

УДК 621.787, 539.372

## Влияние параметров лазерной ударной обработки на распределение остаточных напряжений в кромке лопатки компрессора из титанового сплава

А.А. Ширяев<sup>1,2</sup>, В.В. Карманов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «ОДК-Авиадвигатель»

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

## Influence of the laser shock machining parameters on the residual stresses distribution in the edge of a titanium alloy compressor blade

A.A. Shiryayev<sup>1,2</sup>, V.V. Karmanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UEC-Aviadvigatel JSC

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University

Исследовано влияние параметров лазерного излучения на распределение остаточных напряжений в кромке лопатки компрессора из титанового сплава при математическом моделировании лазерной ударной обработки. Обработка выполнена лазерным лучом квадратной формы со стороной размером 1...3 мм без перекрытия пятен в один проход. Исследование включало в себя два этапа: моделирование распространения упругопластических волн на основе определяющего соотношения Джонсона — Кука и статический расчет распределения остаточных напряжений в кромке лопатки. Влияния параметров на распределение остаточных напряжений по радиусу кромки не обнаружено. Использование различных стратегий обработки при квадратном пятне со стороной размером 1 мм не вызвало значимого изменения распределения остаточных напряжений по сечению кромки. При размере стороны лазерного пятна 2 мм вторая стратегия обработки привела к возникновению больших остаточных напряжений сжатия, а третья — к появлению остаточных напряжений растяжения. Смещение зоны лазерной ударной обработки на 0,5 мм от радиуса кромки лопатки при длине квадратного пятна 1 мм не выявило преимуществ перед стандартной схемой обработки. Уровень остаточных напряжений сжатия при стандартной схеме обработки оказался выше, чем при схеме со смещением зоны обработки. Лазерная ударная обработка приводит к наведению остаточных напряжений сжатия как в поверхностном слое (до -0,24 отн. ед.), так и на глубину до 0,4 мм с обеих сторон кромки даже на расстоянии 1 мм вне зоны обработки. Увеличение энергии импульса повышает уровень остаточных напряжений сжатия, глубина которых при этом остается неизменной. При длине квадратного пятна 1...2 мм глубина остаточных напряжений сжатия превышает середину кромки по всей длине, при длине 3 мм — только на длине 0,2...1,0 мм от радиуса кромки. Для равномерного распределения остаточных напряжений по сечению кромки необходимо проводить лазерную ударную обработку лопатки с обеих сторон. Чтобы снизить время проведения такой обработки, необходимо применять квадратное пятно со стороной длиной 3 мм и энергией 5...8 Дж.

EDN: IKHWDF, <https://elibrary/ikhwdf>

**Ключевые слова:** лазерная ударная обработка, титановые сплавы, остаточные напряжения, моделирование кромки лопатки, параметры обработки

The paper analyzes the laser radiation parameters influence on distribution of the residual stresses in a mathematical simulation of the laser shock machining of part of the edge of a compressor blade made of titanium alloy. A square laser beam with the side size of 1...3 mm was used in the machining without overlapping in one pass. Simulation included two stages: simulation of the elastic-plastic wave propagation based on the Johnson-Cook constitutive relation, and static computation of the residual stresses distribution. No influence of the parameters on the residual stresses distribution by the edge radius was found. Using the different machining strategies for a square spot with the side size of 1 mm caused no significant alteration in the residual stresses distribution over the edge cross-section. With the side size of 2 mm, the second machining strategy led to the large compressive residual stresses, and the third one led to the tensile residual stresses. Displacement of the laser shock machining zone by 0.5 mm from the edge radius with a square spot having a side of 1 mm revealed no advantages compared to the standard machining scheme. The compressive residual stresses level with the standard machining scheme turned out to be higher than with the scheme characterized by the machining zone displacement. Laser shock machining leads to the compressive residual stresses induction both in the surface layer of up to  $-0.24$  rel. units and to the depth of down to 0.4 mm on both the edge sides even at the distance of 1 mm outside the machining zone. An increase in the pulse energy increases the compressive residual stresses level, which depth remains unchanged. With square spots with the sides of 1...2 mm, the compressive residual stresses depth exceeds the edge middle along the entire length, with the side of 3 mm — only along the length of 0.2...1.0 mm from the edge radius. To evenly distribute residual stresses over the edge cross-section, it is required to perform the blade laser shock machining on both sides. To reduce the time of such machining, a square spot should be used with a side size of 3 mm and power of 5...8 J.

EDN: IKHWDF, <https://elibrary/ikhwdf>

**Keywords:** laser shock machining, titanium alloys, residual stresses, blade edge simulation, machining parameters

Элементами авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), в значительной мере определяющими их эксплуатационные характеристики, являются рабочие лопатки и роторные детали. Рабочие лопатки 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 рабочих 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 нелинейно распределяются по длине тракта (ступеням). Эти повреждения приводят к преждевременному срыву ГТД с эксплуатации и требуют проведения ремонтов/зачисток повреждений на лопатках. Так как зачистку лопаток выполняют только на базовых аэродромах, эксплуатация ГТД становится дорожной.

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 по глубине распространения  $h$  (далее глубина) остаточных напряжений (ОН) ( $h > 0,3$  мм) ЛУО превосходит серийно применяемые методы упрочнения.

Для подбора параметров лазерного излучения при ЛУО различных материалов широко выполняют численное моделирование, используя такие программные пакеты, как Abaqus, ANSYS LS-DYNA и COMSOL Multiphysics.

Работы по моделированию процесса ЛУО можно подразделить на три группы:

- моделирование единичного удара [5–10];
- многократная обработка плоских образцов [11, 12];
- обработка модели лопатки [10, 11].

**Моделирование единичного удара.** В работе [5] исследовано влияние числа ударов лазера с пятном квадратной формы со стороной длиной 4 мм на уровень и глубину ОН для стали 35CD4. Также проанализирована зависимость уровня ОН в лазерном пятне (далее пятно) от времени явного анализа, однако не приведены данные

по демпфированию материала при гашении ударных волн.

Изучено влияние времени импульса, плотности мощности излучения на глубину и уровень ОН в образце из сплава ВТ6 толщиной 3 мм [6]. Показано, что увеличение времени импульса с 15 до 20 нс приводит к возрастанию ОН сжатия до  $-700$  МПа.

Исследовано влияние числа ударов, плотности мощности излучения и формы пятна лазера на распределение ОН в пятне и глубину ОН [7]. Установлено, что квадратное пятно обеспечивает более однородное распределение ОН, чем пятно другой формы.

Выполнен анализ влияния параметров излучения на уровень ОН из сплава X12Cr [8]. Определено, что плотность мощности излучения является наиболее значимым параметром, за ней в порядке убывания влияния следуют время воздействия, размер пятна, перекрытие и угол наклона лазера.

Проведено моделирование единичного лазерного удара с пятном круглой формы для титанового сплава ВТ6/Ti-6Al-4V [9, 10]. Установлено, 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 работе [10] показаны профили поверхностного слоя после многократной обработки при различных профилях давления излучения в зависимости от времени.

*Многократная обработка плоских образцов.* В работе [11] приведены результаты обработки плоского образца из сплава Al 2024-T3 квадратным пятном со стороной длиной 2,5 мм и 50%-ным перекрытием пятен. Для моделирования область лазерной обработки разделяли на десять слоев, для каждого из которых задавали коэффициенты линейного температурного расширения. Полученные данные сравнивали с экспериментальными.

Исследовано влияние параметров ЛУО в квадратной пластине толщиной 3 мм из титанового сплава ВТ6В на уровень возникающих ОН [12]. Моделирование проведено при одно- и двухсторонней обработке пятна квадратной формы со стороной длиной 3 мм.

*Обработка модели лопатки.* В работе [13] приведены результаты моделирования одно- и двухсторонней ЛУО лопатки компрессора из ТС4. Показано, что увеличение диаметра пятна (до 5 мм) вызывает повышение уровня ОН

сжатия до  $-346$  мм, а их распределение по глубине остается неизменным (до 0,65 мм). Увеличение длительности лазерного импульса приводит к возрастанию уровня и глубины (до 1 мм) ОН сжатия. При диаметре пятна 3 мм, длительности импульса 20 нс, коэффициенте перекрытия пятен 30 % и энергии лазера 2, 3 и 5 Дж получены ОН сжатия до  $-450$  МПа [14]. Деформация кромки лопатки составила около 4 мкм.

В статье [15] предложено использовать нейросеть для прогнозирования уровня и глубины ОН вместо моделирования методом конечных элементов процесса ЛУО. В качестве экспериментального материала выступал титановый сплав ТС4.

Разработка модели ЛУО кромки лопатки позволит выполнить подбор режимов упрочнения, обеспечивающих заданный уровень ОН сжатия по сечению кромки лопатки компрессора ГТД. Внедрение ЛУО увеличит усталостный ресурс детали, в том числе стойкости к повреждениям при попадании посторонних предметов в проточную часть ГТД.

Цель работы — оценка влияния стратегии обхода траектории ЛУО, а также размера пятна на уровень и глубину ОН при односторонней обработке кромки лопатки.

**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 определяли как

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

где  $A$  — квазистатический предел текучести;  $B$  — коэффициент упрочнения;  $\epsilon_{eq}^{pl}$  — 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.

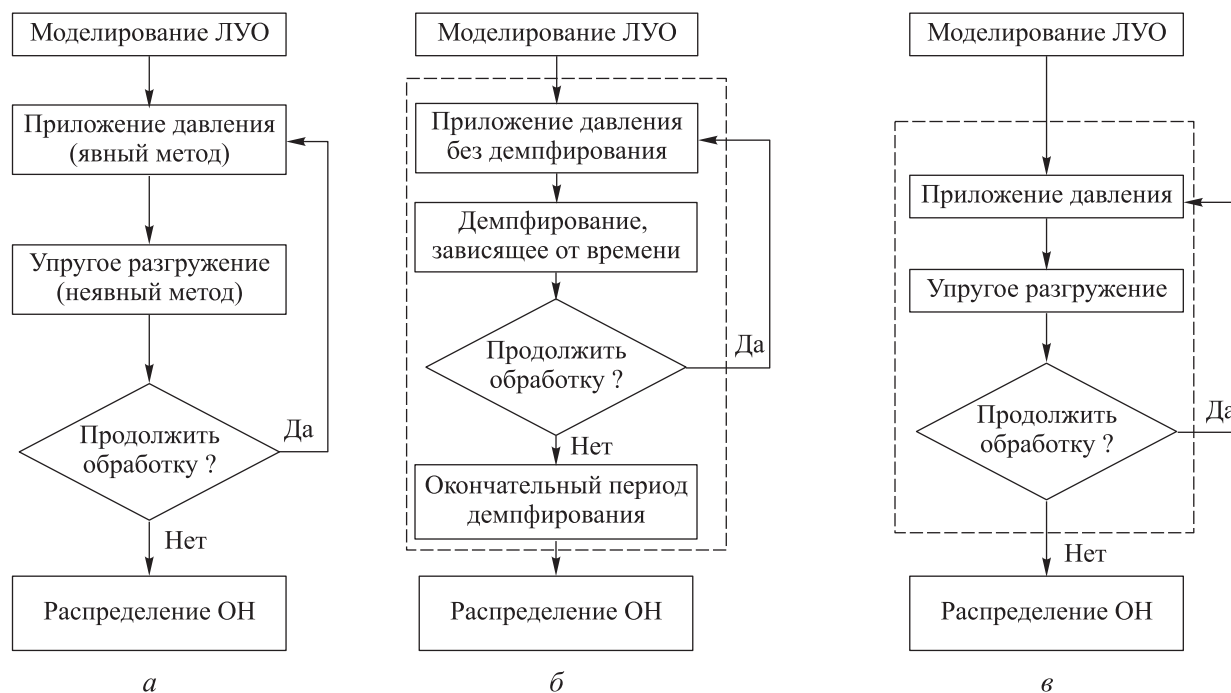


Рис. 1. Типовые блок-схемы моделирования ЛУО:

*a* — явный и неявный анализ; *б* — одиночный явный анализ с демпфированием по времени; *в* — явный метод статического демпфирования

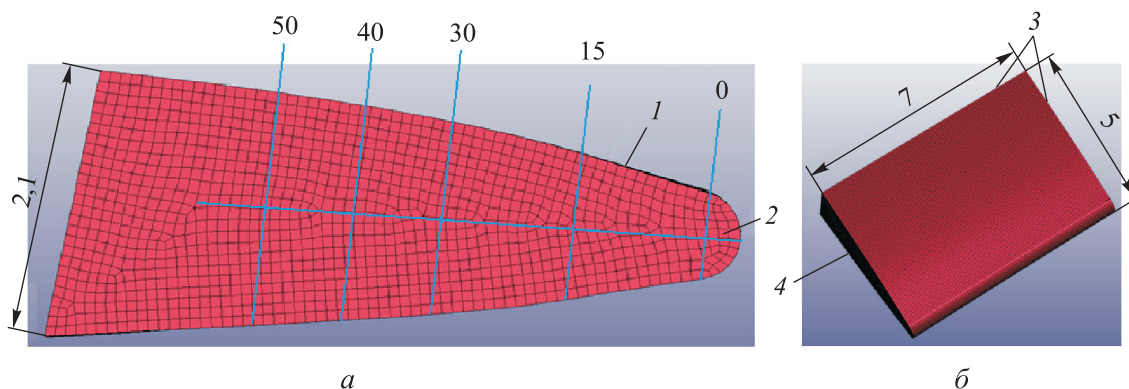


Рис. 2. Модели кромки (а) и ее габаритных размеров с граничными условиями (б):

1 — зона обработки; 2 — середина кромки; 3 и 4 — запрет отражений и перемещений

Упругий материал, принятый изотропным, описывали законом Гука с двумя параметрами: модулем упругости и коэффициентом Пуассона.

Модель Джонсона — Кука для титанового сплава BT6 имела следующие параметры [16, 17]: плотность  $\rho = 4424 \text{ кг/м}^3$ ; модуль упругости  $E = 106,7 \text{ ГПа}$ ; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,314$ ; квазистатический предел текучести  $A = 900 \text{ МПа}$ ; коэффициент упрочнения  $B = 509,75 \text{ МПа}$ ; показатель деформационного упрочнения  $n = 0,506$ ; параметр, определяющий скоростную чувствительность  $C = 0,014$  [13]; контрольная скорость деформации  $\dot{\epsilon}_0 = 0,001 \text{ с}^{-1}$ .

Моделирование ЛУО включало 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 [18].

**Анализ ОН, возникающих в результате ЛУО, при различных параметрах излучения.** Для исследования влияния режимов ЛУО на распределение ОН проводили моделирование кромки лопатки компрессора из титанового сплава. Геометрические размеры кромки лопатки и граничные условия указаны на рис. 2, *a* и *б*, где 15, 30, 40 и 50 — расстояния от зоны

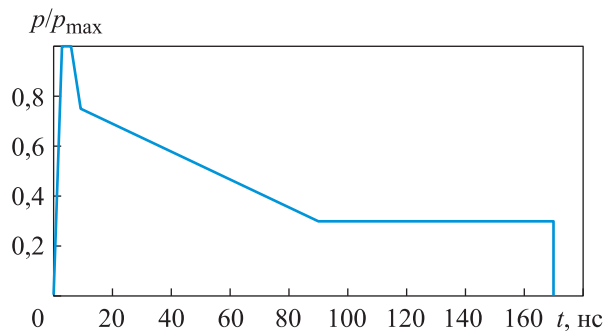


Рис. 3. Влияние длительности лазерного импульса  $t$  на профиль давления излучения

ЛУО до точки начала обработки. ЛУО выполняли на верхней грани кромки, не включая радиус последней. Точка начала ЛУО обозначена нулем.

ЛУО проводили при различных стратегиях обработки, плотности мощности излучения и длине стороны пятна. В качестве формы пятна выбрали квадрат, так как распределение энергии в зоне воздействия излучения близко к однородному. Влияние длительности лазерного импульса  $t$  на профиль давления излучения показано на рис. 3, где  $p$  и  $p_{\max}$  — давление излучения и его максимальное значение.

ЛУО выполняли за один проход без перекрытия пятен, что обеспечивало наименьшее время обработки. Для дискретизации расчетной области использовали восьмиузловые конечные элементы, размер стороны которых составлял 0,1 мм.

Ранее модель материала верифицировали на плоских образцах, результаты моделирования оказались в разумном согласии с экспериментальными данными.

Оценивали влияние плотности мощности излучения, длины квадратного пятна и стратегии обработки на распределение ОН по сечению кромки лопатки, а также определяли параметры ЛУО, обеспечивающие уровень ОН

сжатия более  $-200$  МПа, для их переноса в дальнейшем на полноценную модель кромки лопатки.

Рассматривали влияние параметров ЛУО на распределение уровня ОН по радиусу кромки лопатки, ее обрабатываемой и обратной сторонам и нескольким сечениям.

*Исследование влияния параметров ЛУО на распределение уровня ОН по радиусу кромки лопатки.* По результатам этого исследования установлено, что распределение ОН по радиусу кромки лопатки не зависит от параметров ЛУО, ОН оказались близкими к нулю.

*Исследование влияния стратегии ЛУО на уровень и глубину ОН.* Моделирование проводили при длине пятна  $a = 1$  и  $2$  мм и плотности мощности излучения  $0,5I/I_{\max}$  (рис. 4), где  $I$  и  $I_{\max}$  — текущее и максимальное значение плотности мощности излучения. При  $a = 3$  мм обработку выполняли в одну линию.

Результаты моделирования для стратегии v1 при длине квадратного пятна  $a = 1$  мм приведены на рис. 5. Остальные стратегии ЛУО (см. рис. 4) не привели к существенному изменению распределения ОН по кромке лопатки.

Следует отметить, что такая обработка приводит к наведению ОН сжатия на глубину до 0,9 мм, при этом на обратной стороне кромки лопатки обеспечиваются околонулевые ОН.

Анализ распределения ОН в середине кромки лопатки (рис. 6, а) показал, что использование стратегий v2 и v3 приводит к появлению ОН растяжения до 0,18 отн. ед. в радиусе кромки лопатки. При всех стратегиях обработки ОН сжатия распространялись на глубину более 3 мм вдоль середины кромки лопатки. Уровень ОН составлял  $-0,48... -0,12$  отн. ед.

Анализ распределения ОН в сечении на расстоянии 15 мм от точки начала обработки кромки лопатки (рис. 6, б) выявил, что при стратегии

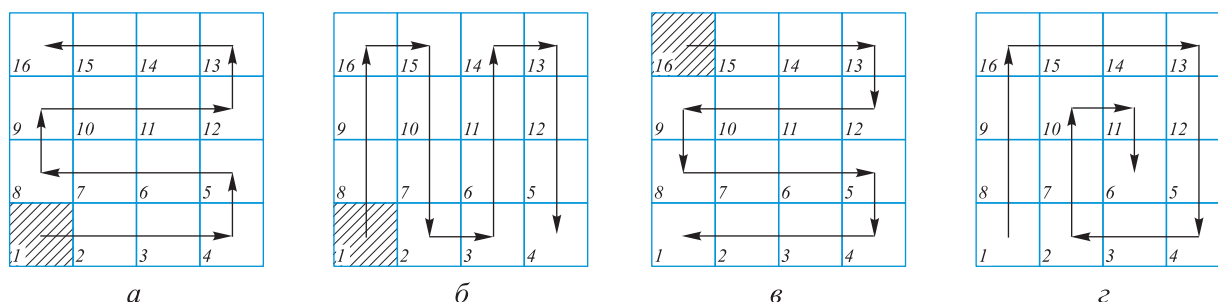


Рис. 4. Схемы формирования стратегий ЛУО v1 (а), v2 (б), v3 (в) и v4 (г) при длине квадратного пятна  $a = 1$  мм

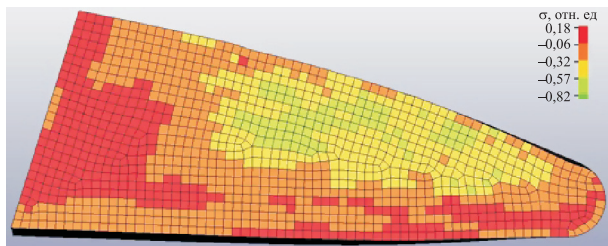


Рис. 5. Распределение ОН  $\sigma$ , отн. ед., в кромке лопатки после ЛУО по стратегии v1 при длине квадратного пятна  $a = 1$  мм и плотности мощности излучения  $0,5I_{\max}$

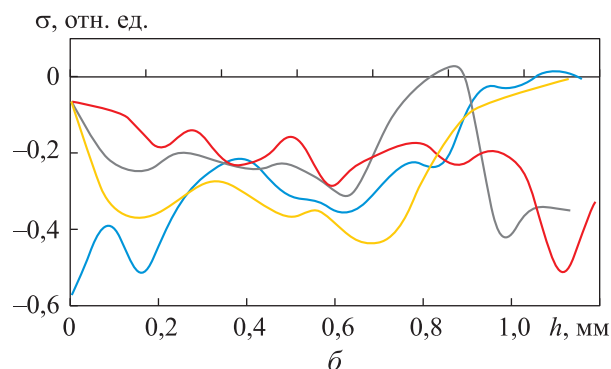
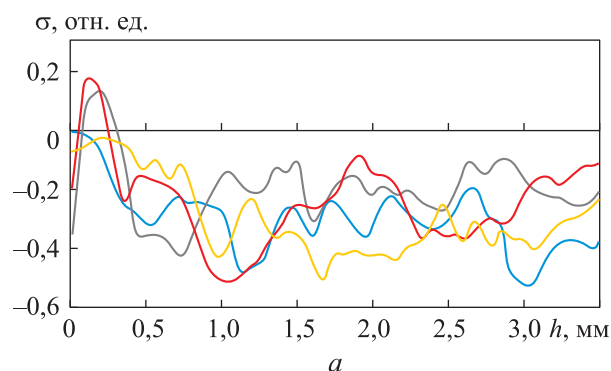


Рис. 6. Распределения ОН  $\sigma$  по глубине  $h$  в середине кромки лопатки (а) и сечении на расстоянии 15 мм от точки начала ЛУО (б) по стратегиям v1 (—), v2 (—), v3 (—) и v4 (—)

v1 ОН сжатия больше (до  $-0,56$  отн. ед.), чем при других стратегиях. На глубине  $h = 0,38$  мм уровень ОН при всех стратегиях ЛУО примерно одинаковый ( $-0,26 \dots -0,20$  отн. ед.).

На основании полученных результатов в качестве стратегии ЛУО с квадратным пятном длиной  $a = 1$  мм выбран вариант v1.

Распределения ОН в кромке лопатки после ЛУО по стратегиям v5–v7 (рис. 7), при плотности мощности излучения  $0,5I_{\max}$  и длине квадратного пятна  $a = 2$  мм показаны на рис. 8 и 9.

Стратегия ЛУО v7 приводит к наведению ОН в диапазоне  $-0,30 \dots -0,01$  отн. ед. На обработанной поверхности ОН сжатия переходят в

околонулевые уже на расстоянии 2 мм от точки начала обработки и продолжаются до 3,2 мм.

В сечениях кромки лопатки на расстоянии 15 и 30 мм от точки начала обработки (рис. 9, а и б) распределения ОН при всех стратегиях, начиная с глубины  $h = 0,6$  мм, различаются не более чем на  $-0,02$  отн. ед.

В результате сравнения стратегий выбран вариант v6, обеспечивающий наибольшие ОН сжатия в поверхностном слое и в сечении 15 мм на расстоянии 15 и 30 мм от точки начала обработки (см. рис. 9, а).

Исследование влияния смещения зоны ЛУО на уровень и глубину ОН. Распределения ОН в

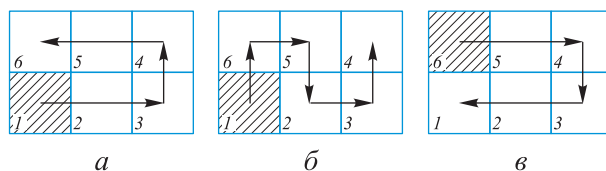
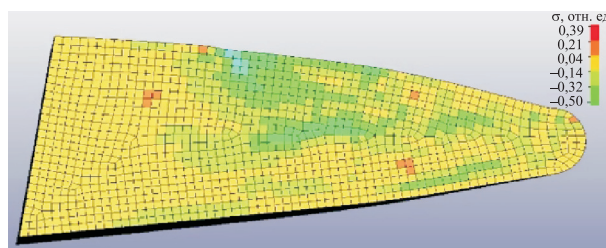
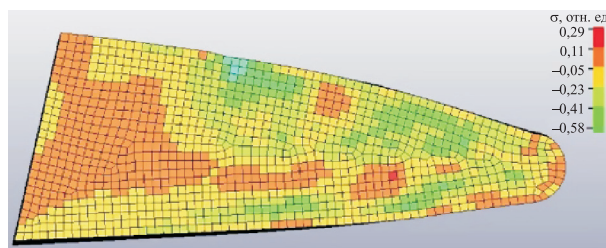


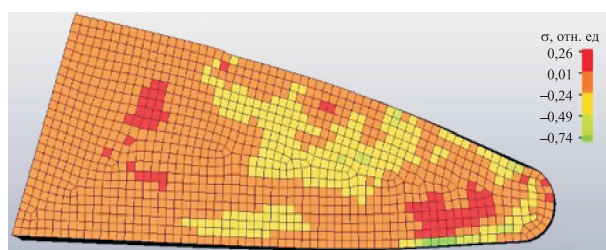
Рис. 7. Схемы формирования стратегий ЛУО v5 (а), v6 (б) и v7 (в) при длине квадратного пятна  $a = 2$  мм



а



б



в

Рис. 8. Распределения ОН в кромке лопатки после ЛУО по стратегиям v5 (а), v6 (б) и v7 (в) при плотности мощности излучения  $0,5I_{\max}$  и длине квадратного пятна  $a = 2$  мм

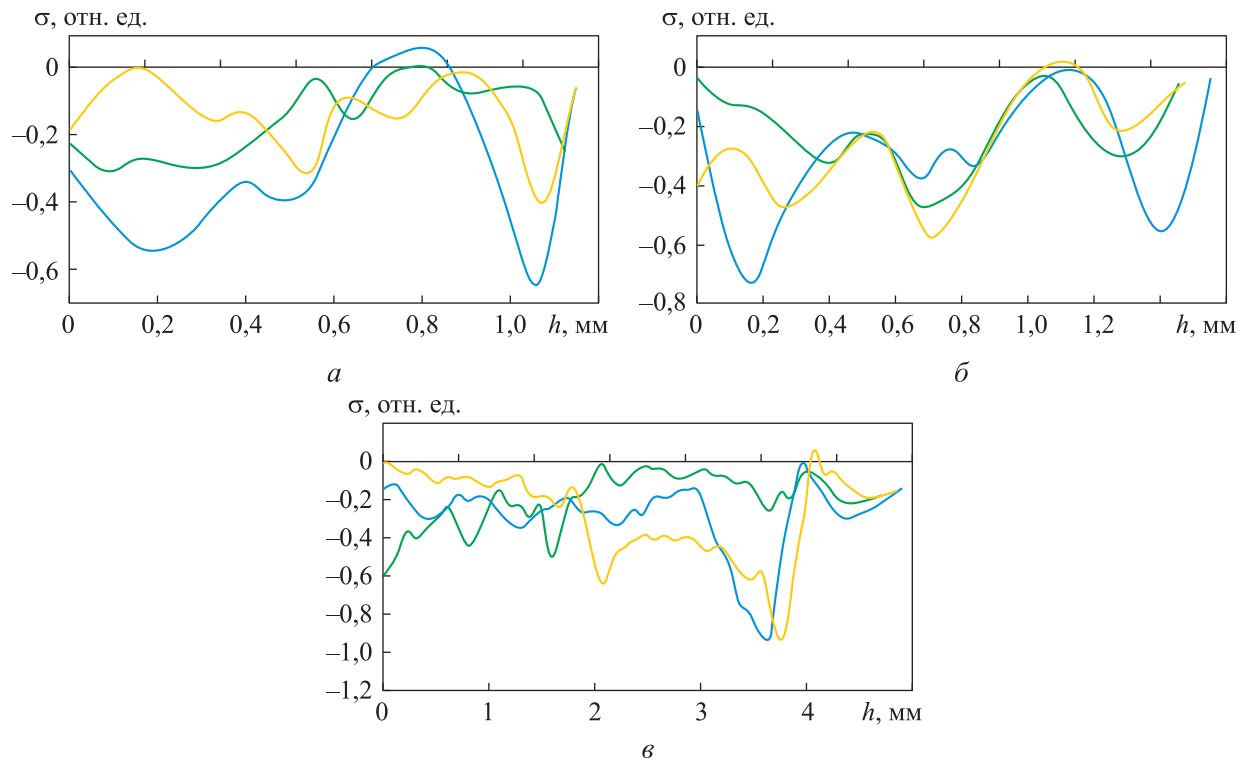


Рис. 9. Распределения ОН  $\sigma$  по глубине  $h$  после ЛУО по стратегиям v5 (—), v6 (—) и v7 (—) при плотности мощности излучения  $0,5I_{\max}$  и длине квадратного пятна  $a = 2$  мм в различных зонах кромки лопатки:  
а и б — в сечениях на расстоянии 15 и 30 мм от точки начала обработки; в — в обработанной поверхности

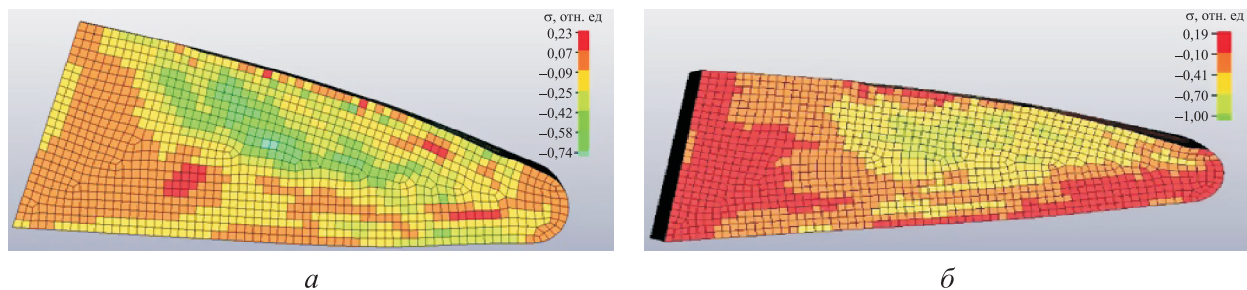


Рис. 10. Распределения ОН, отн. ед., в кромке лопатки после ЛУО со смещением зоны обработки на 0,5 мм от радиуса кромки лопатки при длине квадратного пятна  $a = 1$  мм и плотности мощности излучения  $0,5I_{\max}$  (а) и  $I_{\max}$  (б)

кромке лопатки после ЛУО со смещением зоны обработки на 0,5 мм от радиуса кромки лопатки при длине квадратного пятна  $a = 1$  мм и плотности мощности излучения  $0,5I_{\max}$  и  $I_{\max}$  показаны на рис. 10 и 11.

Анализ распределения ОН при плотностях мощности излучения  $0,5I_{\max}$  и  $I_{\max}$  и смещении зоны обработки на 0,5 мм от радиуса кромки лопатки к перу показал, что при стандартной схеме (без смещения) возникают большие ОН сжатия во всех измеряемых зонах. Увеличение плотности мощности излучения до  $I_{\max}$  в поверхностном слое может вызвать ОН растяжения до 0,12 отн. ед.

Исследование влияния длины квадратного пятна на уровень и глубину ОН в обработанной поверхности кромки лопатки. Распределения ОН в обработанной поверхности кромки лопатки после ЛУО при длине квадратного пятна  $a = 1, 2$  и 3 мм показаны на рис. 12, а–в.

Увеличение числа проходов приводит к росту уровня ОН сжатия до  $-0,36$  отн. ед., а глубина ОН остается неизменной. Кривая ОН после второго прохода лазера практически совпадает с кривой после первого прохода, а уровень ОН сжатия меньше на  $-0,18 \dots -0,06$  отн. ед. После двух проходов уровень ОН сжатия в поверхностном слое составляет  $-0,34$  отн. ед.

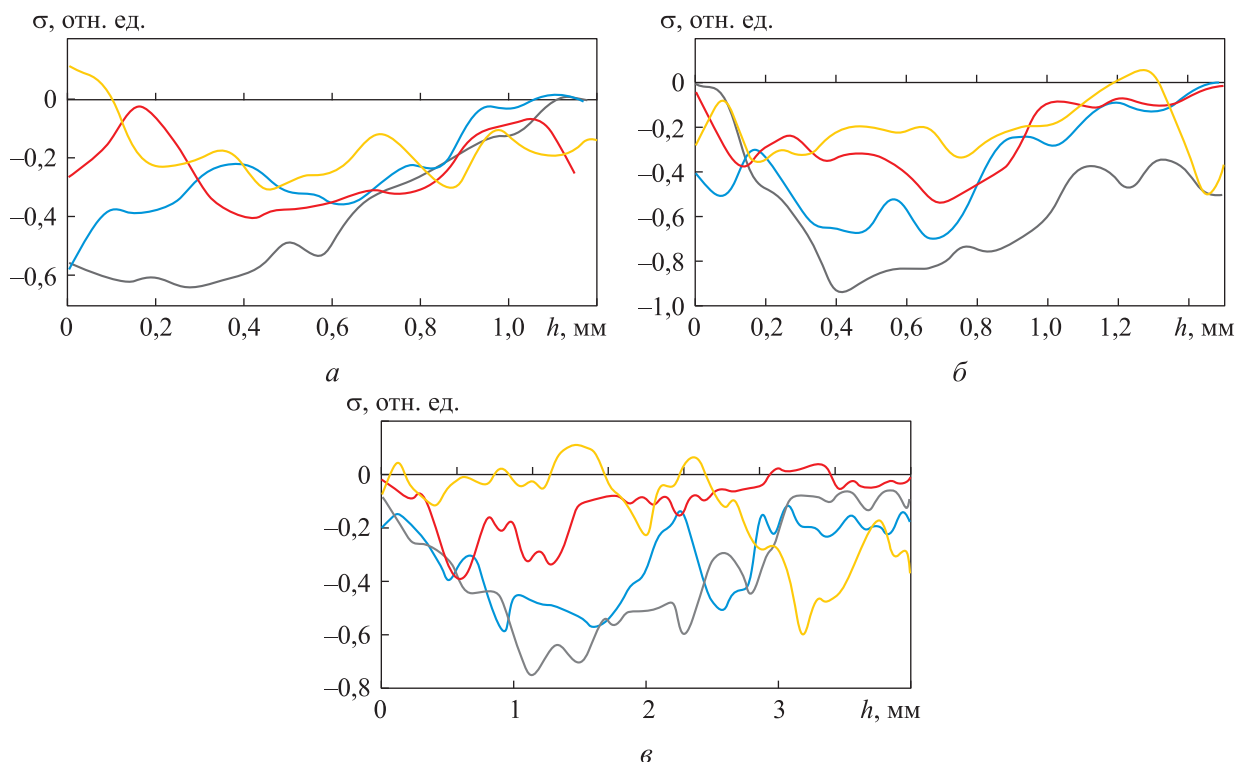


Рис. 11. Распределения ОН  $\sigma$  по глубине  $h$  в сечениях кромки лопатки на расстоянии 15 (а) и 30 мм (б) от точки начала ЛУО и в обработанной зоне (в) при длине квадратного пятна  $a = 1$  мм:

— и — без смещения зоны обработки при плотности мощности излучения  $0,5I/I_{\max}$  и  $I/I_{\max}$ ;  
— и — со смещением зоны обработки на 0,5 мм от радиуса кромки лопатки при  $0,5I/I_{\max}$  и  $I/I_{\max}$

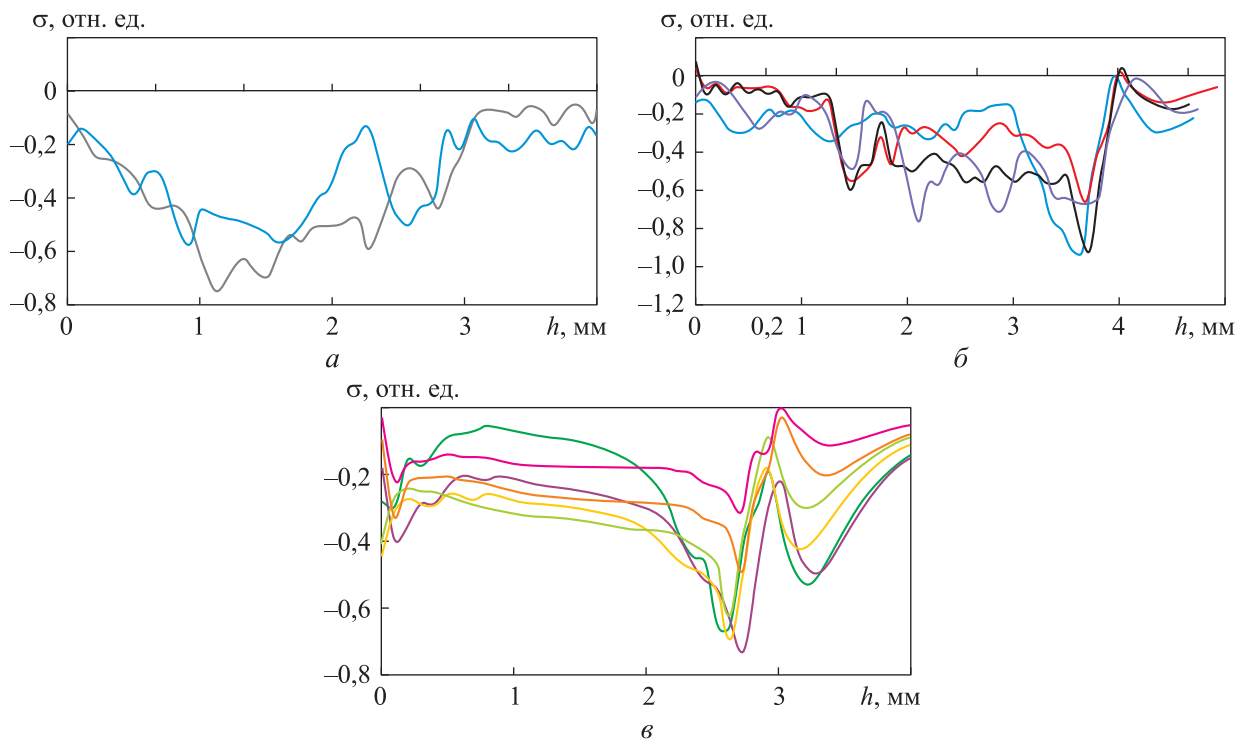


Рис. 12. Распределения ОН  $\sigma$  по глубине  $h$  кромки лопатки после ЛУО с различными значениями плотности мощности излучения и длины квадратного пятна:

а —  $a = 1$  мм при  $0,5I/I_{\max}$  (—) и  $I/I_{\max}$  (—);  
б —  $a = 2$  мм при  $0,25I/I_{\max}$  (—),  $0,37I/I_{\max}$  (—),  $0,5I/I_{\max}$  (—) и  $0,62I/I_{\max}$  (—);  
в —  $a = 3$  мм при  $0,16I/I_{\max}$  (—),  $0,22I/I_{\max}$  (—),  $0,27I/I_{\max}$  (—) и  $0,33I/I_{\max}$  (—),  $0,38I/I_{\max}$  (—) и  $0,44I/I_{\max}$  (—)

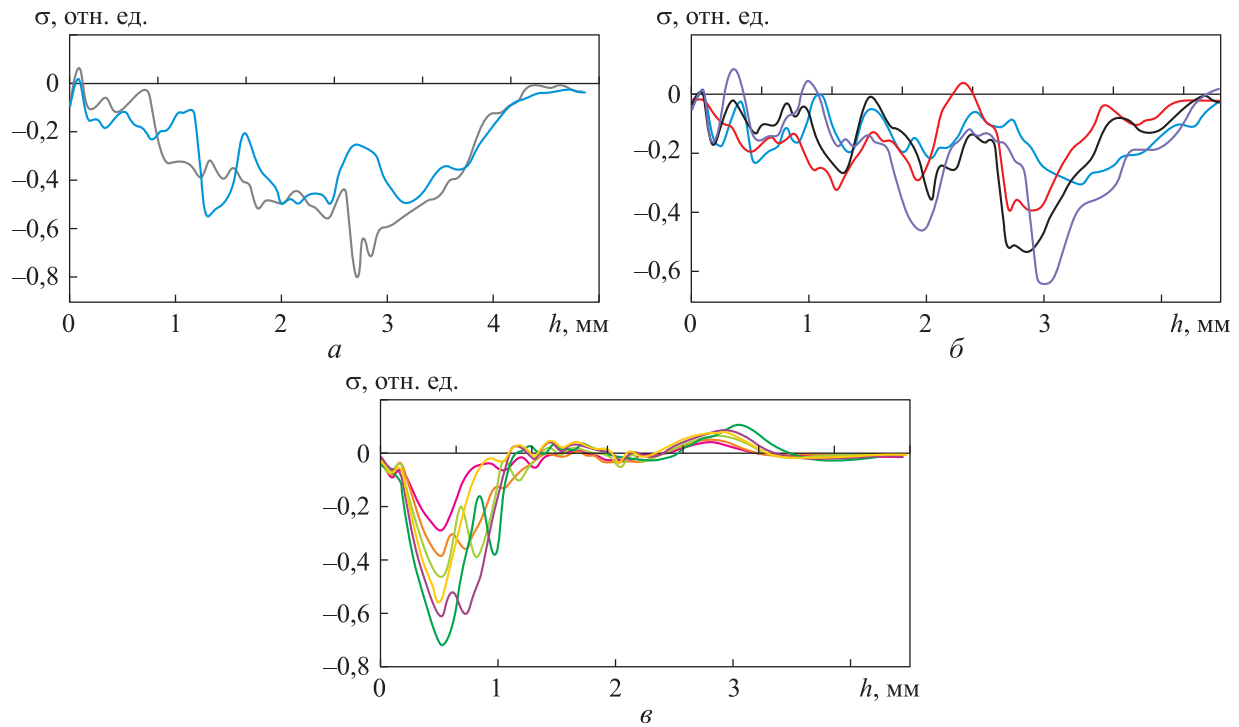


Рис. 13. Распределения ОН  $\sigma$  по глубине  $h$  в середине кромки лопатки после ЛУО с различными значениями плотности мощности излучения и длины квадратного пятна:

$a$  —  $a = 1$  мм при  $0,5I/I_{\max}$  (—) и  $I/I_{\max}$  (—);  
 $б$  —  $a = 2$  мм при  $0,25I/I_{\max}$  (—),  $0,37I/I_{\max}$  (—),  $0,5I/I_{\max}$  (—) и  $0,62I/I_{\max}$  (—);  
 $в$  —  $a = 3$  мм при  $0,16I/I_{\max}$  (—),  $0,22I/I_{\max}$  (—),  $0,27I/I_{\max}$  (—) и  $0,33I/I_{\max}$  (—);  $0,38I/I_{\max}$  (—) и  $0,44I/I_{\max}$  (—)

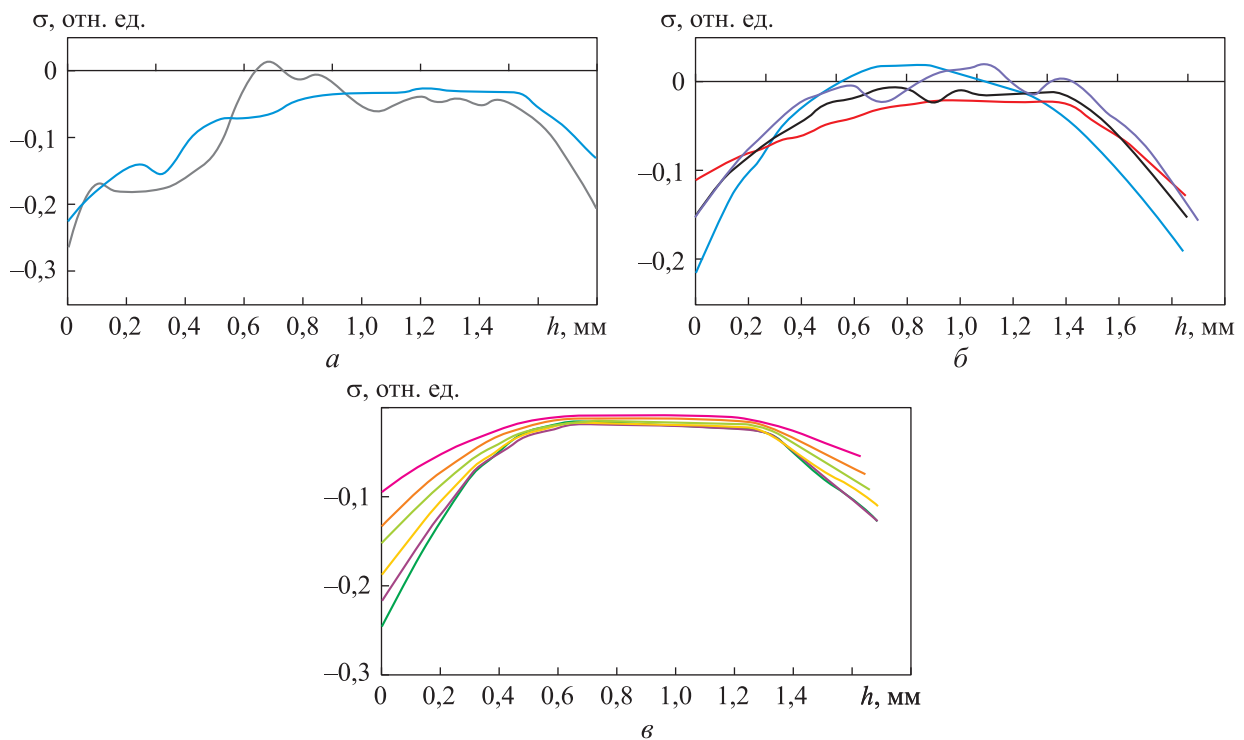


Рис. 14. Распределения ОН  $\sigma$  по глубине  $h$  в сечении кромки лопатки на расстоянии 1 мм от точки начала обработки после ЛУО с различными значениями плотности мощности излучения и длины квадратного пятна:

$a$  —  $a = 1$  мм при  $0,5I/I_{\max}$  (—) и  $I/I_{\max}$  (—);  
 $б$  —  $a = 2$  мм при  $0,25I/I_{\max}$  (—),  $0,37I/I_{\max}$  (—),  $0,5I/I_{\max}$  (—) и  $0,62I/I_{\max}$  (—);  
 $в$  —  $a = 3$  мм при  $0,16I/I_{\max}$  (—),  $0,22I/I_{\max}$  (—),  $0,27I/I_{\max}$  (—) и  $0,33I/I_{\max}$  (—);  $0,38I/I_{\max}$  (—) и  $0,44I/I_{\max}$  (—)

*Исследование влияния длины квадратного пятна и плотности мощности излучения на уровень и глубину ОН в середине кромки лопатки.* Применение ЛУО с обеих сторон пластины вызывает уменьшение профилей ОН сжатия, а также способствует нивелированию околонулевых ОН сжатия на противоположной стороне.

Однако двухсторонняя обработка приводит к высоким ОН растяжения в зоне стыка между пятнами до 0,6 отн. ед. Чтобы уменьшить ОН растяжения, следует проводить ЛУО с 50%-ным перекрытием пятен.

В середине кромки лопатки ОН сжатия наблюдаются от радиуса кромки до 1 мм по глубине. В радиусе кромки ОН сжатия достигают  $-0,06$  отн. ед., затем увеличиваются до  $-0,72$  отн. ед. на глубине 0,5 мм, переходя в околонулевые на глубине 1 мм, более не изменяясь.

*Исследование влияния длины квадратного пятна и плотности мощности излучения на уровень и глубину ОН в сечении кромки лопатки на расстоянии 1 мм от точки начала обработки после окончания ЛУО.* Распределения ОН по сечению кромки лопатки на расстояние 1 мм после окончания ЛУО при длине квадратного пятна  $a = 1, 2$  и 3 мм показаны на рис. 14, а–в.

Увеличение длины пятна приводит к смещению максимума ОН сжатия на глубину до 0,3 мм.

Установлено, что ЛУО приводит к наведению ОН сжатия в поверхностном слое, а также на глубину до 0,4 мм с обеих сторон кромки даже на расстоянии 1 мм от точки начала обработки после окончания ЛУО. При увеличении плотности мощности излучения повышается только уровень ОН сжатия, глубина существенно не изменяется. На глубине 0,5 мм по сечению кромки ОН становятся околонулевыми.

## Выводы

1. Установлено, что параметры ЛУО не влияют на распределение ОН по радиусу кромки, ОН — околонулевые.

2. При длине квадратного пятна 1 мм использование различных стратегий обработки не привело к значимому изменению распределения ОН по сечению кромки. Выбран первый вариант обработки. В результате сравнения стратегий при длине квадратного пятна 2 мм выбран второй вариант, обеспечивающий наибольшие ОН сжатия в сечении кромки лопатки.

3. Смещение зоны ЛУО на 0,5 мм от радиуса кромки лопатки при длине квадратного пятна 1 мм не выявило преимуществ перед схемой без смещения этой зоны. Уровень ОН сжатия при стандартной схеме обработки оказался выше, чем при схеме со смещением зоны обработки.

4. В сечениях кромки лопатки на различном расстоянии от точки начала обработки увеличение плотности мощности импульса излучения приводит к возрастанию уровня ОН, глубина ОН сжатия остается неизменной.

5. При длинах квадратного пятна 1 и 2 мм глубина ОН сжатия превышает середину кромки по всей длине, при длине 3 мм — только в диапазоне 0,2...1,0 мм.

6. Выявлено, что ЛУО приводит к наведению ОН сжатия как в поверхностном слое, так и на глубину до 0,4 мм с обеих сторон кромки даже на расстоянии 1 мм от зоны обработки. На глубине 0,5 мм по сечению кромки ОН становятся околонулевыми.

7. Для снижения времени проведения ЛУО необходимо применять квадратное пятно с длиной стороны 3 мм и энергией 5...8 Дж.

8. Для равномерного распределения ОН по сечению кромки необходимо проводить ЛУО лопатки с обеих сторон.

## 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., Шибяев 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](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. 35–41. EDN: JEEASU
- [5] Hu Y., Yao Z., Hu J. 3-D FEM simulation of laser shock processing. *Surf. Coat. Technol.*, 2006, vol. 201, no. 3–4, pp. 1426–1435, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.02.018>
- [6] Fang Y. Simulation and experiment of impact effects of nanosecond pulse laser-generated processing Ti-6Al-4V alloy. *J. of Materi. Eng. and Perform.*, 2021, vol. 30, no. 8, pp. 5515–5523, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05551-4>
- [7] 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>
- [8] Fameso F., Desai D., Schalk K. et al. Residual stress enhancement by laser shock treatment in chromium-alloyed steam turbine blades. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 16, art. 5682. doi: <https://doi.org/10.3390/ma15165682>
- [9] 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>
- [10] 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>
- [11] Сихамов Р.А., Фомин Ф., Келлер З. и др. Моделирование остаточных напряжений, созданных методом лазерного ударного упрочнения. *Аллея науки*, 2019, т. 2, № 6, с. 18–25. URL: [https://alley-science.ru/domains\\_data/files/Collection\\_of\\_journals/Iyun%202%20tom.pdf](https://alley-science.ru/domains_data/files/Collection_of_journals/Iyun%202%20tom.pdf)
- [12] 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>
- [13] Fang Y.W., Li Y.H., He W.F. et al. Effects of laser shock processing with different parameters and ways on residual stresses fields of a TC4 alloy blade. *Mater. Sci. Eng. A*, 2013, no. 559, pp. 683–692, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.09.009>
- [14] Ma S., Ding X., Yang Z. et al. Numerical simulation of TC17 titanium alloy thin blade strengthened by laser shock processing. APISAT 2021. Vol. 1. *Springer*, 2022, pp. 949–961, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2689-1\\_73](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2689-1_73)
- [15] Ding X., Li H., Jiang Z. et al. Prediction of surface residual stresses after laser shock processing on TC4 titanium alloy using different neural network agent models. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 11, art. 1889, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings13111889>
- [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](https://doi.org/10.54349/26586061_2022_1_59) (in Russ.).

- [3] Shiryaev A.A., Gabov I.G., Milenin A.S. et al. Comparison of hardening methods on blades of titanium alloy. *Vestnik PNIPU. Mashinostroyeniye, materialovedeniye* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2023, no. 4, pp. 109–117. (In Russ.).
- [4] Shiryaev 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. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2024, no. 3, pp. 35–41. EDN: JEEASU (In Russ.).
- [5] Hu Y., Yao Z., Hu J. 3-D FEM simulation of laser shock processing. *Surf. Coat. Technol.*, 2006, vol. 201, no. 3–4, pp. 1426–1435, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.02.018>
- [6] Fang Y. Simulation and experiment of impact effects of nanosecond pulse laser-generated processing Ti-6Al-4V alloy. *J. of Materi. Eng. and Perform.*, 2021, vol. 30, no. 8, pp. 5515–5523, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05551-4>
- [7] 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>
- [8] Fameso F., Desai D., Schalk K. et al. Residual stress enhancement by laser shock treatment in chromium-alloyed steam turbine blades. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 16, art. 5682. doi: <https://doi.org/10.3390/ma15165682>
- [9] 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>
- [10] 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>
- [11] Sikhamov R.A., Fomin F., Keller Z. Et al. Simulation of residual stresses caused by laser shock peening. *Alleya nauki*, 2019, vol. 2, no. 6, pp. 18–25. URL: [https://alley-science.ru/domains\\_data/files/Collection\\_of\\_journals/Iyun%20%20tom.pdf](https://alley-science.ru/domains_data/files/Collection_of_journals/Iyun%20%20tom.pdf) (in Russ.).
- [12] 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.).
- [13] Fang Y.W., Li Y.H., He W.F. et al. Effects of laser shock processing with different parameters and ways on residual stresses fields of a TC4 alloy blade. *Mater. Sci. Eng. A*, 2013, no. 559, pp. 683–692, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.09.009>
- [14] Ma S., Ding X., Yang Z. et al. Numerical simulation of TC17 titanium alloy thin blade strengthened by laser shock processing. APISAT 2021. Vol. 1. Springer, 2022, pp. 949–961, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2689-1\\_73](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2689-1_73)
- [15] Ding X., Li H., Jiang Z. et al. Prediction of surface residual stresses after laser shock processing on TC4 titanium alloy using different neural network agent models. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 11, art. 1889, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings13111889>
- [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. Phy.*, 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 отдела 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. UEC-Aviadvigatel JSC (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. Влияние параметров лазерной ударной обработки на распределение остаточных напряжений в кромке лопатки компрессора из титанового сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 5, с. 57–69.

### Please cite this article in English as:

Shiryaev A.A., Karmanov V.V. Influence of the laser shock machining parameters on the residual stresses distribution in the edge of a titanium alloy compressor blade. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 5, pp. 57–69.



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям материалы конференции «Сварка и диагностика : I Всероссийская научно-техническая конференция имени академика РАН Н.П. Алешина»

Конференция приурочена к 90-летию кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана и посвящена вопросам современного состояния сварки и родственных процессов, а также современным разработкам в области неразрушающего контроля: в области разработки сварочных материалов, в том числе наплавочных и предназначенных для подводного применения, современного состояния различных способов сварки, включая сварку взрывом, конденсаторную сварку, сварку токами высокой частоты, электронно-лучевые процессы и дуговую сварку, использования ультразвукового контроля, электромагнитно-акустической дефектоскопии, вихретокового контроля. Освещены вопросы применения цифровых технологий в области неразрушающего контроля и сварочного производства.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>