

УДК 621.787, 539.372

Анализ зависимости уровня и глубины остаточных напряжений от параметров лазерного излучения при моделировании лазерной ударной обработки плоских образцов из титанового сплава

А.А. Ширяев¹, В.В. Карманов²¹ АО «ОДК-Авиадвигатель»² ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Analysis of the residual stress level and depth dependences originating from the laser radiation parameters in simulating the laser impact machining of flat samples made of the titanium alloy

A.A. Shiryayev¹, V.V. Karmanov²¹ UEC-Aviadvigatel JSC² Perm National Research Polytechnic University

Исследовано влияние параметров лазерного излучения на уровень и глубину остаточных напряжений при математическом моделировании процесса лазерной ударной обработки пластины толщиной 2 мм, выполненной из титанового сплава. Верификация математической модели лазерной ударной обработки проведена путем расчета остаточных напряжений в титановом сплаве после обработки пластины в режимах, аналогичных модулируемым. Результаты моделирования оказались в разумном согласии с экспериментальными данными. Моделирование включало в себя два этапа: на первом определяли распространение упругопластических волн на основе соотношения Джонсона — Кука, на втором проводили статический расчет распределения остаточных напряжений. Установлено, что лазерная ударная обработка без перекрытия приводит к неоднородному распределению остаточных напряжений сжатия по глубине в зависимости от зоны обработанной поверхности, причем это проявляется при увеличении плотности мощности лазерного излучения. Зоны стыка лазерных пятен обладали минимальными остаточными напряжениями сжатия. Для равномерного распределения остаточных напряжений по глубине следует проводить лазерную ударную обработку с 50%-ным перекрытием пятен. С увеличением числа проходов лазера повышаются уровень и глубина распространения остаточных напряжений сжатия на обработанной поверхности, но также возрастают напряжения растяжения в объеме образца. Лазерная ударная обработка обеих сторон пластины приводит к уменьшению профилей остаточных напряжений сжатия и способствует нивелированию околонулевых остаточных напряжений сжатия на противоположной стороне. Однако двухсторонняя обработка вызывает рост остаточных напряжений растяжения в зоне стыка между пятнами лазерного излучения до 0,82 отн. ед. Второй проход следует выполнять с такими же параметрами лазерного излучения, что и первый, так как это увеличивает глубину распространения остаточных напряжений сжатия. С увеличением размера лазерного пятна от 1 до 3 мм при одном и том же давлении

(5,27 ГПа) уровень остаточных напряжений возрастает от $-0,3$ до $-1,1$ отн. ед. Глубина распространения остаточных напряжений сжатия остается неизменной (0,6 мм). Варьирование параметров лазерного импульса приводит к изменению геометрических параметров поверхностного слоя пластины на $1 \dots 5$ мкм.

EDN: DHTHOL, <https://elibrary/dhthol>

Ключевые слова: лазерная ударная обработка, титановые сплавы, остаточные напряжения, верификация математической модели, моделирование пластины, двухсторонняя обработка

The paper analyzes effect of the laser radiation parameters on the residual stresses level and depth in mathematical simulation of the laser impact machining of a 2 mm thick titanium alloy plate. The laser machining impact mathematical model is verified by computing residual stresses in a titanium alloy after machining the plate in the modes similar to the modulated ones. Simulation results appear in good agreement with the experimental data. Simulation included two stages. The first involved simulating the elastic-plastic waves propagation based on the Johnson-Cook relationship. The second involved static computation of the residual stress distribution. It was identified that laser impact treatment without an overlapping resulted in the non-uniform distribution of the residual compressive stresses in depth depending on the machined surface zone. Therefore, it became apparent with the increasing laser radiation power density. The laser spots junction zones had the minimum residual compressive stresses. For uniform distribution of the residual stresses by depth, the paper recommends to perform the laser impact machining with the 50 % overlap over the spots. With an increase in the laser passes number, the level and depth of residual compressive stresses on the treated surface increase, but tensile stresses in the sample volume are also growing. Laser impact machining of both sides of the plate leads to a decrease in the residual compressive stresses profile and provides for leveling out the near-zero residual compressive stresses on the opposite side. However, the double-sided machining causes an increase in the residual tensile stresses in the junction zone between the laser radiation spots up to 0.82 rel. units. The paper recommends the second pass with the same laser radiation parameters as the first, since this leads to an increase in the residual compressive stresses depth. With an increase in the laser spot size from 1 to 3 mm at the same pressure (5.27 GPa), the residual stresses level increases from -0.3 to -1.1 rel. units. The residual compressive stresses depth remains unchanged (0.6 mm). Varying the laser pulse parameters leads to an alteration in geometric parameters of the plate surface layer by $1 \dots 5$ μm .

EDN: DHTHOL, <https://elibrary/dhthol>

Keywords: laser impact machining, titanium alloys, residual stresses, mathematical model verification, plate simulation, double-sided machining

Элементами авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), в значительной мере определяющими их эксплуатационные характеристики, являются рабочие лопатки и роторные детали. Рабочие лопатки в процессе эксплуатации подвержены циклическим (мало- и многоциклового усталости), термическим и статическим (центробежным и газодинамическим) нагрузкам, а также повреждениям от попадания посторонних предметов (льда, песка, птиц, мусора на взлетно-посадочной полосе и др.) [1]. Попадание посторонних предметов в проточную часть ГТД приводит к таким повреждениям лопаток, как забоины, отгибы и вмятины.

Согласно статистическим данным, наиболее часто повреждаются входные кромки рабочих

лопаток и лопаток первых ступеней, что выражается в появлении забоин по кромкам, перу и антивибрационным полкам (при наличии) лопаток, которые распределяются нелинейно по длине тракта (ступеням). Такие повреждения приводят к преждевременному сему ГТД с эксплуатации и требуют проведения ремонтов/зачисток повреждений на лопатках ГТД. Так как зачистку лопаток выполняют только на базовых аэродромах, эксплуатация ГТД становится дороже.

Для повышения стойкости лопаток к повреждениям применяют различные методы поверхностного упрочнения, в том числе лазерную ударную обработку (ЛУО) [2]. В работах [3, 4] показано, что глубина распространения (далее

глубина) остаточных напряжений (ОН) сжатия в поверхностный слой детали при ЛУО превосходит методы упрочнения, применяемые серийно.

Улучшение усталостных характеристик после ЛУО обусловлено измельчением зерна и наведением ОН сжатия на большую глубину ($h > 0,3$ мм) [3, 5, 6], чем при обработке другими методами поверхностного упрочнения. В работе [7] отмечено, что для титанового сплава ВТ6 глубина ОН сжатия при ЛУО превышает 0,6 мм.

Для подбора параметров лазерного излучения (ЛИ) при ЛУО различных материалов широко применяют численное моделирование. Так, в публикациях [8, 9] приведены результаты моделирования единичного лазерного удара с пятном круглой формы для титанового сплава ВТ6/Ti-6Al-4V. Продemonстрировано, что увеличение числа ударов более двух-трех является нецелесообразным, так как приводит к незначительному повышению ОН сжатия (до -30 МПа за один повторный удар).

В статье [9] показаны профили поверхностного слоя после многократной обработки при различных профилях приложенного давления ЛИ в зависимости от времени. В работе [10], посвященной моделированию ЛУО с диаметром пятна ЛИ (далее лазерное пятно) 3...7 мм, отмечено, что увеличение этого параметра не приводит к возрастанию глубины ОН сжатия.

Проведено моделирование двухсторонней обработки пластины из титанового сплава Ti-6Al-4V лазером с пятнами круглой формы [11]. Показано, что профили ОН зависят от времени воздействия ЛИ и толщины пластины.

Проанализировано влияние диаметра лазерного пятна, степени перекрытия пятен, интенсивности лазерного удара и времени импульсного воздействия на распределение ОН по глубине [12].

Установлено [13], что увеличение процента перекрытия лазерных пятен круглой формы приводит к повышению глубины ОН сжатия и уменьшению размера зерна.

В публикациях [14, 15] приведены результаты моделирования лазерного удара с пятном квадратной формы, длина стороны которого составляла 3 и 4 мм соответственно. В статье [14] показано, что увеличение давления ЛИ приводит к возрастанию ОН сжатия. Схема обработки при 50%-ном перекрытии лазерных пятен позволяет предотвратить появление ОН растяжения на противоположной стороне пластины. В работе [15] отмечена возможность по-

лучения эюры с глубиной ОН сжатия более 1 мм. Установлено, что увеличение плотности мощности ЛИ приводит к изменению профиля ОН по глубине, но глубина проникновения ОН сжатия остается неизменной.

Разработка модели ЛУО позволяет подобрать режимы упрочнения, обеспечивающие заданный уровень ОН сжатия по глубине деталей ГТД, в частности лопаток. Внедрение ЛУО обеспечит увеличение усталостного ресурса деталей, в том числе с концентраторами напряжений при попадании посторонних предметов в проточную часть ГТД.

Цель работы — оценка влияния параметров ЛУО (числа проходов лазера, размера и степени перекрытия лазерных пятен, двухсторонней обработки пластины) на эюру ОН.

Математическая модель ЛУО. Моделирование ЛУО не включало в себя этапы испарения материала с поверхности и формирования плазмы высокого давления. Влияние лазерного импульса учитывали путем задания на поверхности образца функции механического давления, зависящей от времени.

Для вычисления ОН, вызванных ЛУО, применяли модель Джонсона — Кука. В предположении отсутствия температурного воздействия при ЛУО эквивалентное напряжение имеет вид

$$\sigma_{eq} = \left[A + B \left(\epsilon_{eq}^{pl} \right)^n \right] \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_{eq}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right),$$

где A — квазистатический предел текучести; B — коэффициент упрочнения; ϵ_{eq}^{pl} — эквивалентная пластическая деформация; n — показатель деформационного упрочнения; C — параметр, определяющий скоростную чувствительность; $\dot{\epsilon}_{eq}^{pl}$ — эквивалентная скорость пластической деформации; $\dot{\epsilon}_0$ — контрольная скорость деформации.

Поведение упругого материала принимали изотропным и описывали законом Гука с двумя параметрами — модулем упругости и коэффициентом Пуассона.

Модель Джонсона — Кука для титанового сплава ВТ6 имела следующие параметры [16, 17]: плотность $\rho = 4424$ кг/м³; модуль упругости $E = 106,7$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,314$; квазистатический предел текучести $A = 900$ МПа; коэффициент упрочнения $B = 509,75$ МПа; показатель деформационного упрочнения $n = 0,506$; параметр, определяющий скоростную чувствительность $C =$

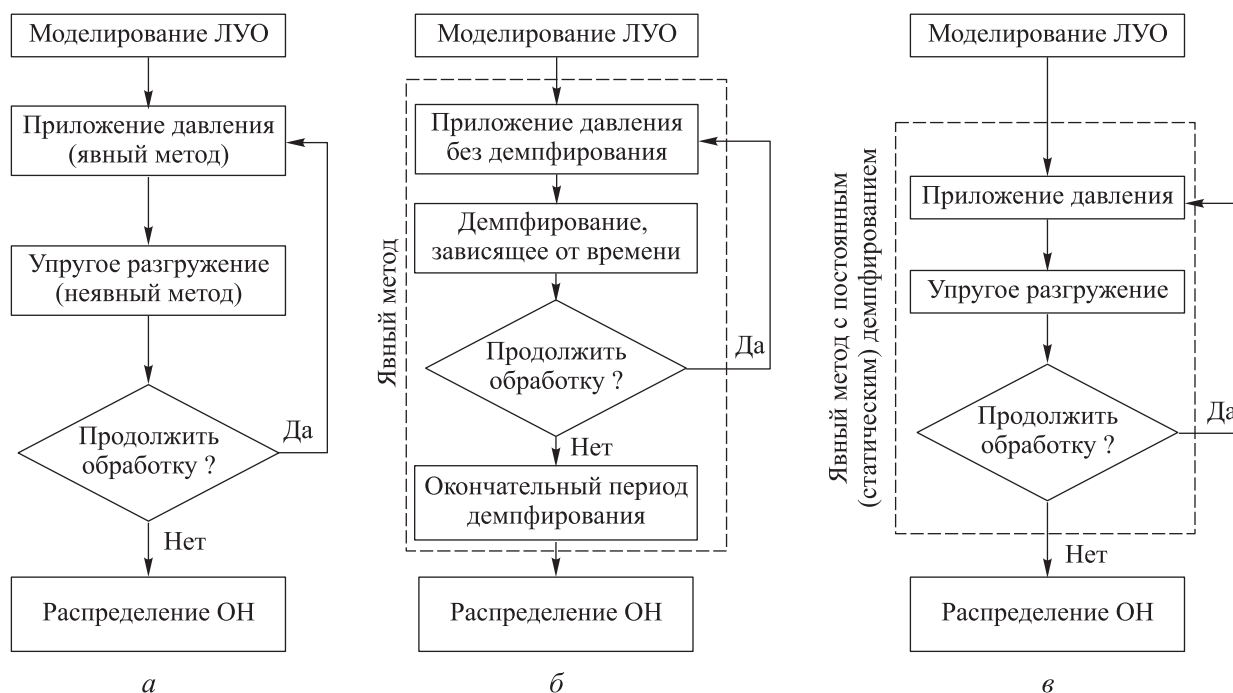


Рис. 1. Типовые блок-схемы моделирования ЛУО:

а — явный и неявный анализ; *б* — одиночный явный анализ с демпфированием по времени; *в* — явный метод статического демпфирования [18]

= 0,014 [13]; контрольная скорость деформации $\dot{\varepsilon}_0 = 0,001 \text{ с}^{-1}$.

Процесс моделирования ЛУО включал в себя два этапа: 1) приложение давления — явный анализ; 2) экспорт результата, полученного на первом этапе, в неявный анализ для расчета упругой разгрузки. Типовые схемы моделирования процесса ЛУО приведены на рис. 1 [11].

Верификацию математической модели ЛУО проводили путем расчета ОН в титановом сплаве после обработки пластины, в режимах аналогичных модулируемому. Расчетные профили сравнивали с экспериментальными.

Прогнозируемые результаты расчета ОН находились в разумном согласии с экспериментальными данными.

Исследование влияния параметров ЛУО на уровень и глубину ОН. Для выявления зависимости уровня и глубины ОН от параметров ЛУО проводили моделирование пластины толщиной 2 мм из титанового сплава. Зону обработки разбивали на четыре одинаковых квадрата со стороной длиной $a = 1 \text{ мм}$, к которым поочередно прикладывали импульсную нагрузку по схеме $A-B-C-D$ (рис. 2). Влияние длительности лазерного импульса t на профиль давления ЛИ показано на рис. 3, где p и $p_{\max}$ — давление ЛИ и его максимальное значение.

Пространственное распределение нагрузки принимали однородным. На тыльной грани пластины запрещали перемещения, а на боковых границах исключали отражение ударных волн. Для дискретизации расчетной области использовали восьмиузловые конечные элементы, размер стороны которых составлял 0,1 мм.

Оценивали влияние плотности мощности ЛИ, числа проходов, двухсторонней обработки, длительности импульса и размера лазерного пятна на уровень и глубину ОН.

Распределения ОН σ по глубине h в поверхностном слое пластины, полученные путем расчета и эксперимента, приведены на рис. 4. Видно, что результаты расчета находятся в разумном согласии с экспериментальными данными.

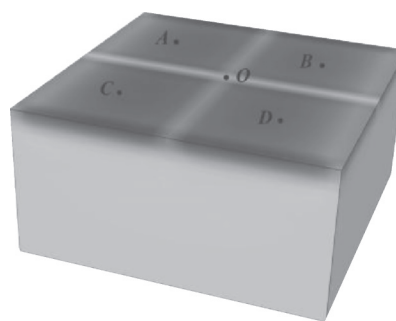


Рис. 2. Конечно-элементная модель зоны обработки: A, B, C, D — центры лазерных пятен; O — центр пластины

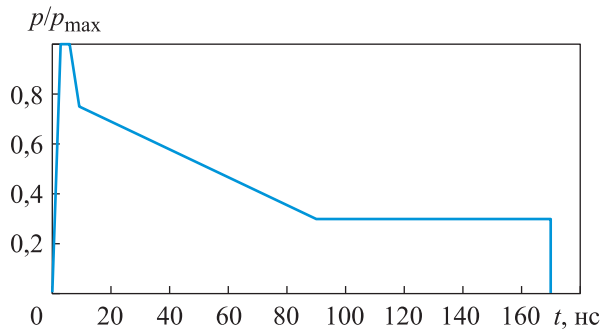


Рис. 3. Влияние длительности лазерного импульса t на профиль давления ЛИ

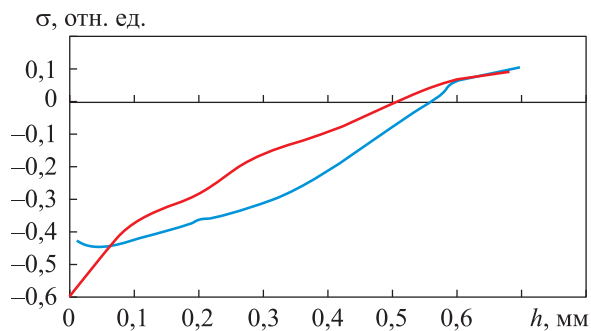


Рис. 4. Распределения ОН σ по глубине h в поверхностном слое пластины, полученные путем расчета (—) и эксперимента (—)

Исследование влияния плотности мощности ЛИ на уровень и глубину ОН. Результаты исследования при плотностях мощности ЛИ $0,33 I/I_{\max}$, $0,66 I/I_{\max}$ и $1,00 I/I_{\max}$, соответствовавших пиковым значениям давления ЛИ 5,27; 7,46 и 9,14 ГПа, приведены на рис. 5. Здесь I и $I_{\max}$ — плотность мощности ЛИ и ее максимальное значение. Схема ЛУО состояла из серии последовательных ударов по четырем квадратам со стороной длиной $a = 1$ мм без перекрытия лазерных пятен.

При плотности мощности ЛИ с давлением $p = 9,14$ и $5,27$ ГПа ОН сжатия составляют $-1,0$ отн. ед. Максимальная глубина ОН сжатия $0,62$ мм достигается при плотности давления ЛИ $p = 5,27$ ГПа.

Исследование влияния числа проходов лазера на уровень и глубину ОН. Число проходов ограничивали до двух, так как при высокой плотности мощности ЛИ ($0,83 \dots 1,00$) $I/I_{\max}$ после второго прохода лазера повреждается защитный слой, что приводит к прижогу поверхностного слоя. Плотность мощности ЛИ составляла $0,33 I/I_{\max}$.

Увеличение числа проходов вызывает повышение ОН сжатия до $-0,42$ отн. ед., а глубина остается неизменной до $0,62$ мм (рис. 6). Кривая

ОН сжатия после второго прохода практически совпадает с таковой после первого прохода, а уровень ОН сжатия ниже на $-0,1 \dots -0,04$ отн. ед.

Исследование влияния двухсторонней обработки пластины на уровень и глубину ОН. Применение ЛУО с обеих сторон пластины вызывает уменьшение профилей ОН сжатия и способствует нивелированию околонулевых ОН сжатия на противоположной стороне.

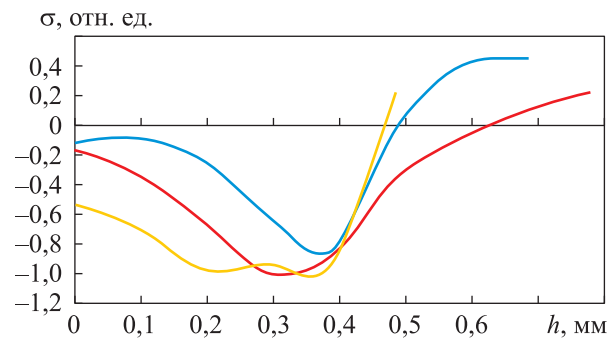


Рис. 5. Распределения ОН σ по глубине h в поверхностном слое пластины при давлении ЛИ $p = 5,27$ (—), $7,46$ (—) и $9,14$ ГПа (—)

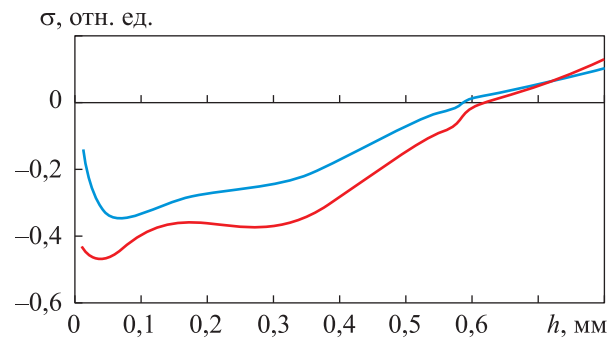


Рис. 6. Распределения ОН σ по глубине h в поверхностном слое пластины после первого (—) и второго (—) проходов лазера

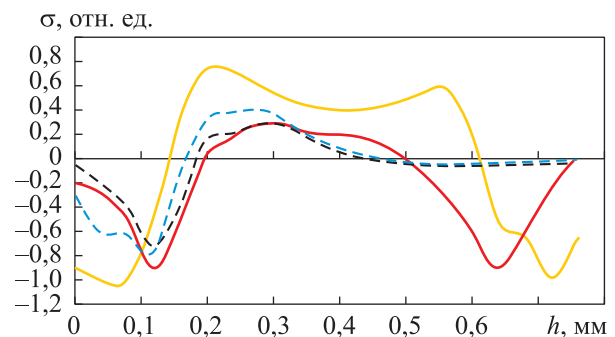


Рис. 7. Распределения ОН σ по глубине h в обработанных зонах после первого прохода лазера: — и — — в зоне стыка лазерных пятен (в т. О) при одно- и двухсторонней ЛУО; — и — — в центре лазерного пятна (в т. С) при одно- и двухсторонней ЛУО

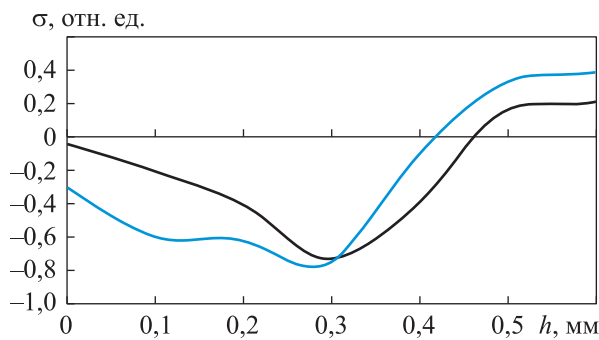


Рис. 8. Распределения ОН σ по глубине h в обработанных зонах после первого прохода лазера с плотностью мощности ЛИ $0,33 I/I_{\max}$:
— в зоне стыка лазерных пятен (в т. О);
— в центре лазерного пятна (в т. С)

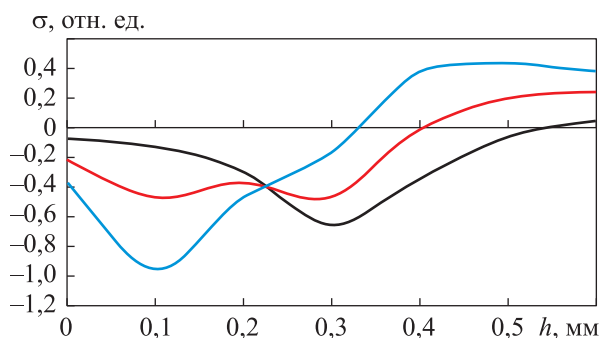


Рис. 9. Распределения ОН σ по глубине h в обработанных зонах после первого прохода лазера с плотностью мощности ЛИ $0,66 I/I_{\max}$:
— в центре пластины (в т. О);
— в центре лазерного пятна (в т. С);
— в гребне между лазерными пятнами (в т. С и D)

Однако двухсторонняя обработка без перекрытия лазерных пятен приводит к высоким ОН растяжения (до 0,78 отн. ед.) в зоне стыка пятен (рис. 7). Для уменьшения ОН растяжения следует проводить ЛУО с 50%-ным перекрытием лазерных пятен.

Исследование влияния перекрытия лазерных пятен на уровень и глубину ОН. Применение ЛУО без перекрытия лазерных пятен приводит к неоднородному распределению ОН сжатия по глубине в зависимости от зоны обработанной поверхности, причем это проявляется при увеличении плотности мощности ЛИ (рис. 8 и 9). Так, зоны стыка лазерных пятен обладают минимальными ОН сжатия. Для достижения равномерного распределения ОН по глубине следует проводить ЛУО с 50%-ным перекрытием лазерных пятен.

Исследование влияния снижения/увеличения плотности мощности ЛИ на уровень и глубину ОН при втором проходе лазера. Снижение плотности мощности ЛИ (давления ЛИ)

в 2 раза при втором проходе приводит к уменьшению глубины ОН сжатия до 0,42 мм (рис. 10). В то же время при аналогичной плотности мощности ЛИ глубина ОН сжатия составляет 0,60 мм. Поэтому ЛУО следует проводить с одинаковыми параметрами при нескольких проходах.

Исследование влияния размера лазерного пятна на уровень и глубину ОН. Результаты этого исследования при размере лазерного пятна $d = 1 \dots 3$ мм показаны на рис. 11. Видно, что увеличение размера лазерного пятна от 1 до 3 мм при одном и том же давлении ЛИ (5,27 ГПа) вызывает возрастание уровня ОН сжатия от $-0,3$ до $-1,1$ отн. ед. Глубина ОН сжатия остается неизменной и равной 0,60 мм, максимум ОН сжатия смещается на глубину $h = 0,30$ мм.

Установлено, что варьирование параметров ЛИ приводит к изменению геометрических параметров поверхностного слоя пластины от 1 до 5 мкм. ЛУО целесообразно проводить перед полированием, а изменение геометрических параметров заложить в допуск на полировку поверхности.

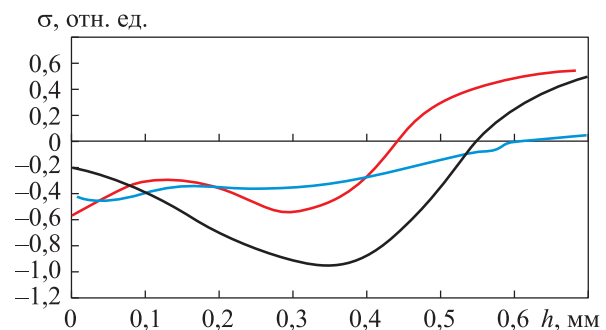


Рис. 10. Распределения ОН σ по глубине h в обработанной зоне после второго прохода при давлении ЛИ $p = 5,27$ (—), $7,46$ (—) и $9,14$ ГПа (—)

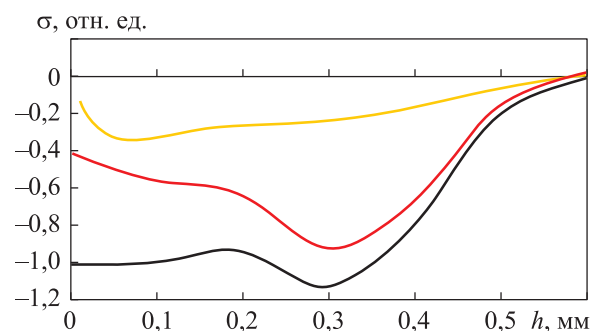


Рис. 11. Распределения ОН σ по глубине h в поверхностном слое при размере лазерного пятна $d = 1$ (—), 2 (—) и 3 мм (—)

Выводы

1. Проведено моделирование процесса ЛУО пластины из титанового сплава в условиях, приближенных к реальным режимам обработки. Решена механическая задача по распространению упругопластических волн в материале с применением модели Джонсона — Кука для сплава ВТ6.

2. На основе экспериментальных данных выполнена верификация математической модели. Показано, что модель предсказывает завышенные значения ОН в подповерхностной зоне, что может быть связано с принятыми при моделировании упрощениями.

3. Изменение длительности импульса до 40 нс при одном проходе лазера не вызывает существенных изменений глубины ОН сжатия.

4. Применение ЛУО без перекрытия лазерных пятен приводит к неоднородному распределению ОН сжатия по глубине в зависимости от зоны обработанной поверхности, причем это проявляется при увеличении плотности мощности ЛИ. Так, зоны стыка лазерных пятен обладают минимальными ОН сжатия. Для дости-

жения равномерного распределения ОН по глубине следует проводить ЛУО с 50%-ным перекрытием лазерных пятен.

5. Увеличение числа проходов лазера позволяет снизить ОН сжатия на обработанной поверхности и увеличить их глубину, но повышает ОН растяжения в объеме образца.

6. Применение ЛУО с обеих сторон пластины дает возможность уменьшить профили ОН сжатия и способствует нивелированию околонулевых ОН сжатия на противоположной стороне. В то же время двухсторонняя обработка приводит к высоким ОН растяжения в зоне стыка лазерных пятен (до 0,82 отн. ед.).

7. Второй проход следует выполнять с теми же параметрами ЛИ, что и первый, так как это повышает глубину ОН сжатия.

8. Увеличение размера лазерного пятна от 1 до 3 мм при одном и том же давлении приводит к возрастанию уровня ОН сжатия от –0,3 до –1,1 отн. ед. Глубина ОН сжатия при этом остается неизменной (0,6 мм).

9. Варьирование параметров ЛИ приводит к изменению геометрических параметров поверхностного слоя пластины на 1...5 мкм.

Литература

- [1] Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. *Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок*. Т. 2. Москва, Машиностроение, 2008. 368 с.
- [2] Новиков И.А., Ножницкий Ю.А., Шибаев С.А. Мировой опыт в исследовании и применении технологического процесса лазерной ударной обработки металлов (обзор). *Авиационные двигатели*, 2022, № 2, с. 59–82, doi: https://doi.org/10.54349/26586061_2022_1_59
- [3] Ширяев А.А., Габов И.Г., Миленин А.С. и др. Сравнение методов упрочнения на предел выносливости лопаток из титанового сплава. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2023, № 4, с. 109–117.
- [4] Ширяев А.А., Габов И.Г., Попова Ю.В. Влияние LSPwC на параметры поверхностного слоя лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 3, с. 32–41. EDN: JEEASU
- [5] Sundar R., Ganesh P., Gupta R.K. et al. Laser shock peening and its applications: a review. *Lasers Manuf. Mater. Process.*, 2019, no. 6, no. 7, pp. 424–463, doi: <https://doi.org/10.1007/s40516-019-00098-8>
- [6] Зо Й.М. *Ударная обработка цветных металлов и сплавов маломощными лазерными источниками*. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Баумана, 2020. 18 с.
- [7] Ляховецкий М.А., Королев Д.Д., Кожевников Г.Д. и др. Лазерное ударное упрочнение титанового сплава ВТ6 с алюминиевым абляционным покрытием. В: *Быстрозакаленные материалы и покрытия*. Москва, Пробел-2000, 2021, с. 258–263.
- [8] Sakhvadze G.Zh., Gavrilina L.V. Single and multiple laser shock processing of materials. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2015, vol. 44, no. 6, pp. 549–554, doi: <https://doi.org/10.3103/S105261881506014X>
- [9] Zhang Z., Liu M., Cao Z. et al. Numerical investigation of surface textural dimples of titanium alloy subjected to laser shock processing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2022, no. 122, no. 3–4, pp. 1413–1429, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09947-x>

- [10] Liu G., Yang S., Wang Y. et al. Parameter optimisation analysis of laser shock processing based on Ansys LS-Dyna. *Emerg. Mater. Res.*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 132–138, doi: <https://doi.org/10.1680/jemmr.15.00077>
- [11] Zhang X., Li H., Duan S. et al. Modeling of residual stress field induced in Ti–6Al–4V alloy plate by two sided laser shock processing. *Surf. Coat. Technol.*, 2015, vol. 280, pp. 163–173, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.09.004>
- [12] Kumar G.R., Rajyalakshmi G. FE simulation for stress distribution and surface deformation in Ti-6Al-4V induced by interaction of multi scale laser shock peening parameters. *Optik*, 2020, vol. 206, art. 164280, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164280>
- [13] Wang C., Li K., Hu X. et al. Numerical study on laser shock peening of TC4 titanium alloy based on the plate and blade model. *Opt. Laser Technol.*, 2021, vol. 142, no. 23, 107163, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107163>
- [14] Плехов О.А., Костина А.А., Изюмов Р.И. и др. Конечно-элементный анализ остаточных напряжений, возникающих в результате лазерной ударной проковки титанового сплава ВТ6. *Вычислительная механика сплошных сред*, 2022, т. 15, № 2, с. 171–184, doi: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2022.15.2.13>
- [15] Cao Zw., Che Zg., Zou Sk. et al. Numerical simulation of residual stress field induced by laser shock processing with square spot. *J. Shanghai Univ.(Engl. Ed.)*, 2011, vol. 15, no. 6, pp. 553–556, doi: <https://doi.org/10.1007/s11741-011-0785-1>
- [16] Бузюкин А.Е., Гладкий И.Л., Краус Е.И. Определение параметров модели Джонсона-Кука для описания процессов деформирования и разрушения титановых сплавов. *Прикладная механика и техническая физика*, 2015, т. 56, № 2, с. 188–195, doi: <https://doi.org/10.15372/PMTF20150219>
- [17] Hammer J.T. *Plastic deformation and ductile fracture of Ti-6Al-4V under various loading conditions*. Master's thesis. Ohio State University, 2012. 243 p.
- [18] Kim R., Suh J., Shin D. et al. FE analysis of laser shock peening on STS304 and the effect of static damping on the solution. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 10, art. 1516, doi: <https://doi.org/10.3390/met11101516>

References

- [1] Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok*. T. 2 [Fundamentals of aircraft engine and power plant design. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 368 p. (In Russ.).
- [2] Novikov I.A., Nozhnitskiy Yu.A., Shibaev S.A. International experience in research and application of the technological process of laser shockpeening of metals (review). *Aviatsionnye dvigateli* [Aviation Engines], 2022, no. 2, pp. 59–82, doi: https://doi.org/10.54349/26586061_2022_1_59 (in Russ.).
- [3] Shiryayev A.A., Gabov I.G., Milenin A.S. et al. Comparison of hardening methods on blades of titanium alloy. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2023, no. 4, pp. 109–117. (In Russ.).
- [4] Shiryayev A.A., Gabov I.G., Popova Yu.V. LSPWC influence on the surface layer parameters of the titanium alloy GTE compressor blades. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2024, no. 3, pp. 32–41. EDN: JEEASU (In Russ.).
- [5] Sundar R., Ganesh P., Gupta R.K. et al. Laser shock peening and its applications: a review. *Lasers Manuf. Mater. Process.*, 2019, no. 6, no. 7, pp. 424–463, doi: <https://doi.org/10.1007/s40516-019-00098-8>
- [6] Zo Y.M. *Udarnaya obrabotka tsvetnykh metallov i spлавov malomoshchnymi lazernymi istochnikami*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Shock treatment of non-ferrous metals and alloys by low-power laser sources. Abs. kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020. 18 p. (In Russ.).
- [7] Lyakhovetskiy M.A., Korolev D.D., Kozhevnikov G.D. et al. Lazernoe udarnoe uprochnenie titanovogo сплава VT6 s alyuminiyevym ablyatsionnym pokrytiem [Laser shock hardening of titanium alloy BT6 with aluminium ablative coating]. V: *Bystrozakalennyye materialy i pokrytiya* [In: Rapidly hardened materials and coatings]. Moscow, Probel-2000 Publ., 2021, pp. 258–263. (In Russ.).

- [8] Sakhvadze G.Zh., Gavrilina L.V. Single and multiple laser shock processing of materials. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2015, vol. 44, no. 6, pp. 549–554, doi: <https://doi.org/10.3103/S105261881506014X>
- [9] Zhang Z., Liu M., Cao Z. et al. Numerical investigation of surface textural dimples of titanium alloy subjected to laser shock processing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2022, no. 122, no. 3–4, pp. 1413–1429, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09947-x>
- [10] Liu G., Yang S., Wang Y. et al. Parameter optimisation analysis of laser shock processing based on Ansys LS-Dyna. *Emerg. Mater. Res.*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 132–138, doi: <https://doi.org/10.1680/jemmr.15.00077>
- [11] Zhang X., Li H., Duan S. et al. Modeling of residual stress field induced in Ti–6Al–4V alloy plate by two sided laser shock processing. *Surf. Coat. Technol.*, 2015, vol. 280, pp. 163–173, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.09.004>
- [12] Kumar G.R., Rajyalakshmi G. FE simulation for stress distribution and surface deformation in Ti-6Al-4V induced by interaction of multi scale laser shock peening parameters. *Optik*, 2020, vol. 206, art. 164280, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164280>
- [13] Wang S., Li K., Hu X. et al. Numerical study on laser shock peening of TC4 titanium alloy based on the plate and blade model. *Opt. Laser Technol.*, 2021, vol. 142, no. 23, 107163, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107163>
- [14] Plekhov O.A., Kostina A.A., Izyumov R.I. et al. Finite-element analysis of residual stresses in the TC4 titanium alloy treated by laser shock peening. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational Continuum Mechanics], 2022, vol. 15, no. 2, pp. 171–184, doi: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2022.15.2.13> (in Russ.).
- [15] Cao Zw., Che Zg., Zou Sk. et al. Numerical simulation of residual stress field induced by laser shock processing with square spot. *J. Shanghai Univ. (Engl. Ed.)*, 2011, vol. 15, no. 6, pp. 553–556, doi: <https://doi.org/10.1007/s11741-011-0785-1>
- [16] Buzyukin A.E., Gladkiy I.L., Kraus E.I. Determination of parameters of the Johnson-Cook model for the description of deformation and fracture of titanium alloys. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2015, vol. 56, no. 2, pp. 188–195, doi: <https://doi.org/10.15372/PMTF20150219> (in Russ.). (Eng. version: *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2015, vol. 56, no. 2, pp. 330–336, doi: <https://doi.org/10.1134/S0021894415020194>)
- [17] Hammer J.T. Plastic deformation and ductile fracture of Ti-6Al-4V under various loading conditions. Master's thesis. Ohio State University, 2012. 243 p.
- [18] Kim R., Suh J., Shin D. et al. FE analysis of laser shock peening on STS304 and the effect of static damping on the solution. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 10, art. 1516, doi: <https://doi.org/10.3390/met11101516>

Статья поступила в редакцию 16.07.2024

Информация об авторах

ШИРЯЕВ Алексей Александрович — инженер КО-2993. АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 93, e-mail: shiryaev-aal@avid.ru).

КАРМАНОВ Вадим Владимирович — заведующий кафедрой «Инновационные технологии машиностроения». ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: karmanovs@yandex.ru).

Information about the authors

SHIRYAEV Aleksey Aleksandrovich — Engineer, Department КО-2993. JSC UEC-Aviadvisgatel (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 93, e-mail: shiryaev-aal@avid.ru).

KARMANOV Vadim Vladimirovich — Head of the Department of Innovative Mechanical Engineering Technologies. Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 29, e-mail: karmanovs@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ширяев А.А., Карманов В.В. Анализ зависимости уровня и глубины остаточных напряжений от параметров лазерного излучения при моделировании лазерной ударной обработки плоских образцов из титанового сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 4, с. 32–40.

Please cite this article in English as:

Shiryaev A.A., Karmanov V.V. Analysis of the residual stress level and depth dependences originating from the laser radiation parameters in simulating the laser impact machining of flat samples made of the titanium alloy. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 4, pp. 32–40.