

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 7. С. 295–302  
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 7, pp. 295–302

Научная статья  
УДК 621.787.6

## Конечно-элементное моделирование деформаций поверхности лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6, образующихся при лазерной ударной обработке с расширением низкотемпературной плазмы в ограниченном канале

Г.Д. Кожевников<sup>1</sup>✉, Д.Д. Королев<sup>1</sup>, М.А. Ляховецкий<sup>1</sup>, Д.А. Токачев<sup>1</sup>, Д.Ф. Трегулов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия  
✉kozhevnikov.mai@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы, связанные с лазерной ударной обработкой (ЛУО) – технологией, применяемой для повышения усталостной прочности путём создания сжимающих остаточных напряжений на поверхности деталей. Основное внимание уделяется численному моделированию процесса ЛУО и оценке влияния различных параметров обработки, таких как интенсивность и длительность лазерного импульса, а также влияние повторных ударов на деформацию поверхности. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными при значениях интенсивности лазерного излучения до 8 ГВт/см<sup>2</sup> для различных длительностей импульса. Получено, что численная модель не учитывает эффект насыщения поверхностных деформаций по мере увеличения повторных ударов. Настоящее исследование направлено на валидацию численной модели ЛУО для прогнозирования поверхностных деформаций, которая может служить вспомогательным инструментом для оптимизации режимов обработки.

**Ключевые слова:** усталость, титановый сплав, остаточные напряжения, лазерная ударная обработка, конечно-элементное моделирование, поверхностные деформации, лопатки компрессора

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №FSFF-2023-0006.

**Для цитирования.** Кожевников Г.Д., Королев Д.Д., Ляховецкий М.А., Токачев Д.А., Трегулов Д.Ф. Конечно-элементное моделирование деформаций поверхности лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6, образующихся при лазерной ударной обработке с расширением низкотемпературной плазмы в ограниченном канале // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 7. С. 295–302. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=182785>

Original article

## Finite element analysis of surface deformations induced by Laser Shock Peening of a gas turbine engine compressor blade fabricated from VT6 titanium alloy

G.D. Kozhevnikov<sup>1✉</sup>, D.D. Korolev<sup>1</sup>, M.A. Lyakhovetsky<sup>1</sup>, D.A. Tokachev<sup>1</sup>, D.F. Tregulov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

✉kozhevnikov.mai@yandex.ru

**Abstract.** One of the key challenges in manufacturing engines and aircraft structures is ensuring fatigue strength. This study investigates Laser Shock Peening (LSP), a technique used to improve fatigue strength by inducing compressive residual stresses on component surfaces. The focus is on numerically modeling the LSP process and assessing the effects of various parameters, such as laser pulse intensity, duration, and the impact of repeated shocks on surface deformation. The numerical results show good alignment with experimental data at laser intensities up to 8 GW/cm<sup>2</sup> for different pulse durations. It has been demonstrated that the numerical model does not account for the impact of saturation of surface deformations as a result of repeated impacts. This research aims to validate the LSP numerical model for predicting surface deformations, which can help optimize processing parameters.

**Keywords:** fatigue, titanium alloy, residual stresses, laser shock peening, finite element modeling, surface deformations, compressor blades

**Funding.** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № FSFF-2023-0006.

**For citation.** Kozhevnikov G.D., Korolev D.D., Lyakhovetsky M.A., Tokachev D.A., Tregulov D.F. Finite element analysis of surface deformations induced by Laser Shock Peening of a gas turbine engine compressor blade fabricated from VT6 titanium alloy. *Thermal processes in engineering*. 2024, vol. 16, no. 7, pp. 295–302. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=182785>

### Введение

Усталостное разрушение представляет собой одну из ключевых проблем в современном авиационном двигателестроении. По статистике на усталость приходится 52 % отказов в аэрокосмической технике. В авиационных двигателях 55% таких отказов возникают в лопатках и дисках газотурбинных двигателей, а в конструкции летательных аппаратов около 24 % отказов связано с работой шасси [1]. Все эти элементы в разной степени испытывают термические, статические и циклические нагрузки.

Ситуацию усугубляет эксплуатация современных летательных аппаратов в различных климатических условиях, что увеличивает вероятность возникновения дефектов, вызванных попаданием посторонних объектов (песок, дождь, лёд и т.п.) в тракт двигателя [2, 3]. Особенно

уязвимы к таким дефектам рабочие лопатки осевых компрессоров низкого и высокого давления ГТД.

Для повышения усталостной прочности и стойкости лопаток к повреждениям применяются различные методы поверхностного пластического деформирования, используемые для создания сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое детали. Наиболее распространённые из них: виброгалтовка, обкатка, дробеструйное упрочнение, ультразвуковое упрочнение микрошариками и другие [4–6]. В двигателестроительной отрасли широкое распространение получили дробеударные методы обработки, благодаря которым предел выносливости лопаток увеличивается до 19 % относительно неупрочнённых [7].

Альтернативным методом упрочнения является лазерная ударная обработка [8]. Механизм

этого процесса показан на рисунке 1 [9]. Обрабатываемую поверхность покрывают слоем, непроницаемым для лазерного излучения (например, краска, ПВХ-лента, алюминиевая фольга). Поверх этого слоя формируют прозрачный слой, чаще всего используется вода. При воздействии лазерного излучения интенсивностью 1–10 ГВт/см<sup>2</sup> происходит нагрев и испарение непрозрачного покрытия, что приводит к образованию плазмы в ограниченном объеме. Под дальнейшим воздействием лазерного излучения давление в плазме резко возрастает до 5–6 ГПа, создавая ударные волны, которые воздействуют на поверхность материала. При превышении давления плазмы предела упругости Гюгонио материал пластически деформируется, формируя слой сжимающих напряжений в поверхностном слое детали [10].

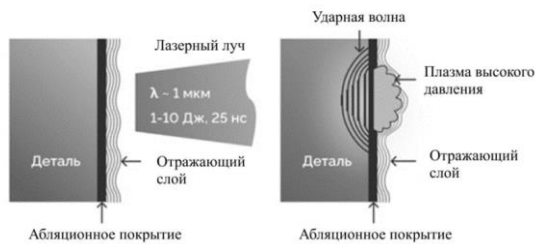


Рис. 1. Схема процесса лазерной ударной обработки [9]

Однако при обработке как дробеударными методами, так и лазерной ударной обработкой на поверхности образуется микро- и макрорельеф [11, 12]. Дробеударная обработка снижает качество поверхности за счёт увеличения шероховатости, в то время как при лазерном упрочнении этот эффект отсутствует. Однако ЛУО приводит к появлению волнистости, обусловленной импульсно-периодической последовательностью обработки [12].

В большинстве случаев поверхностное упрочнение представляет собой заключительный этап изготовления деталей. Формирование волнистого рельефа поверхности на этом этапе может привести к ухудшению аэродинамических и гидродинамических характеристик, нарушению равномерного распределения нагрузок, а также к неравномерному износу контактных поверхностей. Поэтому при выборе режимов обработки необходимо учитывать будущую волнистость поверхности в чём может помочь моделирование процесса обработки.

Поэтому целью работы является численное моделирование поверхностных деформаций, возникающих при лазерной ударной обработке при различных значениях интенсивности и длительностях лазерного импульса, а также сравнение результатов с экспериментальными данными.

## Материалы и методы

### 1. Методика проведения эксперимента

Объектом исследований и моделирования являлись образцы цилиндрической формы, изготовленные из прутка титанового сплава ВТ6, диаметром 25 мм, толщиной 4 мм. Образцы вырезались с помощью электроэрозионного станка, а затем поверхности шлифовались и полировались до шероховатости  $Ra = 0,2$  мкм. После механической обработки проводился вакуумный отжиг при температуре 630 °С в течение 1,5 часов.

Обработка для валидации результатов моделирования проводилась на двух автоматизированных комплексах лазерной ударной обработки. Характеристики систем представлены в табл. 1. Основное различие между ними заключается в длительности лазерного импульса и распределении интенсивности по пятну. В качестве абляционного покрытия и удерживающего слоя использовались ПВХ-лента и вода.

Для измерения деформации поверхности использовался лазерный конфокальный микроскоп Olympus LEXT OLS 5000.

Таблица 1. Описание характеристик лазерных систем

Название	Активный элемент	Энергия, Дж	Длительность импульса, нс	Распределение интенсивности по пятну
Система 1	Nd:Glass	1-10	50-60	Гаусс
Система 2	Nd:YAG	0,5-0,85	15-20	П-образное

### 2. Методика моделирования

Моделирование процесса лазерной ударной обработки проводилось в явной постановке с помощью программного комплекса ANSYS, решателя LS-DYNA.

Процесс моделирования представлял собой предварительный термодинамический расчёт расширения плазмы в ограниченном канале, целью которого являлось получение временной характеристики давления  $P(t)$ . Пространственное распределение использовалось пропорционально профилю распределения интенсивности лазерно-

го излучения. Для затухания упругопластических волн использовалась схема расчёта с применением численного демпфирования системы [13].

Конечно-элементная модель представляла собой образец толщиной 4 мм. Предварительно проводился анализ сеточной сходимости модели, оптимальным размером сетки в направлении параллельном поверхности является 50 мкм, а по глубине – 25 мкм, а также определение оптимального временного шага между воздействиями – 5000 нс.

В качестве термодинамической модели использовалась одномерная аналитическая модель расширения плазмы в ограниченном канале Фаббро [14], которая позволяет получить временную характеристику давления. Процесс расширения плазмы описывается в несколько этапов:

1. Нагрев и расширение плазмы, описываемый дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dL(t)}{dt} = \frac{2 * P(t)}{Z}$$

$$I(t) = P(t) * \frac{dL(t)}{dt} + \frac{3}{2\alpha} \frac{d[P(t)L(t)]}{dt}$$

где  $L$  – толщина плазмы, мкм,  $t$  – время, нс,  $P$  – давление, МПа,  $I$  – интенсивность лазерного излучения, ГВт/см<sup>2</sup>,  $\alpha$  – доля тепловой энергии плазмы,  $Z$  – акустический импеданс для пары материалов [грамм/см<sup>2</sup>\*с].

2. Адиабатическое расширение плазмы после прекращения лазерного излучения:

$$P(t) = P(\tau) * \left(\frac{L(\tau)}{L(t)}\right)^\gamma$$

$$L(t) = L(\tau) * \left(1 + \frac{\gamma + 1}{\tau} (t - \tau)\right)^{\frac{1}{\gamma+1}}$$

где  $\tau$  – длительность импульса, нс,  $\gamma$  – показатель адиабаты.

Пространственное распределение давления соответствует распределению интенсивности лазерного пятна и описывается уравнениями, для различных систем [15]:

$$P(r) = P_{max} * \exp\left(-2\left(\frac{r}{a}\right)^b\right)$$

$$P(r) = P_{max} * \exp\left(-2\left(\frac{r}{2 * R}\right)^2\right)$$

где  $P_{max}$  – давление,  $r$  – радиус,  $a$  – параметр, влияющий на амплитуду ударного давления на краю облучения,  $b$  – параметр, влияющей на распределение давления в плоской вершине. В

данной статье использовались  $a = R$ ,  $b = 5$ , что соответствовало измеренному распределению лазерной интенсивности.

Полученные пространственная и временная характеристики давления являются граничными условиями для конечно-элементной модели.

В качестве модели поведения материала была выбрана модель Джонсона Кука [16]. Эта модель часто применяется при моделировании быстропротекающих процессов в металлах [17]. Она учитывает деформационное упрочнение, скорость деформации и температурное влияние. Однако в данном моделировании температурное влияние не учитывалось, поэтому использовалась упрощённая модель.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C * \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})$$

Используемые упругие характеристики и параметры для модели представлены в табл. 2 [18].

Таблица 2. Механические свойства материала [18]

R, кг/м3	E, ГПа	v	A, МПа	B, МПа	n	C
4450	125	0.33	862	331	0.34	0.014

### Результаты и обсуждение

После обработки одиночных пятен при различных значениях интенсивности и длительности импульса лазерного излучения, а также последующего сканирования, были получены топографические карты поверхности для системы с малой длительностью импульса (15–20 нс), представленные на рис. 2, и для системы с большой длительностью импульса (50–60 нс), рис. 3.

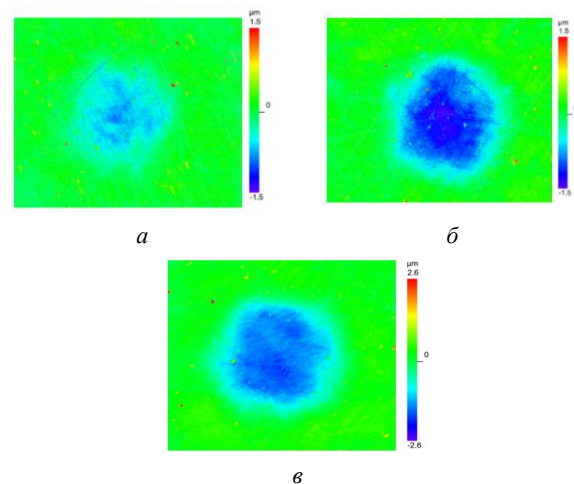


Рис. 2. Топографическая карта деформированных пятен: а – 1,6 ГВт/см<sup>2</sup>; б – 2,44 ГВт/см<sup>2</sup>; в – 3,45 ГВт/см<sup>2</sup>

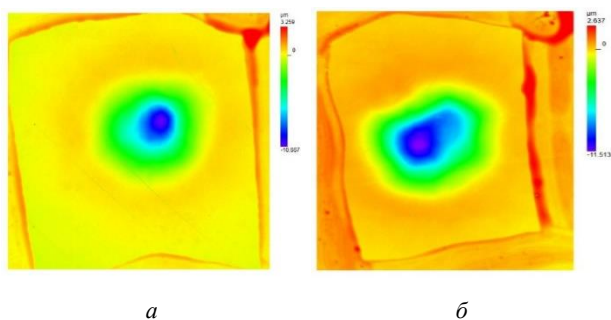


Рис. 3. Топографическая карта деформированных пятен: *а* – 6,5 ГВт/см<sup>2</sup>; *б* – 9,85 ГВт/см<sup>2</sup>

На основании этих карт были сняты профили деформации и определены их максимальные значения. Профили деформации поверхности строились по трем пятнам, с последующим усреднением. Интенсивность увеличивалась за счет повышения энергии лазерного излучения при фиксированном диаметре пятна.

Также было проведено численное моделирование процесса лазерной ударной обработки на одиночных пятнах при тех же режимах обработки, методика моделирования была описана в разделе 2. Результаты сравнения профилей экспериментальных и расчетных данных представлены на рисунках 4, 5.

Анализ графиков показывает, что моделирование соответствует экспериментальным данным как качественно, так и количественно, и может быть использовано для дальнейшего анализа процесса. Кроме того, при увеличении интенсивности лазерного излучения при фиксированном диаметре пятна увеличиваются как величина максимальных деформаций, так и диаметр деформируемого пятна.

Увеличение диаметра деформированного пятна объясняется распределением интенсивности лазерного излучения: при повышении интенсивности увеличивается магнитуа давления в каждой точке пятна, что приводит к тому, что на периферии пятна давление достигает значений выше предела упругости Гюгонио, как было показано авторами [19]. Неровности экспериментальных профилей деформаций также связаны с несовершенством распределения интенсивности лазерного излучения.

Также была построена кривая зависимости максимальных деформаций от интенсивности лазерного излучения на длительностях импульса

50–60 нс. Аналогичная кривая была построена с помощью численной модели. Результаты представлены на рис. 6.

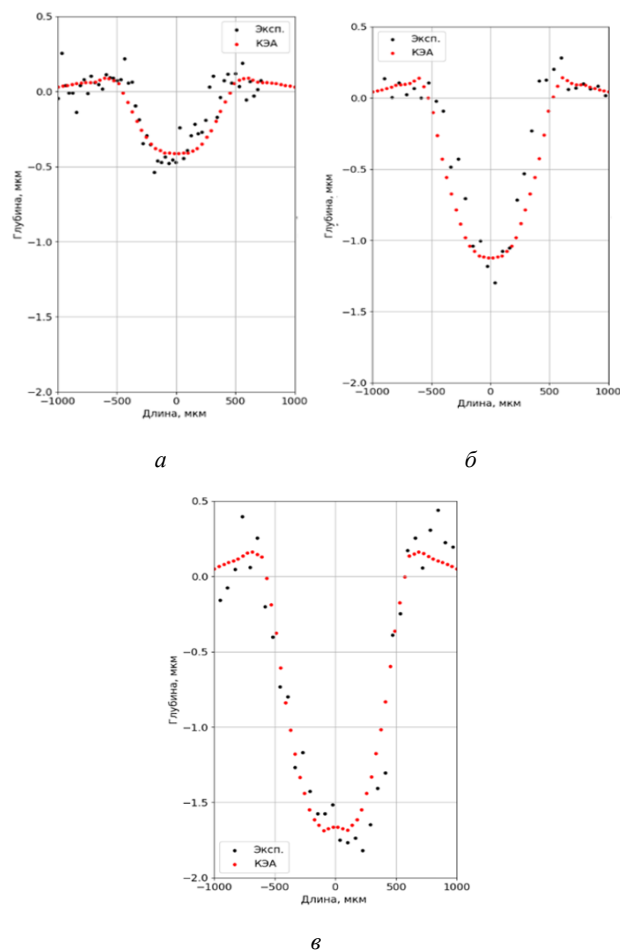


Рис. 4. Профили деформаций пятен, после обработки на системе с малой длительностью импульса: *а* – 1,6 ГВт/см<sup>2</sup>; *б* – 2,44 ГВт/см<sup>2</sup>; *в* – 3,45 ГВт/см<sup>2</sup>

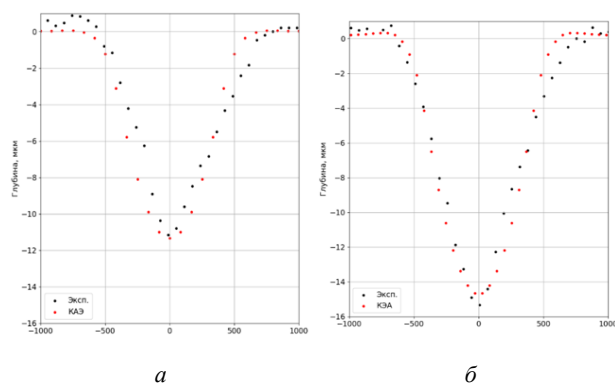


Рис. 5. Профили деформаций пятен, после обработки на системе с высокой длительностью импульса: *а* – 6,5 ГВт/см<sup>2</sup>; *б* – 9,5 ГВт/см<sup>2</sup>

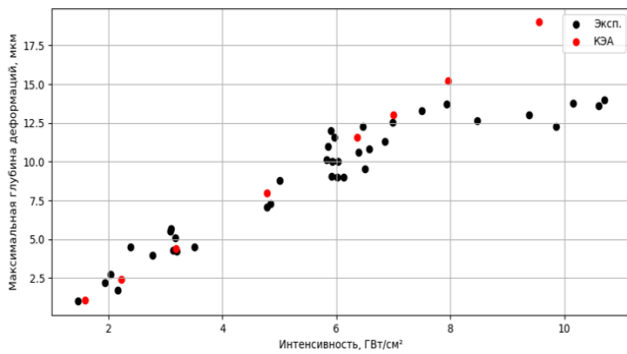


Рис. 6. Зависимость максимальных деформаций от интенсивности лазерного излучения

Из графика видно, что в экспериментальных данных деформация на поверхности образуется при достижении  $1,5 \text{ ГВт/см}^2$  и возрастает линейно до  $8 \text{ ГВт/см}^2$ . При достижении интенсивности лазерного излучения  $8 \text{ ГВт/см}^2$  образование плазмы может возникать на поверхности воды [20], которая не пропускает лазерное излучение к поверхности образца. Поэтому при более высоких значениях интенсивности деформация не увеличивается, и процесс становится неэффективным. Результаты моделирования процесса хорошо согласуются с экспериментальными данными на значениях интенсивностей до  $8 \text{ ГВт/см}^2$ , однако в термодинамической модели Фаббро не учитываются процессы, вызываемые пробой плазмы, поэтому необходимо ограничивать давление, соответствующее интенсивности  $8 \text{ ГВт/см}^2$ .

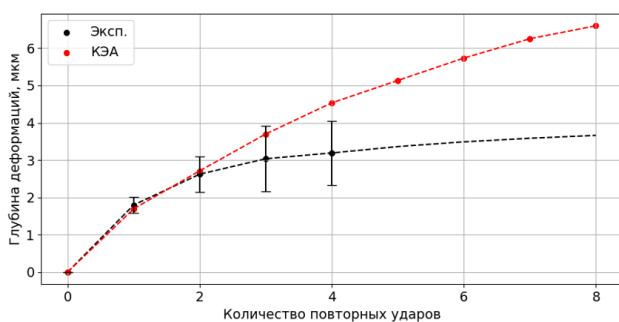


Рис. 7. Зависимость максимальных деформаций количества повторяемых ударов

На последнем этапе работы было проведено исследование влияния повторных ударов на деформацию пятна и сравнены результаты с расчетными данными для системы с малой длительностью импульса, представленные на рис. 7. По мере увеличения количества ударов глубина

деформаций растёт, однако наблюдается процесс насыщения, при котором увеличение деформации на поверхности уменьшается, так на четвертом ударе прирост деформации составляет всего 5 % относительно предыдущего значения.

Численные результаты, основанные на модели Джонсона-Кука, менее точно отражают процессы насыщения, демонстрируя завышенные значения деформации, начиная с четвертого удара – разница между моделью и экспериментом составляет 40 %. В связи с этим рекомендуется ограничивать использование данных параметров модели Джонсона–Кука для прогнозирования поверхностных деформаций в процессе лазерной ударной обработки до трёх ударов.

### Выводы

1. Описана методика моделирования поверхностных деформаций, возникающих вследствие лазерной ударной обработки, с применением явного численного анализа. При моделировании использовалась термодинамическая модель Фаббро и реализовано численное демпфирование для стабилизации системы.

2. Показано, что результаты численного моделирования демонстрируют хорошее совпадение с экспериментальными данными как качественно, так и количественно, в широком диапазоне интенсивностей и длительностей лазерного излучения.

3. Построены экспериментальные и численные зависимости поверхностных деформаций от интенсивности лазерного излучения при длительности импульса 50–60 нс. Установлено, что деформации на титановом сплаве ВТ6 начинают формироваться при интенсивности  $1,5 \text{ ГВт/см}^2$  и достигают максимума при  $8 \text{ ГВт/см}^2$ . При дальнейшем увеличении интенсивности наблюдается формирование плазмы пробоя на поверхности воды. Аналогичная зависимость была получена на основе численной модели, однако она представляет собой линейную зависимость и не учитывает процессы плазмообразования на поверхности воды. В связи с этим, рекомендуется проводить как обработку, так и моделирование процесса при интенсивностях до  $8 \text{ ГВт/см}^2$ .

4. Проведено исследование экспериментальных и численных зависимостей поверхностных

деформаций от повторяющихся лазерных ударов. Численные результаты демонстрируют достаточное совпадение с экспериментальными данными до трёх ударов. Установлено, что при увеличении количества ударов глубина деформации растёт, но наблюдается эффект насыщения, при котором прирост деформации с каждым ударом уменьшается. Численная модель Джонсона-Кука недостаточно точно отражает этот процесс, начиная с четвертого удара, с отклонением в 40 % от экспериментальных данных. Следовательно, рекомендуется ограничивать использование данной модели для прогнозирования поверхностных деформаций до трех ударов в процессе лазерной ударной обработки.

#### Список источников

1. Lv J. H., Wang W. Z., Liu S. W. Statistical analysis of failure cases in aerospace // *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*. – 2018. – Т. 12. – №. 5. – С. 497-501. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1316616>
2. Строкач Е. А., Кожевников Г. Д., Пожидаев А. А. Численное моделирование процесса эродирования твердыми частицами в газовом потоке (обзор) // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. – 2021. – №. 67. – С. 56-69. DOI: 10.15593/2224-9982/2021.67.06
3. Pozhidaev A., Kozhevnikov G., Strokach E. Numerical study of turbulence model effect on solid particle erosion in gaseous flow // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing, 2023. – Т. 2549. – №. 1. DOI: 10.1063/5.0130489
4. Коновалов, Л.И. Метод ультразвукового упрочнения поверхностей узлов и деталей авиационных газотурбинных двигателей, как одна из перспективных технологий в авиастроении / Л.И. Коновалов, Г.Г. Ширваньянц // *Молодой учёный*. – 2015. – № 22 (102). – С. 141–147.
5. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
6. Александров И. М., Миляев К. Е., Семёнов С. В. Анализ возможности применения низкопластичного выглаживания для повышения надежности лопаток ГТД // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. – 2018. – №. 53. – С. 86-96.
7. Ширяев А. А., Габов И. Г., Миленин А. С. Влияние лазерного ударного упрочнения на параметры поверхностного слоя лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава // *Материаловедение*. – 2024. – Т. 26. – №. 1. – С. 66-73. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.1.08
8. Clauer A. H. Laser shock peening, the path to production // *Metals*. – 2019. – Т. 9. – №. 6. – С. 626. <https://doi.org/10.3390/met9060626>
9. Korolev D. D., Kozhevnikov G. D., Tokachev D. A., Lyakhovetskii M. A., Petukhov Yu. V. The Effect of Laser Shock Peening on the Physical and Mechanical Properties of the Surface Layer of D16 Aluminum Alloy // *Russian Aeronautics*. – 2023. – Т. 66. – №. 4. – С. 829–837. <https://doi.org/10.3103/S1068799823040244>
10. Иногамов Н. А., Е.А. Перов, В. В. Жаховский, В. В. Шепелев, Ю. В. Петров. Лазерная ударная волна: пластичность, толщина слоя остаточных деформаций и переход из упругопластического в упругий режим распространения // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2022. – Т. 115. – №. 2. – С. 80–88. <https://doi.org/10.31857/S1234567822020033>
11. Moradi, A., Heidari, A., Amini, K., Aghadavoudi, F., Abedinzadeh, R. The effect of shot peening time on mechanical properties and residual stress in Ti-6Al-4V alloy // *Metallurgical Research & Technology*. – 2022. – Т. 119. – №. 4. – С. 401. <https://doi.org/10.1051/mental/2022036>
12. Maharjan, N., Chan, S. Y., Ramesh, T., Nai, P. G., Ardi, D. T. Fatigue performance of laser shock peened Ti6Al4V and Al6061-T6 alloys // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2021. – Т. 44. – №. 3. – С. 733-747. <https://doi.org/10.1111/ffe.13390>
13. Kim, R., Suh, J., Shin, D., Lee, K. H., Bae, S. H., Cho, D. W., Yi, W. G. FE analysis of laser shock peening on STS304 and the effect of static damping on the solution // *Metals*. – 2021. – Т. 11. – №. 10. – С. 1516. DOI: 10.3390/met11101516
14. Fabbro, R., Fournier, J., Ballard, P., Devaux, D., & Virmont, J. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry // *Journal of applied physics*. – 1990. – Т. 68. – №. 2. – С. 775-784. <https://doi.org/10.1063/1.346783>
15. Sun B., Qiao H., Zhao J. Accurate numerical modeling of residual stress fields induced by laser shock peening // *AIP Advances*. – 2018. – Т. 8. – №. 9. – С. 095203. DOI: 10.1063/1.5039674
16. Johnson G. R. A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures // *Proc. 7th Inf. Sympo. Ballistics*. – 1983. – С. 541–547.
17. Amarchinta, H. K., Grandhi, R. V., Langer, K., Stargel, D. S. Material model validation for laser shock peening process simulation // *Modelling and simulation in materials science and engineering*. – 2008. – Т. 17. – №. 1. – С. 015010. DOI 10.1088/0965-0393/17/1/015010
18. Hu Y., Grandhi R.V. Efficient numerical prediction of residual stress and deformation for large-scale laser shock processing using the eigenstrain methodology // *Surface and Coatings Technology*, 2012, Vol. 206, No. 15, P. 3374-3385. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.01.050
19. Li, X., He, W., Luo, S., Nie, X., Tian, L., Feng, X., & Li, R. Simulation and experimental study on residual

stress distribution in titanium alloy treated by laser shock peening with flat-top and Gaussian laser beams // *Materials*. – 2019. – Т. 12. – №. 8. – С. 1343. DOI: 10.3390/ma12081343

20. **Rondepierre, A., Sollier, A., Videau, L., & Berthe, L.** Review on laser interaction in confined regime: Discussion about the plasma source term for laser shock applications and simulations // *Metals*. – 2021. – Т. 11. – №. 12. – С. 2032. <https://doi.org/10.3390/met11122032>.

### References

- Lv J. H., Wang W. Z., Liu S. W.** Statistical analysis of failure cases in aerospace // *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*. – 2018. – Т. 12. – №. 5. – С. 497–501. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1316616>
- Strokach E. A., Kozhevnikov G. D., Pozhidaev A. A.** Numerical simulation of solid particle erosion in a gaseous flow (review). // Federal State Budgeted Education Institution for Higher Professional Education PERM NATIONAL RESEARCH POLYTECHNIC UNIVERSITY. – 2021. – №. 67. – С. 56–69. DOI: 10.15593/224-9982/2021.67.06
- Pozhidaev A., Kozhevnikov G., Strokach E.** Numerical study of turbulence model effect on solid particle erosion in gaseous flow // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing, 2023. – Т. 2549. – №. 1. DOI: 10.1063/5.0130489
- Konovalov, L.I.** Metod ul'trazvukovogo uprochneniya poverkhnostei uzlov i detalei aviatsionnykh gazoturbinykh dvigatelei, kak odna iz perspektivnykh tekhnologii v aviastroenii / L.I. Konovalov, G.G. Shirvan'yants // *Molodoi uchenyi*. – 2015. – № 22 (102). – С. 141–147.
- Sulima, A.M.** Poverkhnostnyi sloi i ehkspluatatsionnye svoistva detalei mashin / A.M. Sulima, V.A. Shulov, YU.D. Yagodkin. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 240 s.
- Aleksandrov I. M., Milyaev K. E., Semenov S. V.** Application of technology of low plasticity burnishing in heightening of reability of fan blades possibility analysis // Federal State Budgeted Education Institution for Higher Professional Education PERM NATIONAL RESEARCH POLYTECHNIC UNIVERSITY. – 2018. – №. 53. – С. 86–96.
- Shiryayev A. A., Gabov I. G., Milenin A. S.** Influence of laser impact hardening on the parameters of the surface layer of turbine engine compressor blades made of titanium alloy // *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. – 2024. – Т. 26. – №. 1. – С. 66–73. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.1.08
- Clauer A. H.** Laser shock peening, the path to production // *Metals*. – 2019. – Т. 9. – №. 6. – С. 626. <https://doi.org/10.3390/met9060626>
- Korolev D. D., Kozhevnikov G. D., Tokachev D. A., Lyakhovetskii M. A., Petukhov Yu. V.** The Effect of Laser Shock Peening on the Physical and Mechanical Properties of the Surface Layer of D16 Aluminum Alloy // *Russian Aeronautics*. – 2023. – Т. 66. – №. 4. – С. 829–837. <https://doi.org/10.3103/S1068799823040244>
- Inogamov N. A., E. A. Perov, V. V. Zhakhovsky, V. V. Shepelev, Yu. V. Petrov.** laser shock wave: the plasticity and thickness of the residual deformation layer and the transition from the elastoplastic to elastic propagation mode // *JETP LETTERS* – 2022. – Т. 115. – №. 2. – С. 80–88. <https://doi.org/10.31857/S1234567822020033>
- Moradi, A., Heidari, A., Amini, K., Aghadavoudi, F., Abedinzadeh, R.** The effect of shot peening time on mechanical properties and residual stress in Ti-6Al-4V alloy // *Metallurgical Research & Technology*. – 2022. – Т. 119. – №. 4. – С. 401. <https://doi.org/10.1051/metal/2022036>
- Maharjan, N., Chan, S. Y., Ramesh, T., Nai, P. G., Ardi, D. T.** Fatigue performance of laser shock peened Ti6Al4V and Al6061-T6 alloys // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2021. – Т. 44. – №. 3. – С. 733–747. <https://doi.org/10.1111/ffe.13390>
- Kim, R., Suh, J., Shin, D., Lee, K. H., Bae, S. H., Cho, D. W., Yi, W.** G.FE analysis of laser shock peening on STS304 and the effect of static damping on the solution // *Metals*. – 2021. – Т. 11. – №. 10. – С. 1516. DOI: 10.3390/met11101516
- Fabbro, R., Fournier, J., Ballard, P., Devaux, D., Virmont, J.** Physical study of laser-produced plasma in confined geometry // *Journal of applied physics*. – 1990. – Т. 68. – №. 2. – С. 775–784. <https://doi.org/10.1063/1.346783>
- Sun B., Qiao H., Zhao J.** Accurate numerical modeling of residual stress fields induced by laser shock peening // *AIP Advances*. – 2018. – Т. 8. – №. 9. – С. 095203. DOI: 10.1063/1.5039674
- Johnson G. R.** A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures // *Proc. 7th Inf. Sympo. Ballistics*. – 1983. – С. 541–547.
- Amarchinta, H. K., Grandhi, R. V., Langer, K., Stargel, D. S.** Material model validation for laser shock peening process simulation // *Modelling and simulation in materials science and engineering*. – 2008. – Т. 17. – №. 1. – С. 015010. DOI 10.1088/0965-0393/17/1/015010
- Hu Y., Grandhi R.V.** Efficient numerical prediction of residual stress and deformation for large-scale laser shock processing using the eigenstrain methodology // *Surface and Coatings Technology*, 2012, Vol. 206, No. 15, P. 3374–3385. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.01.050
- Li, X., He, W., Luo, S., Nie, X., Tian, L., Feng, X., & Li, R.** Simulation and experimental study on residual stress distribution in titanium alloy treated by laser shock peening with flat-top and Gaussian laser beams // *Materials*. – 2019. – Т. 12. – №. 8. – С. 1343. DOI: 10.3390/ma12081343
- Rondepierre, A., Sollier, A., Videau, L., & Berthe, L.** Review on laser interaction in confined regime: Discussion about the plasma source term for laser shock applications and simulations // *Metals*. – 2021. – Т. 11. – №. 12. – С. 2032. <https://doi.org/10.3390/met11122032>