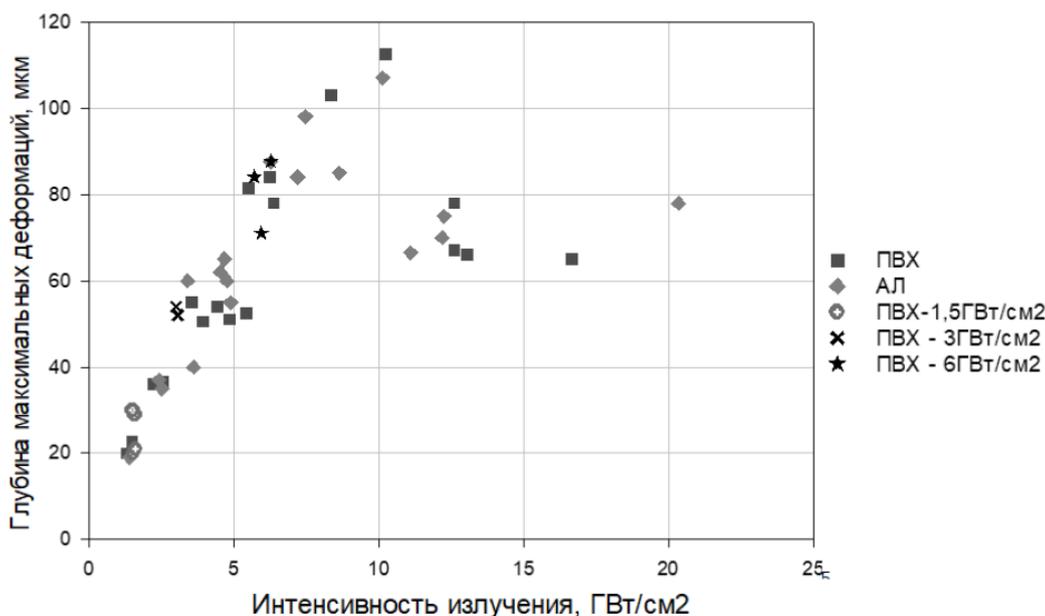


Рис. 5. Зависимость максимальных деформаций от интенсивности лазерного излучения

Отдельно проводилась оценка геометрии поверхностного слоя по максимальной глубине деформации. Полученные значения приведены на графике (рис. 5). Как видно, глубина максимальной деформации растет линейно до 100–110 мкм при увеличении интенсивности излучения, но по достижении значения в 10 ГВт/см² происходит резкое снижение глубины деформации до уровня ~70 мкм, что связано с «пробоем» воздушной среды [10]. При достижении уровня интенсивности в 10 ГВт/см² проявляются процессы плазмообразования в воздухе, что препятствует доведению лазерного излучения до поверхности детали и снижает эффективность процесса, в связи с чем происходит снижение энергии ударной волны, а следовательно, и величины деформации поверхности металла.

НАКЛЕП ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Определение влияния технологических режимов лазерного ударного упрочнения на степень наклепа и взаимосвязи с деформацией проводилось по поверхности деформированной зоны. Ввиду того, что максимальные деформации материала наблюдаются в центре пятна, были проведены измерения значений микротвердости в этой же зоне, результаты приведены на рис. 6.

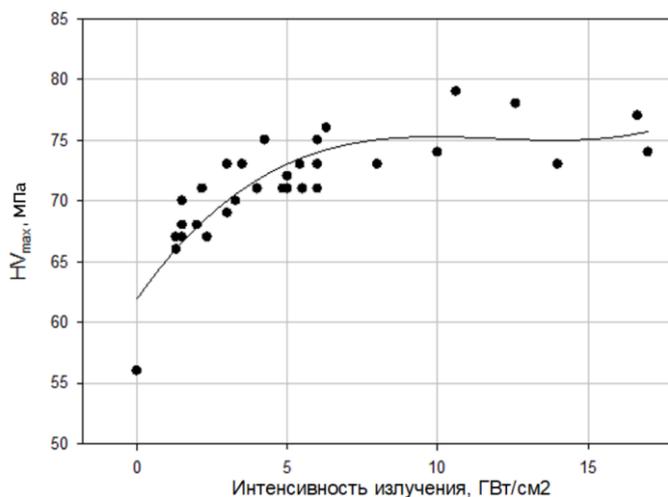


Рис. 6. Зависимость микротвердости в центре зоны деформации от интенсивности лазерного излучения

Из рисунка видно, что характер изменения максимальной микротвердости (HV_{\max}) при увеличении интенсивности излучения практически аналогичен характеру изменения максимальной глубины деформации (рис. 5): происходит линейный рост значений микротвердости, но после достижения интенсивности излучения ~ 7 ГВт/см² дальнейший рост значения микротвердости прекращается, что может быть связано с достижением максимального значения по наклепу материала. При этом величина микротвердости необработанного алюминиевого сплава составила ~ 56 – 60 МПа. Таким образом максимальное полученное значение устанавливается на $HV \sim 75$ МПа, а степень наклепа алюминиевого сплава Д16 не превышает 35%.

Характер изменения значений микротвердости вдоль деформированной зоны приведен на рис. 7. График построен при одной интенсивности излучения в 6 ГВт/см² и различных диаметрах исходного лазерного излучения – 1, 1,4, 1,8 мм.

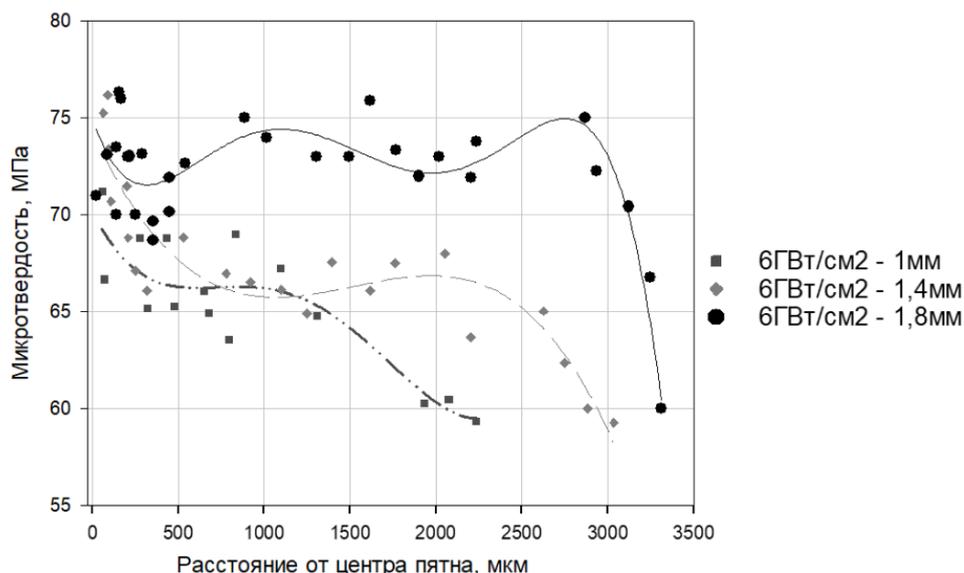


Рис. 7. Распределение микротвердости по пятну

Из приведенного графика хорошо видно, что зона распространения повышенных значений микротвердости (до достижения значений $HV = 56$ – 60 МПа) превышает деформированную зону в ~ 2 раза. Результаты сравнения диаметра лазерного излучения (l_d), диаметра деформированной зоны ($l_{\text{деформ}}$) и диаметра зоны повышенной микротвердости (l_{HV}) приведены на рис. 8.

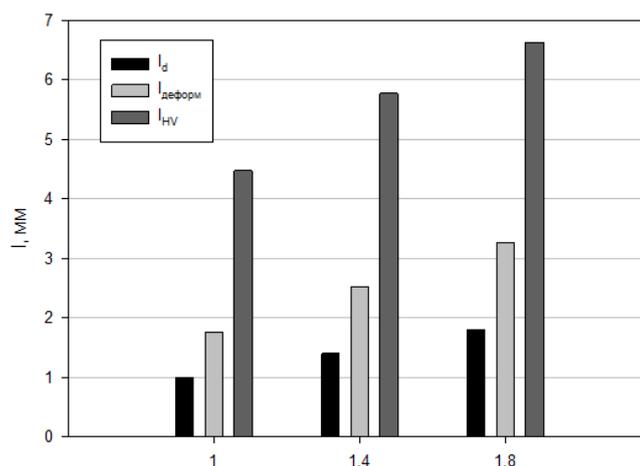


Рис. 8. Сравнение диаметра лазерного излучения (I_d), диаметра деформированной зоны ($I_{\text{деформ}}$) и диаметра зоны повышенной микротвердости (I_{HV})

Таким образом, необходимо отметить, что механические свойства поверхностного слоя могут изменяться не только в области деформированной зоны (геометрического влияния лазерного удара), но могут и превышать эту границу.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований было показано, что увеличение интенсивности лазерного излучения приводит к росту максимальных деформаций на поверхности образца. Причем критической точкой является интенсивность 10 ГВт/см², после которой происходит резкое снижение деформаций. Похожим образом ведет себя микротвердость, по достижении 7 ГВт/см² рост значений прекращается и устанавливается на уровне 75 МПа.

Помимо этого, в работе показано, что величина диаметра приходящего излучения на поверхность образца и зона изменения геометрических и механических свойств поверхностного слоя могут существенно различаться в зависимости от энергии излучения. Так, для диаметра лазерного излучения в 1 мм диаметр деформаций составил 1,75 мм, а зона измененной микротвердости – 4,4 мм. Аналогично такое же явление наблюдается и при других диаметрах лазерного излучения.

Это вызвано особенностями процесса распространения ударной волны при расширении плазмы: повышенная энергия излучения приводит к увеличению диаметра деформации пятна за счет увеличения зоны распространения плазмы. Как результат, уровень энергии ударной волны за границей исходного лазерного излучения достаточен для превышения предела упругости Гюгонио (HEL).

Таким образом, использование модели Фаббро при моделировании процесса лазерного ударного упрочнения с существующими допущениями является недостоверным. Для получения правильных значений по характеристикам поверхностного слоя необходимо модернизировать модель Фаббро с учетом радиального распространения плазмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дмитриев С. А., Симонова Е. С.** Анализ отказов и повреждений авиационных двигателей за период 2007–2020 гг. // Надежность и качество сложных систем. – 2023. – № 1 (41). – С. 81–90. [Dmitriev S. A., Simonova E. S. Failures and damages of aero engines from 2007 to 2020, (in Russian). // Reliability and Quality of Complex Systems. – 2023. – No. 1 (41). – P. 81–90.]
2. **Белюсов М. Г., Цуркаль А. А.** Исследование факторов, влияющих на повреждаемость и разрушение лопаток компрессоров авиационных двигателей // Труды МАИ: электронный журнал. – 2013. – № 65. – С. 14. [Belousov M. G., Tsurkal A. A. Study of the factors influencing the damage and fracture of aircraft engine compressor blades, (in Russian). // Trudy MAI. – 2013. – No. 65. – P. 14.]
3. **Clauer A. H.** Laser shock peening, the path to production // Metals. – 2019. – Vol. 9. – No. 6. – P. 626.
4. **Luo X., Dang N., Wang X.** The effect of laser shock peening shot peening, and their combination on the microstructure and fatigue properties of Ti-6Al-4V titanium alloy // International Journal of Fatigue. – 2021. – Vol. 153. – P. 106465.

5. **Maleki E. et al.** The effects of shot peening, laser shock peening and ultrasonic nanocrystal surface modification on the fatigue strength of Inconel 718 // *Materials Science and Engineering A*. – 2021. – Vol. 810. – P. 141029.
6. **Fabbro R. et al.** Physical study of laser-produced plasma in confined geometry // *Journal of Applied Physics*. – 1990. – Vol. 68. – No. 2. – P. 775-784.
7. **Ляховецкий М. А. и др.** Лазерное ударное упрочнение титанового сплава ВТ6 с алюминиевым абляционным покрытием // *Быстрозакаленные материалы и покрытия. Материалы XVIII-й Международной научно-технической конференции. 19-20 октября 2021 г.* – С. 258. [Lyakhovetsky M. A. et al. Laser shock peening of the VT6 titanium alloy with an aluminum ablative coating, (in Russian). // *Rapid-Quenched Materials and Coatings. Proc. of the XVIII International Scientific and Technical Conference. 19-20 October 2021.* – P. 258.]
8. **Sun B., Qiao H., Zhao J.** Accurate numerical modeling of residual stress fields induced by laser shock peening // *AIP Advances*. – 2018. – Vol. 8. – No. 9. – P. 095203.
9. **Li X. et al.** Simulation and experimental study on residual stress distribution in titanium alloy treated by laser shock peening with flat-top and Gaussian laser beams // *Materials*. – 2019. – Vol. 12. – No. 8. – P. 1343.
10. **Rondepierre A. et al.** Review on laser interaction in confined regime: Discussion about the plasma source term for laser shock applications and simulations // *Metals*. – 2021. – Vol. 11. – No. 12. – P. 2032.

ОБ АВТОРАХ

КОРОЛЕВ Даниил Дмитриевич, асп. каф. 205 МАИ «Технология производства двигателей летательных аппаратов». Диплом инженер-конструктор (МАИ, 2020 г.). Готовит диссертацию на тему «Исследование и разработка технологии лазерного ударного упрочнения для повышения выносливости деталей ДЛА и ЭУ».

КОЖЕВНИКОВ Глеб Денисович, асп. каф. 205 МАИ «Технология производства двигателей летательных аппаратов». Диплом инженер-технолог (МАИ, 2022 г.). Готовит диссертацию на тему «Разработка методики определения оптимальных режимов и стратегии обработки лазерным ударным упрочнением с помощью численного моделирования».

ТОКАЧЕВ Данила Александрович, студент каф. 205 МАИ «Технология производства двигателей летательных аппаратов».

ЛЯХОВЕЦКИЙ Максим Александрович, доцент каф. 205 МАИ «Технология производства двигателей летательных аппаратов». Диплом инженер-конструктор (МАИ, 2011 г.). К.т.н. по направлению «Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки». Исследования в области модификации поверхностного слоя.

METADATA

Title: Influence of laser shock peening modes on the physical and mechanical properties of the surface layer of the D16 aluminum alloy

Authors: D. D. Korolev¹, G. D. Kozhevnikov², D. A. Tokachev³, M. A. Lyakhovetsky⁴

Affiliation:

¹⁻⁴ Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia

Email: ¹ korolev.mai@yandex.ru, ² kozhevnikov.mai@yandex.ru, ³ d.tokachev@yandex.ru, ⁴ lyakhovetskijma@mai.ru

Language: Russian.

Source: *Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology)*, vol. 27, no. 4 (102), pp. 20-28, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The effect of laser shock peening modes on the physical and mechanical properties of the surface layer of the D16 aluminum alloy was investigated. Experiments were carried out with different values of laser radiation intensity and with fixed values. The dependences of the maximum deformations and microhardness in the center of the spot on the radiation intensity are obtained. The effect of increasing the laser radiation energy on the plasma expansion process is investigated. As a result, “critical points” were found, after which the nature of the dependences of microhardness and maximum deformations on the intensity of laser radiation changes. It is also concluded that the application of the Fabbro model to simulate the process of laser shock peening with the available assumptions is unreliable.

Key words: laser shock peening; surface plastic deformation; aluminum; reliability.

About authors:

KOROLEV Daniil Dmitrievich, postgraduate student at Department 205 “Technology of production of aircraft engines” of MAI. Diploma of Design Engineer (MAI, 2020). Prepares a dissertation on the topic “Research and development of the laser shock peening technology to increase the endurance of GTE and PP parts”.

KOZHEVNIKOV Gleb Denisovich, postgraduate student at Department 205 “Technology of production of aircraft engines” of MAI. Diploma of Engineer (MAI, 2022). Prepares a dissertation on the topic “Development of a methodology for determining the optimal modes and strategies of laser shock peening using numerical modeling”.

TOKACHEV Danila Aleksandrovich, student at Department 205 “Technology of production of aircraft engines” of MAI.

LYAKHOVETSKY Maksim Aleksandrovich, Associate Professor at Department 205 “Technology of aircraft engine production” of MAI. Diploma of Design Engineer (MAI, 2011). Candidate of Technical Sciences in the area “Thermal, electric rocket engines and power plants”. Research in the field of surface layer modification.