

УДК 539.3

## ПОВЫШЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ ТЕХНОЛОГИЕЙ ДВУХСТОРОННЕЙ ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ

© Геронтий Жорович Сахвадзе<sup>1</sup>, Любовь Васильевна Гаврилина<sup>1</sup>,  
Ольга Владимировна Бармина<sup>1</sup>, Омар Георгиевич Киквидзе<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

<sup>2</sup>Государственный университет им. Ак. Церетели, Кутаиси, Грузия  
[sakhvadze@mail.ru](mailto:sakhvadze@mail.ru)

**Аннотация.** Проведена конечноэлементная реализация технологии двухсторонней лазерно-ударно-волновой обработки (ДЛУВО) материалов. Установлены особенности распределения сжимающих остаточных напряжений (СОН) как на поверхности, так и вглубь материала для пластины из титанового сплава ВТ-6. Исследованы зависимости СОН от толщины пластины и кратности применения ДЛУВО. Микротвердости материалов определяются по полученным остаточным напряжениям по модели Карлссона-Ларссона. Показано, что многократное (до 4 раз) применение технологии двухсторонней лазерно-ударно-волновой обработки резко повышает микротвердость, а далее рост микротвердости замедляется, но сильно увеличивается толщина упрочненного слоя.

**Ключевые слова:** двухсторонняя лазерно-ударно-волновая обработка (ДЛУВО) материалов, конечно-элементное моделирование, остаточные напряжения, микротвердость.

## INCREASING OF MATERIALS MICROHARDNESS THROUGH THE TECHNOLOGY OF TWO-SIDED LASER SHOCK PROCESSING

© G.Zh. Sakhvadze<sup>1</sup>, L.V. Gavrilina<sup>1</sup>, O.V. Barmina<sup>1</sup>, O.G. Kikvidze<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS

<sup>2</sup>Ak. Tsereteli State University, Kutaisi, Georgia  
[sakhvadze@mail.ru](mailto:sakhvadze@mail.ru)

**Abstract.** The finite element simulation of technology of two-sided laser shock processing (TSLSP) of materials is realized. The features of the distribution of compressive residual stresses (CRS) on the surface and deep into the material for the plate made of titanium Ti-6Al-4V alloy is obtained. The dependence of the CRS from the plate thickness and multiplicity of applications of TSLSP was investigated. The microhardness of the material are determined by the residual stresses through the Carlsson-Larsson model. It is shown that multiple (up to 4 times) the use of TSLSP dramatically increases the microhardness, and further growth is slowing, but greatly increases the thickness of the hardened layer

**Keywords:** Two-sided laser shock processing (TSLSP) of materials, finite element modeling, residual stresses, microhardness

Лазерно-ударно-волновая обработка (ЛУВО) является инновационной упрочняющей технологией модифицирования поверхности, при которой импульсным лазерным излучением сканируется обрабатываемая поверхность и, под воздействием возникающих при этом мощных ударных волн, сжимающие остаточные напряжения (СОН) продвигаются вглубь материала - в приповерхностный слой [1,2]. По сравнению с другими технологиями упрочнения, при ЛУВО СОН могут проникнуть глубже в материал за счет существенного уменьшения количества дефектов как на самой обрабатываемой поверхности, так и в приповерхностной области. При этом создается мощный и устойчивый барьер для инициирования новых и роста уже существующих трещин, что, в свою очередь, заметно повышает прочностные характеристики материалов.

Было проведено целое множество как теоретических, так и экспериментальных исследований для того, чтобы получить максимальную информацию об особенностях, возникающих при ЛУВО полей остаточных напряжений (ОН), но почти все они используют традиционную технологию одностороннего лазерно-ударно-воздействия и, как правило, для толстостенных конструкций. Если эту технологию применить к тонкостенным конструкциям, то это приведет к возникновению больших деформаций, и может привести даже к их разрушению из-за сильной неуравновешенности сил, возникающих при ЛУВО. Поэтому для обработки таких тонких материалов, как, например, края лопаток авиадвигателей, следует использовать технологию двусторонней лазерно-ударно-волновой обработки (ДЛУВО), что существенно улучшит его сопротивляемость к сильным внешним воздействиям, например, повреждениям посторонними предметами. При использовании технологии ДЛУВО лазерный импульс делится на два одинаковых импульса, которые одновременно падают по обе стороны тонкостенной конструкции. Ударные волны, возникающие на одной стороне образца, при распространении взаимодействуют с ударными волнами, возникшими на другой стороне образца, что уменьшает вероятность возникновения больших деформаций.

До недавнего времени оставались слабо изученными ОН, возникающие при ДЛУВО. В работе [3] предпринята попытка исследовать ОН при ДЛУВО с помощью МКЭ (в пакете ABAQUS). В работе [4] проведено моделирование динамических напряжений, возникающих во время ДЛУВО при различных режимах обработки, и впервые было обнаружено, что в срединной поверхности исследуемых образцов кроме СОН возникают и растягивающие остаточные напряжения (РОН). Следовательно, актуальной остается задача дальнейших исследований особенностей распределения СОН при ДЛУВО. Кроме того, нет работ, раскрывающих фундаментальные основы возникновения полей ОН в тонкостенных конструкциях, обработанных с применением технологии ДЛУВО. Поэтому имеется настоятельная потребность всестороннего изучения полей ОН, возникающих при ДЛУВО, что позволит совершенствовать эту технологию с точки зрения ее практического применения.

**Принцип двусторонней лазерно-ударно-волновой обработки.** Принципиальная схема функционирования технологии ДЛУВО показана на рис. 1.

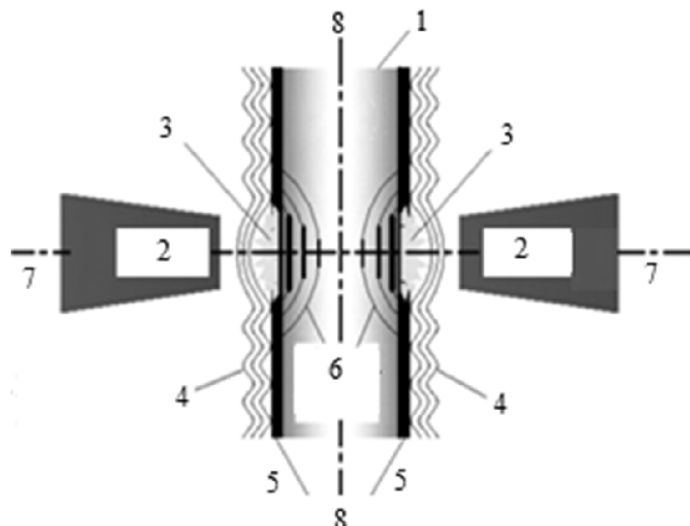


Рис. 1. Принципиальная схема технологии ДЛУВО для тонкостенных конструкций:

1 – исследуемый образец, 2 – лазерный импульс, 3 – плазма, 4 – прозрачный слой, 5 – непрозрачный слой, 6 – ударная волна, 7-7 – ось лазерного луча, 8-8 – срединная поверхность образца

Обрабатываемые поверхности тонкостенной конструкции, которые в дальнейшем подвергаются лазерно-ударно-волновому воздействию, предварительно покрываются абляционным слоем (обычно это алюминиевая фольга или черная краска), который служит защитным слоем от повреждений при воздействиях мощными лазерными импульсами. Кроме этого, каждая поверхность покрывается прозрачным слоем (обычно это стекло или «водяной занавес»), который используется в качестве усилителя пикового давления в ударной волне и продления времени ее воздействия. Мощный и очень короткий лазерный импульс испускается от лазера и по пути делится разделительной призмой на два одинаковых импульса. Каждый импульс, независимо друг от друга, проходит через прозрачный слой и падает на поверхность абляционного слоя. Верхний слой абляционного материала испаряется почти мгновенно (толщиной примерно 1 мкм за 1 удар), образовавшейся пар продолжает поглощать оставшуюся часть энергии лазера, нагревается, ионизируется и за очень короткое время превращается в плазму высокого давления. Благодаря ограничительному влиянию прозрачного слоя давление в плазме многократно увеличивается (до нескольких ГПа), превращаясь в ударные волны, которые одновременно начинают распространяться от поверхностей вглубь исследуемого материала, сжимая его с двух сторон. В результате в материале возникают волны напряжений, и они также распространяются вглубь материала.

Когда пиковое давление в волнах напряжений достигнет величины динамического предела текучести материала, прилегающая к ударной волне область начнет пластическое деформирование, и одновременно, окружающий эту область материал будет испытывать упругое сжатие. После разгрузки (окончания воздействия ударной волны) упруго сжатая область материала будет пытаться возвратиться к своему исходному состоянию, но будет сдерживаться возникшей пластической деформацией. Таким образом, пластически деформируемая область материала будет подвергаться воздействию сжимающих остаточных напряжений (СОН), а следующие за ними слой будет испытывать воздействие растягивающих остаточных напряжений (РОН) с тем, чтобы, как и положено остаточным напряжениям, они

уравновешивали бы друг друга при отсутствии внешних воздействии. Естественно, что из-за симметричности как внешних нагрузок, так и всей геометрии, возникшие поля остаточных напряжений (ОН) также будут симметричными.

**Численное моделирование.** Исследованиям поведения материалов при использовании традиционной технологии – односторонней ДЛУВО - с применением конечноэлементных пакетов (в основном эти пакеты ABAQUS, LS-DYNA и ANSYS) посвящено множество работ [5-8]. В наших исследованиях анализ остаточных напряжений при ДЛУВО состоит из двух шагов: сначала выполняется динамический анализ посредством МКЭ-пакета LS-DYNA (номер лицензии 10312012), затем выполняется статический анализ в пакете ANSYS (номер лицензии 660578). На первом шаге осуществляется анализ динамического отклика материала на лазерно-ударно-волновое воздействие в LS-DYNA, в частности, изучаются процессы распространения и взаимодействия ударных волн, определяются величины динамических напряжений в различные моменты времени. По завершении динамического анализа полученные данные передаются в пакете ANSYS для выполнения статического анализа, после чего получаем окончательное распределение ОН в равновесном состоянии. При анализе многократного применения технологии ДЛУВО с теми же параметрами воздействия и на том же самом месте полученные ОН остаются в материале в качестве начальных напряжений для следующего воздействия. Например, ОН, сгенерированные после первого воздействия, используются в качестве начальных напряжений для второго воздействия и т.д. После нескольких аналогичных итераций получаем окончательное поле ОН (в наших исследованиях применялись до 4-х воздействий).

**Модель конечных элементов.** Для моделирования отклика материала при ДЛУВО были использованы 3-х мерные конечные элементы (Рис. 2). Использовался элемент типа C3D8R, который представляет собой 8-узловое сплошное твердое тело.

Исследуемый образец из титанового сплава ВТ-6 имеет геометрические размеры (длина  $\times$  ширина) 30 мм  $\times$  30 мм, а толщина меняется от 1 мм до 5 мм (с целью исследования влияния толщины пластины на полученное поле ОН). Так как образцы в наших случаях были разными, конечные элементы также использовались разные в соответствии с рекомендациями [5,6]. Результаты конечноэлементного анализа очень чувствительны к выбору плотности сетки [7,8]. Более плотные сетки приводят к более точным результатам, но они соответственно и требуют более мощных вычислительных мощностей. Поэтому необходимо выбрать подходящую оптимальную плотность сетки, чтобы с одной стороны, изучить исследуемые механические эффекты с требуемой точностью и разумно сэкономить на вычислениях, с другой стороны. Поэтому, в центральной части образца (область воздействия ДЛУВО) на свободных поверхностях (в плоскости  $xy$ ) в зоне 6 мм  $\times$  6 мм выбираются элементы с длиной 0,05 мм, а в других областях используются более грубые элементы с длиной 0,2 мм. Длина элемента вдоль  $z$  также составляет 0,05 мм. Число всех элементов в выбранной конечноэлементной модели составило 3456000. Края пластины были полностью защемлены (Рис. 2).

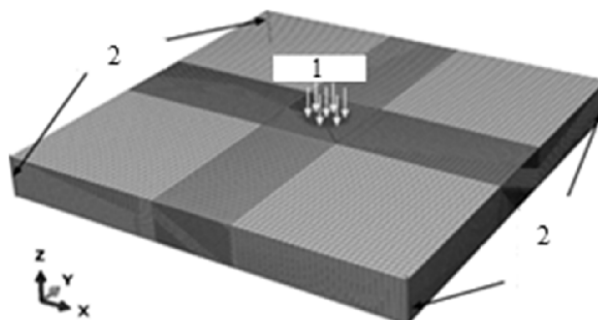


Рис. 2. Конечноэлементная модель технологии ДЛУВО:  
1 – давление, 2 – полностью защемленные края.

**Приложение ударной нагрузки.** При моделировании процедуры ДЛУВО диаметр лазерного пятна составлял 3 мм. Лазерный импульс имеет Гауссову форму, длительность импульса равна 16 нс. Диаметр лазерного пятна и длительность лазерного импульса во время экспериментов остаются постоянными. Для разных экспериментов выходная мощность лазера варьируется, соответственно меняются плотность мощности лазерного излучения и пиковое давление в ударной волне [9].

Рассмотрим процесс генерации давления в ударной волне. Для этого примем, что плазма является идеальным газом с корректирующим коэффициентом  $\alpha$ , характеризующим отношение термической энергии к внутренней энергии ( $\alpha=1$  для идеального газа), и учтем процессы нагревания, адиабатического охлаждения и заключительного расширения.

Процесс раскрытия поверхности раздела может быть выражено формулой Гююнио [10]:

$$\frac{dL(t)}{dt} = \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) P(t) = \frac{2}{Z} P(t), \quad (1)$$

где  $L(t) = \int_0^t [u_1(t) + u_2(t)] dt$  - длина плазмы во время действия импульса в момент  $t$ ;  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$

– скорости движения непрозрачного и прозрачного слоев, соответственно;  $P(t)$  - давление в плазме в момент времени  $t$ ;  $Z$  – акустический импеданс,  $Z_i = \rho_i D_i$ , где индекс  $i$  обозначает непрозрачный ( $i=1$ ) или прозрачный слой ( $i=2$ ),  $\rho_i$  – плотность и  $D_i$  – скорость ударной волны в соответствующей среде (например, для титанового сплава ВТ-6 акустический импеданс равен  $3,26 \times 10^6$  гр/см<sup>2</sup>с, для воды -  $0,165 \times 10^6$  гр/см<sup>2</sup>с);  $Z$  - приведенный импеданс ударной волны ( $2/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2$ ).

Согласно последним исследованиям [7], если считать, что профиль ударной волны имеет Гауссову форму, то пространственно-неоднородное давление на расстоянии  $r$  от центра лазерного пятна будет равно

$$p(r, t) = p(t) \exp\left(-\frac{r^2}{2R^2}\right), \quad (2)$$

где  $R$  – радиус лазерного пятна.

Рассмотрим важный частный случай, когда интенсивность лазерного излучения  $I_0$  постоянна. Возникающее при этом давление можно определить следующей упрощенной зависимостью:

$$P = 10^{-9} \left( \frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right)^{1/2} \cdot (Z I_0)^{1/2}. \quad (3)$$

В этой формуле давление измеряется в ГПа, импеданс - в кг/м<sup>2</sup>с, интенсивность - в Вт/м<sup>2</sup>.

Если  $I_0$  является начальной плотностью мощности лазерного излучения ( $I(t) = I_0$  в течение продолжительности импульса  $\tau$ ), то  $\alpha$  характеризует эффективность (к.п.д.) процесса взаимодействия, причем часть энергии  $\alpha E$  идет на увеличение давления ( $P = \frac{2}{3} \alpha E_i$ ) а остальная часть энергии  $(1 - \alpha)E$  - на генерирование и ионизацию плазмы (заметим, что  $\alpha$  меняется от 0,1 до 0,2).

В случае использования воды в качестве окружающей среды  $\alpha = 0,11$  (означающий, что 11 % начальной плотности энергии лазерного излучения используется для повышения давления плазмы), пиковые давления пропорциональны квадратному корню от плотности мощности лазерного излучения. Из уравнения (13.10) получаем простую формулу:

$$P = 3,22 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{I_0}. \quad (4)$$

Как известно [10], длительность воздействия возникшей при ЛУВО ударной волны 2-3 раза дольше, чем длительность лазерного импульса, поэтому получаем следующее распределение давления в ударной волне при разных плотностях мощности лазерного излучения (Рис. 3). Напомним, что они прикладываются одновременно по обеим сторонам исследуемого образца.

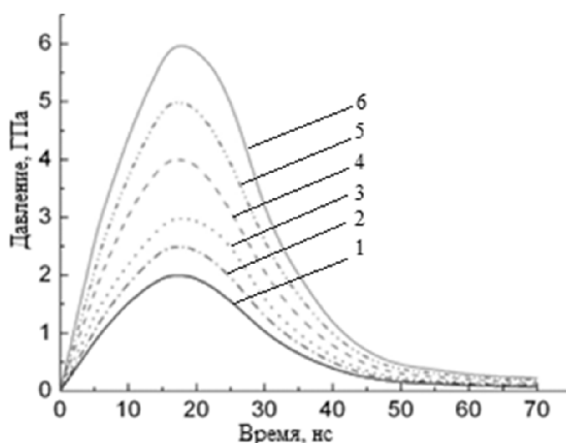


Рис. 3. Профили давлений в ударной волне при разных плотностях мощности лазерного излучения:

1 - 1,4 ГВт/см<sup>2</sup>; 2 - 2,1 ГВт/см<sup>2</sup>; 3 - 3,0 ГВт/см<sup>2</sup>;  
4 - 5,4 ГВт/см<sup>2</sup>; 5 - 8,4 ГВт/см<sup>2</sup>; 6 - 12,2 ГВт/см<sup>2</sup>.



**Определяющее соотношение.** Материал исследуемой пластины считается упруго-пластическим однородным изотропным материалом без начальных напряжений. При ДЛУВО из-за воздействия большого по величине и кратковременного по времени давления скорости деформации в исследуемом материале достигают величин  $10^6 \text{ с}^{-1}$  и более, поэтому при расчетах напряженно-деформированного состояния используется модель пластического деформирования материала Джонсона-Кука [12]:

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}^n) \cdot (1 + C\dot{\bar{\epsilon}}^*) \cdot [1 - (T^*)^m], \quad (5)$$

где  $\sigma$  – эквивалентное напряжение по Мизесу,  $\bar{\epsilon}$  – эквивалентная пластическая деформация,  $\dot{\bar{\epsilon}}^* = \dot{\bar{\epsilon}}/\dot{\bar{\epsilon}}_0$  – безразмерная эквивалентная скорость деформации ( $\dot{\bar{\epsilon}}_0 = 1.0 \text{ с}^{-1}$ ),  $T^*$  – гомологическая температура, связь которой с абсолютной температурой  $T$  определяется следующим образом:

$$T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0), \quad (6)$$

где  $T_0$  – комнатная температура,  $T_m$  – температура плавления материала образца.

Уравнение (5) содержит пять материальных констант, которые определяются эмпирическим путем:  $A$  – статический предел текучести,  $B$  – модуль деформационного упрочнения,  $n$  – показатель степени в законе деформационного упрочнения,  $C$  – коэффициент скорости деформаций,  $m$  – показатель степени в законе температурного разупрочнения. Модель Джонсона-Кука предполагает независимость относительного влияния деформационного упрочнения, скорости пластической деформации и повышения температуры при всех скоростях и температурах пластической деформации. В уравнении (5) выражение в первых скобках определяет напряжение как функцию деформации при  $\dot{\bar{\epsilon}}_0 = 1$  и  $T^* = 0$ , во вторых и третьих – влияние мгновенного значения скорости деформации и температуры на предел текучести, соответственно. Так как общепринято, что технология ДЛУВО относится к нетермическим технологиям, тепловыми эффектами игнорируем, и при моделировании будем использовать упрощенную модель Джонсона-Кука для комнатной температуры:

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}^n) \cdot (1 + C\dot{\bar{\epsilon}}^*). \quad (7)$$

В наших исследованиях расчеты проводятся (а также сравниваются с экспериментами) для титанового сплава ВТ-6. Его механические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Механические характеристики титанового сплава ВТ-6

Характеристика	Значение	Размерность
Плотность, $\rho$	4500	Кг/м <sup>3</sup>
Коэффициент Пуассона, $\nu$	0,342	-
Модуль упругости, $E$	110	ГПа
Предел упругости Гюгоньо, $\sigma_{HEL}$	2,8	ГПа

<i>A</i>	1098	МПа
<i>B</i>	1092	МПа
<i>C</i>	0,93	-
<i>n</i>	0,014	-

**Исследование влияния толщины пластины на характер распределения остаточных напряжений.** В связи с симметричностью геометрической модели исследуемого материала и приложенной импульсной нагрузки, профили остаточных напряжений (ОН) по направлениям *X* и *Y* после ДЛУВО также являются симметричными. Поэтому в дальнейшем результаты приводятся только для остаточных напряжений (ОН) по направлению *x* ( $\sigma_x$ ). На рис. 4,5 показаны контуры распределения ОН по поверхности и вглубь материала, соответственно, рассчитанные в конечноэлементном пакете ANSYS для 5-ти различных толщин пластин, подверженных однократному нагружению по технологии ДЛУВО при пиковом давлении в ударной волне 3 ГПа. Полученные профили ОН симметричны во всех случаях, т.к. одновременно прикладываются одинаковые импульсы с двух сторон пластины. ОН по толщине (рис. 5) изображены согласно расчетным данным на местоположении 0,75 мм ( $r/2$ ) от центра лазерного пятна, в соответствии с рекомендациями из работ [13-15].

Из рис. 4 видно, что величина СОН в центре лазерного пятна меньше, чем по периметру пятна. Анализируя характер изменений ОН по рис. 4 и рис. 5, можно сделать вывод, что характер распределения ОН сильно зависит от толщины пластины. Так, например, при увеличении толщины пластины от 1 мм до 5 мм, значение максимальных поверхностных СОН уменьшается на 27,6 %: от 395,6 МПа до 286,5 МПа. Максимальные СОН в срединной поверхности также уменьшаются от 165,8 МПа почти до 0 МПа, в то время как, глубина слоя СОН увеличивается на 131 % - от 0,19 мм до 0,44 мм.

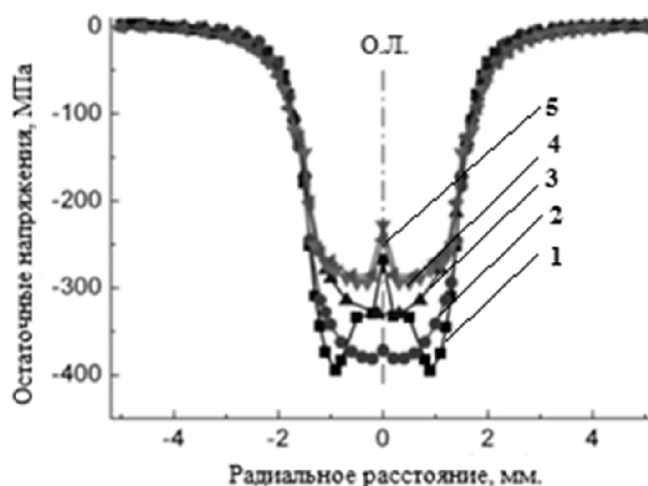


Рис. 4. Профили остаточных напряжений (ОН) для 5-ти различных значений толщины пластины на поверхности материала (О.Л. – ось лазера):

1 – 1 мм., 2 – 2 мм., 3 – 3 мм., 4 – 4 мм., 5 – 5 мм.



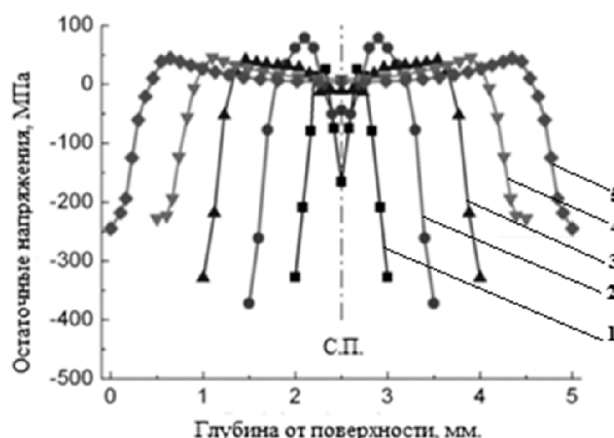


Рис. 5. Профили остаточных напряжений (ОН) для 5-ти различных значений толщины пластины по глубине материала на расстоянии 0,75 мм. от центра лазерного пятна (С.П. – срединная поверхность образца):

1 – 1 мм., 2 – 2 мм., 3 – 3 мм., 4 – 4 мм., 5 – 5 мм.

Как известно, если пиковое давление в ударной волне, вызванного технологией ДЛУВО, ниже динамического предела текучести материала, материал не течет, и накопленная энергия будет расходоваться на упругую энергию деформирования, а если больше, то происходит поверхностные пластические деформации и образование СОН. Когда для инициирования ударной волны при ДЛУВО используется лазерное пятно круговой формы (особенно диаметром 1 мм и выше), то происходит следующее неизбежное явление. Сначала по периметру лазерного пятна генерируются радиальные волны напряжений, которые распространяются во внутрь и сосредотачиваются в центре лазерного пятна. В результате фокусировки этих поверхностных волн, в центре лазерного пятна генерируется импульс больших растягивающих напряжений, и поле начальных СОН уменьшается значительно. Поэтому величины СОН в центре лазерного пятна меньше, чем по его периметру. В научной литературе это явление получило название "лунка ОН" [16]. Поэтому, во избежание влияния эффекта "лунки ОН", величины ОН по толщине на рис. 5 взяты на расстоянии 0,75 мм от центра лазерного пятна.

**Исследование микротвердости.** Как было отмечено выше, при ДЛУВО скорости деформации достигают величин  $10^6 \text{ с}^{-1}$  и выше. При этом пределом упругости в направлении распространения ударных волн является предел упругости Гюгонио ( $\sigma_{HEL}$ ). При достижении пикового давления величины  $\sigma_{HEL}$  в материале возникают пластические деформации. Связь между динамическим пределом текучести ( $\sigma_D$ ) и пределом упругости Гюгонио такова (при одноосном растяжении):

$$\sigma_{HEL} = \sigma_D \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)}, \quad (8)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона. Предполагается, что пластические деформации определяются по критерию текучести Мизеса.

Существует ряд предположений по установлению количественных связей между остаточными напряжениями и твёрдостью. В настоящей работе мы применим наиболее простую и адекватную модель Карлссона-Ларссона [17]:

$$H = \frac{H_0}{1 - (\sigma_R / 3\sigma_T)}, \quad (9)$$

где  $H$  – твёрдость при наличии остаточных напряжений,  $H_0$  – начальная твёрдость (при отсутствии остаточных напряжений),  $\sigma_R$  – остаточное напряжение,  $\sigma_T$  – предел текучести материала. Формула получена для случая плоского однородного напряженного состояния.

При ДЛУВО происходит пластическое деформирование материала, что приводит к его деформационному упрочнению, соответственно, повышается его твёрдость. На рис. 6 представлено распределение микротвёрдости материала вглубь материала при многократных импульсных воздействиях, рассчитанное по формуле (9).

При вычислениях взяты значения остаточных напряжений в соответствующих точках. Как видно из рисунка, микротвёрдость увеличивается от значения 334,2 HV (перед ЛУВО) до 398,5 HV после первого импульсного воздействия, т.е., приблизительно, на 19 %. Однако, после 5-ти кратного воздействия она составляет всего 409,6 HV.

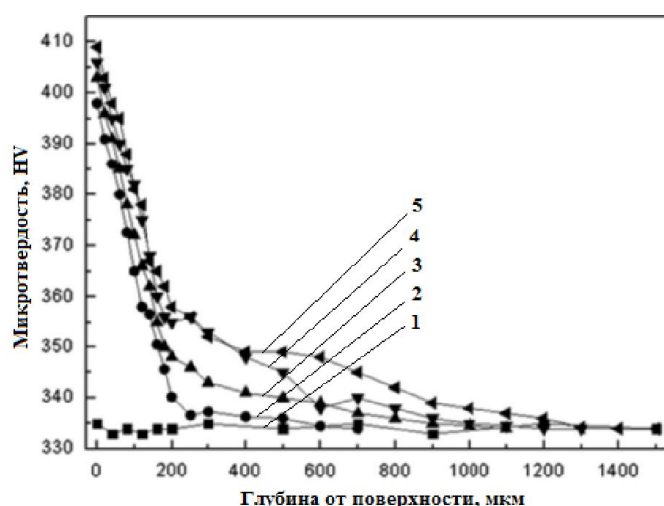


Рис. 6. Распределение микротвёрдости по глубине материала при многократных импульсных воздействиях: 1 – 1 импульс, 2 – 2 импульса, 3 – 3 импульса, 4 – 4 импульса, 5 – 5 импульсов.

Таким образом, увеличение количества импульсных воздействий – это не лучший способ увеличения микротвёрдости. После первых нескольких воздействиях размер зерна больше не уменьшается (дальнейшее увеличение микротвёрдости, скорее всего, лимитировано эффектами, связанными с проявлениями закона Холла-Петчи).

В приповерхностной области при ЛУВО генерируется сильно упрочненный слой толщиной приблизительно 300 мкм. В этом слое микротвёрдость уменьшается резко, а ниже этого слоя – уменьшается постепенно. Резкое уменьшение микротвёрдости в этом слое объясняется интенсивными пластическими деформациями, вызванными мощными лазерными ударными волнами. Далее ударная волна ослабляется, и микротвёрдость уменьшается

постепенно. Таким образом, можно предположить, что после многократного применения ДЛУВО получается своеобразная стратификация микроструктуры материала, подтвержденная также и экспериментально [18]. Хотя, как мы уже отметили, многократное (более 3) использование технологии ДЛУВО не сильно увеличивает твердость материала, но оно позволяет сильно увеличить толщину упрочненного слоя (в некоторых случаях до 1500 мкм), что особенно важно для высоконагруженных деталей объектов машиностроительной техники [19].

**Выводы.** В результате проведенной работы разработана трехмерная конечноэлементная модель с целью анализа особенностей распределения ОН как на поверхности, так и вглубь материала для пластины из титанового сплава ВТ-6, подвергнутой технологии ДЛУВО.

Установлено, что толщина пластины играет важную роль в процессе генерации полей ОН при ДЛУВО: при увеличении толщины пластины от 1 мм до 5 мм, значение максимальных поверхностных СОН уменьшается на 27, 6 %: от 395,6 МПа до 286,5 МПа. Максимальные СОН в срединной поверхности при этом также уменьшаются от 165,8 МПа почти до 0 МПа, в то время как, глубина слоя СОН увеличивается на 131 % - от 0,19 мм до 0,44 мм.

Показано, что многократное (до 3 раз) использование технологии ДЛУВО резко повышает твердость материала, а при 4-х и более-кратном применении увеличение твердости замедляется, хотя при этом сильно увеличивается толщина упрочненного слоя (до 1,5 мм).

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику ИМАШ РАН Бубнову М.А. за помощь в проведение расчетов в конечноэлементном пакете ANSYS.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», Соглашение о предоставлении субсидии №14.607.21.0040 от 22.07.2014 г., проект RFMEFI60714X0040.

### Список литературы

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. 1963. С. 232.
2. Current trends in laser shock processing / Peyre P., Scherpereel X., Berthe L. et al. // Surf. Eng. 1998. V. 14. P. 377–380.
3. Tensile properties, residual stress distribution and grain arrangement as a function of sheet thickness of Mg-Al-Mn alloy subjected to two-sided and simultaneous LSP impacts / Luo K.Y., Liu B., Wu L.J. et al. // Applied Surface Science. 2016. V. 369. P. 366-376.
4. Investigation on effect of laser shock processing on fatigue crack initiation and its growth in aluminum alloy plate / Zhang X.Q., Li H., Yu X.L. et al. // Materials & Design. 2015. V. 65. P. 425–431.

5. Сахвадзе Г.Ж., Гаврилина Л.В., Киквидзе О.Г. Влияние эффекта перекрытия лазерных пятен на остаточные напряжения при лазерно-ударно-волновой обработке материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 3. С. 77-84.
6. Pulsed Nd:YAG laser shock processing effects on mechanical properties / Irizalp S.G., Saklakoglu N., Akman E. et al. // Opt. Laser Technol. 2014. V. 56. P. 273–277.
7. Induction of thermo-mechanical residual stresses in metallic materials by laser shock processing / Ocana J.L., Morales M., Porro J.A. et al. // Encyclopedia of Thermal Stresses. 2014. P. 2427–2444.
8. Laser Shock Processing: an emerging technique for the enhancement of surface properties and fatigue life of high-strength metals / Ocana J.L., Porro J.A., Morales M. et al. // Int. J. Microstruct. Mater. Prop. 2013. V. 8(1-2). P. 38–52.
9. Зельдович Ю.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 3-е изд., исправл. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 656 с.
10. Yongxiang Hu, Zhenqiang Yao. Numerical simulation and experimentation of overlapping laser shock processing with symmetry cell // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2008. V. 48. P. 152–162.
11. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана: учебное пособие для вузов, 2008. 663 с.
12. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proceedings of the 7-th international symposium on ballistics. The Hague. 1983. P. 541–547.
13. Sakhvadze G.J. Laser Shock Processing of Materials to Produce Nanostructures // Special Issue of Scientific Journal of IFToMM «Problems of Mechanics». 2014. № 2(55). P. 68-73.
14. 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.
15. Сахвадзе Г.Ж., Гаврилина Л.В. Лазерно-ударно-волновая обработка материалов при однократных и многократных импульсных воздействиях // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 6. С. 75-80.
16. Перминов М.Д., Соловьёв В.О., Сахвадзе Г.Ж. и др. Вибрационные, виброакустические процессы и технологии, включая процессы управления и информатизации в системах "человек-машина-среда". Отчет о НИР (заключительный; части 1, 2, 3), 2012 г., Номер государственной регистрации: 01201060703. - 478 с.
17. Carlsson S., Larsson P. L. On the determination of residual stress and strain fields by sharp indentation testing. Part 1: theoretical and numerical analysis // Acta mater. 2001. V. 49. P. 2179–2191.
18. Сахвадзе Г.Ж., Булекбаева Г.Ж., Киквидзе О.Г. Исследование качества поверхностных слоев, упрочненных лазерно-ударно-волновой технологией при различных степенях перекрытия лазерных пятен // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 2. С. 132-141.

19. Сахвадзе Г.Ж., Булекбаева Г.Ж., Киквидзе О.Г. Особенности применения технологии двухсторонней лазерно-ударно-волновой обработки материалов для тонкостенных конструкций // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 3. С. 127-138.

*Дата поступления статьи: 5 июля 2016 года.*