

Научная статья

## Численный анализ остаточных напряжений при двухстороннем симметричном лазерном ударном упрочнении тонких пластин из титанового сплава ВТ6

М.Л. Бартоломей<sup>1</sup>, А.Ю. Изюмова<sup>1</sup>, Е.А. Гачегова<sup>1</sup>, А.Н. Вшивков<sup>1</sup>, О.А. Плехов<sup>1</sup>, С. Сваруп<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

<sup>2</sup> Технологический институт Веллора, Веллор, Индия

Технология лазерного ударного упрочнения позволяет создать на глубину более 1 мм остаточные напряжения первого рода (по Давиденкову) в приповерхностной зоне изделий, изготовленных из металлов и сплавов. Широкие экспериментальные исследования показывают, что лазерное ударное упрочнение существенно улучшает их механические свойства, повышает усталостный ресурс, защищает от коррозии. Однако при применении данной технологии к изделиям достаточно малой толщины (например, кромкам турбинных лопаток, лезвиям режущих инструментов) необходимо подбирать такие параметры лазерного импульсного воздействия, которые не вызовут деформации. В данной статье представлен подход к численному моделированию процесса формирования полей остаточных напряжений в результате лазерного ударного упрочнения при уменьшении толщины изделий с 3 до 0.35 мм с варьированием величины и последовательности приложения лазерного импульса. Для моделирования распространения упругопластических волн использовалось определяющее соотношение Джонсона–Кука. Далее осуществлялся статический расчет распределения остаточных напряжений с учетом созданных полей пластических деформаций. Полученные поля остаточных напряжений сравнивались между собой при разных условиях воздействия на изделие: с одной стороны; при последовательной обработке с двух сторон; при двухсторонней симметричной обработке. Проведенный анализ распространенных полей напряжений показал, что для образования поля сжимающих остаточных напряжений в приповерхностной зоне изделий, толщина которых менее 1 мм, эффективно применение двухстороннего симметричного воздействия. При таком упрочнении удастся избежать выгибания изделий и формирования полей растягивающих напряжений. Выявлено, что увеличение интенсивности энергии лазерного удара позволяет, с одной стороны, повысить (по модулю) величину минимального главного остаточного напряжения (сжимающего) в зоне обработки, а с другой стороны, увеличить максимальное главное остаточное напряжение (растягивающее, уравновешивающее) на удалении от зоны воздействия.

*Ключевые слова:* лазерное ударное упрочнение, остаточные напряжения, конечно-элементное моделирование, титановые сплавы

*Получение:* 10.06.2024 / *Публикация онлайн:* 30.12.2024

УДК 539.4

### 1. Введение

Лазерное ударное упрочнение (ЛУ упрочнение) позволяет значительно улучшить усталостные характеристики и прочностные свойства изделий из металлов и металлических сплавов. В основе технологии лежит эффект, описанный в 1960-х годах [1, 2], который заключается в возможности вызывать пластическую деформацию в металлических материалах посредством высокоэнергетического лазерного короткоимпульсного воздействия. За счет применения данной технологии в различных отраслях промышленности удастся увеличить циклическую долговечность изделий, повысить их прочностные характеристики и коррозионную стойкость, поэтому интерес к процессу ЛУ упрочнения сохраняется уже на протяжении нескольких десятилетий [3–6]. При лазерной ударной обработке попадание луча на поглощающий слой поверхности изделия способствует образованию плазмы, при расширении которой формируется упругопластическая волна высокого давления. Волна распространяется в материале и вызывает пластические деформации, вследствие которых возникают остаточные напряжения. Под остаточными напряжениями подразумеваются напряжения, существующие в изделиях при отсутствии внешних воздействий (силовых и температурных).

По сравнению с другими способами поверхностной обработки, например, дробеструйной и пескоструйной, ЛУ упрочнение позволяет инициировать значительные сжимающие остаточные напряжения по величине и глубине [7, 8], а также делает возможной обработку изделий сложной формы [9].

Остаточные напряжения в металлических изделиях классифицируются по разным признакам, но чаще — по протяженности силового поля и его физической сущности. В 1931 году академиком Н.Н. Давиденковым предложена классификация внутренних напряжений, используемая и в настоящее время. Эти напряжения обуславливаются размерами области, внутри которой они являются гомогенными, то есть постоянными по величине и направлению. Если области макроскопические, микроскопические или атомарные, то и напряжения в них разные. Соответственно, они называются внутренними напряжениями первого, второго и третьего рода [10].

Использование для оценки остаточных напряжений (горизонтальных компонент) как неразрушающих (метода рентгеновской дифракции), так и разрушающих (метода Давиденкова, метода поэтапного сверления отверстия) методов показало, что ЛУ упрочнение позволяет сформировать поле сжимающих напряжений до глубины более 1 мм при обработке изделия толщиной в 2 мм и более. Таким образом, с точки зрения введенной ранее в работах [10, 11] классификации остаточных напряжений, под действием ЛУ упрочнения появляются остаточные напряжения первого рода, уравновешенные в пределах области, размеры которой сопоставимы с толщиной обрабатываемого изделия. Основной причиной возникновения остаточных напряжений является несовместность упругих деформаций, отвечающих определенному структурно-масштабному уровню, что обсуждается в [8]. Поскольку полные деформации в рамках континуального рассмотрения всегда совместны, то несовместность упругих деформаций при использовании гипотезы аддитивности различных составляющих деформаций может быть следствием несовместности любых других составляющих тензора деформации (пластической, температурной, трансформационной, обусловленной радиацией и прочим).

В работе [12] авторы приводят результаты анализа изменения усталостной кривой до и после обработки образцов из разных титановых сплавов. В [13] численно моделируется изменение усталостных характеристик до и после лазерной ударной обработки и проводится сравнение с экспериментальными данными. В работе [14] оцениваются физические и механические свойства медицинских имплантов из сплава ВТ6 при применении защищающих их покрытий и варьировании мощности лазера при обработке.

На величину остаточных напряжений и глубину области их формирования влияют не только параметры, с которыми осуществляется ЛУ упрочнение [15], но также последовательность обработки и направление [16], длительность лазерного импульса [17]. При этом не все технологические варианты ЛУ упрочнения обеспечивают структурную целостность [18]. Использование разных оптических линз, степень перекрытия отпечатков (пятен) лазерного луча и мощность лазерного импульса позволяют генерировать различные конфигурации полей остаточных напряжений. Как показано в [19], наилучший эффект от обработки достигается при значениях вызванного упругопластической волной пикового давления, в 2–2.5 раза превышающих предел упругости Гюгонио. По данным, приведенным в [20], предел упругости Гюгонио для сплава ВТ6 для различных вариантов нагружения принимает значения от 1.29 до 3.91 ГПа.

Обработка изделий малой толщины (менее 2 мм) требует подбора режима ЛУ упрочнения для предотвращения появления растягивающих напряжений на обрабатываемой поверхности, сколов и разрушения на противоположной поверхности, вызванных взаимодействием волн и их дифракцией [21]. На величину и глубину сжимающих остаточных напряжений [22] влияет также толщина изделия.

Для определения остаточных напряжений в приповерхностном слое применяются экспериментальные методы неразрушающего контроля, такие как рентгенография, физико-химические, ультразвуковые. Прибегают и к разрушающим методам, например, к методу сверления. Для прогнозирования распределения остаточных напряжений и оценки их величины при разных способах обработки широкое распространение получило математическое моделирование [18, 23], которое позволяет отслеживать изменения полей напряженно-деформированного состояния во всем объеме изделия.

Таким образом, целью настоящей работы является анализ влияния одновременной симметричной обработки лазерным лучом поверхности изделий толщиной, не превышающей 1 мм, изготовленных из сплава ВТ6, на характер распределения в них и величину остаточных напряжений.

## 2. Математическая модель процесса лазерного ударного упрочнения

При моделировании процесса ЛУ упрочнения не принимается во внимание испарение материала с поверхности и образование плазмы, имеющей высокое давление. Влияние лазерного импульса учитывается путем задания на поверхности функции механического давления, зависящей от времени. Расчет напряженно-деформированного состояния, вызванного этим нагружением, производится в конечно-элементном пакете ANSYS.

Математическая модель формирования остаточных напряжений при ЛУ упрочнении в представительном объеме материала включает закон сохранения импульса и определяющие соотношения, описывающие связь между полями напряжений и деформаций. Необходимо отметить, что характерный размер представительного объема для рассматриваемого (макроскопического) физического явления минимум на порядок превышает средний размер зерна в материале.

При отсутствии массовых сил уравнение движения (закон сохранения импульса) записывается в виде:

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} = \rho \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2}, \quad (1)$$

где  $t$  — время,  $\boldsymbol{\sigma}$  — тензор напряжений Коши,  $\rho$  — плотность материала,  $\mathbf{u}$  — вектор перемещений.

Полная деформация  $\boldsymbol{\epsilon}$  в приближении малых деформаций представляется следующим образом

$$\boldsymbol{\epsilon} = \frac{1}{2} (\text{grad } \mathbf{u} + \text{grad } \mathbf{u}^T). \tag{2}$$

Используя гипотезу аддитивного разложения, приращение полной деформации  $d\boldsymbol{\epsilon}$  можно выразить через приращения упругой ( $d\boldsymbol{\epsilon}^{el}$ ) и пластической ( $d\boldsymbol{\epsilon}^{pl}$ ) составляющих:

$$d\boldsymbol{\epsilon} = d\boldsymbol{\epsilon}^{el} + d\boldsymbol{\epsilon}^{pl}. \tag{3}$$

В случае изотропного материала напряжения Коши определяются по закону Гука:

$$\boldsymbol{\sigma} = \lambda \varepsilon_{vol}^{el} \mathbf{I} + 2\mu \boldsymbol{\epsilon}^{el}, \tag{4}$$

где  $\mathbf{I}$  — единичный тензор,  $\varepsilon_{vol}^{el}$  — объемная часть упругой деформации,  $\lambda, \mu$  — параметры Ламе, которые рассчитываются по известным значениям модуля Юнга  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ .

Согласно ассоциированному закону пластического течения, скорость пластической деформации определяется как

$$d\boldsymbol{\epsilon}^{pl} = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}, \tag{5}$$

где  $d\lambda$  — пластический множитель, задаваемый в соответствии с условием Прагера,  $F$  — поверхность текучести.

В случае изотропного упрочнения поверхность текучести представляется в виде:

$$F = \sigma_{eq} - \sigma_y(\varepsilon_{eq}^{pl}). \tag{6}$$

Здесь  $\sigma_{eq}$  — эквивалентное напряжение;  $\varepsilon_{eq}^{pl}$  — эквивалентная пластическая деформация;  $\sigma_y(\varepsilon_{eq}^{pl})$  — функция, определяющая значение предела текучести.

Для замыкания системы уравнений (1)–(6) необходимо добавить уравнение, позволяющее рассчитывать значение  $\sigma_y(\varepsilon_{eq}^{pl})$ . Для рассматриваемых образцов из титанового сплава ВТ6 оно определялось по модели Джонсона–Кука, параметры которой находились экспериментально:

$$\sigma_y = \left[ A + B(\varepsilon_{eq}^{pl})^n \right] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_{eq,0}^{pl}} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right], \tag{7}$$

в силу простой и ясной процедуры идентификации материальных констант и возможности описывать распространение упругопластических волн в материале с высокой точностью [24]. В (7) приняты обозначения:  $\sigma_y$  — эквивалентные напряжения на поверхности текучести при одноосном нагружении;  $\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl}$  — интенсивность скорости пластической деформации;  $\dot{\varepsilon}_{eq,0}^{pl}$  — опорная скорость интенсивности пластической деформации;  $A, B, C, n$  — параметры, характеризующие неупругое поведение материала;  $T$  — температура материала при испытании;  $T_0$  — температура окружающей среды;  $T_m$  — температура плавления материала; параметр  $m$  отвечает за температурное разупрочнение. Параметры модели и физико-механические константы приведены в таблицах 1, 2.

**Таблица 1.** Константы модели упрочнения Джонсона–Кука для титанового сплава ВТ6

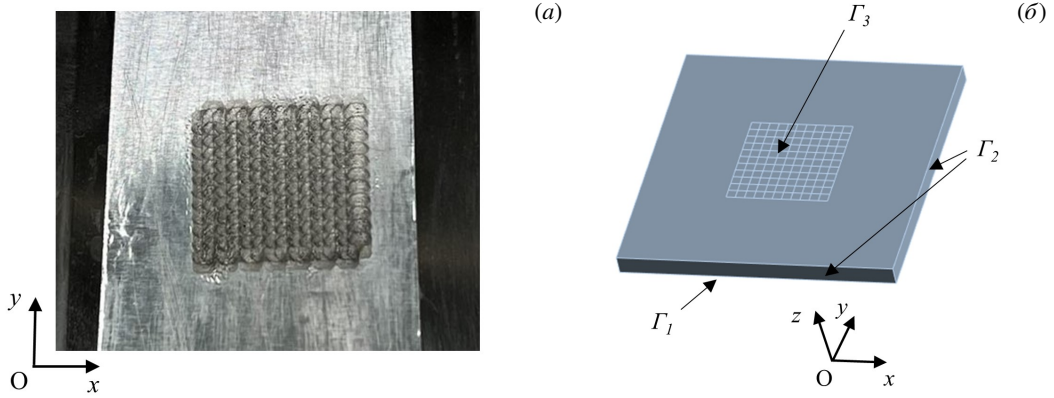
$A$ , МПа	$B$ , МПа	$C$	$n$	$\dot{\varepsilon}$
978	826	0.639	0.034	0.005

**Таблица 2.** Физические константы титанового сплава ВТ6

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , ГПа	$\nu$
4424	113	0.324

В данной работе обсуждаются исключительно механические последствия ЛУ обработки, поэтому переменные, связанные с температурными эффектами, в модели не учитываются [25]. Моделирование процесса проводилось при температуре окружающей среды без учета влияния температуры плавления и коэффициента температурного разупрочнения. При этом модель Джонсона–Кука является одним из широко распространенных эмпирических соотношений для описания деформирования металлов при высоких скоростях нагружения. Ее преимущество заключается в простоте использования и возможности идентификации параметров по данным ограниченного числа испытаний и вне связи с другими параметрами, изолированно.

Появление упругопластических волн происходит вследствие воздействия импульса давления прикладываемого к границе образца. При ЛУ упрочнении обрабатываемая поверхность покрывается жидкостью (водой), инерция



**Рис. 1.** Геометрия образца из сплава ВТ6: обработанная пластинка, покрытая фольгой (а), схема расчетной области для вычислений по модели (1)–(9) (б)

которой сказывается на амплитуде ударной волны (увеличивает ее). При численном моделировании образования остаточных напряжений для учета изменения давления во времени рассматривался треугольный импульс:

$$P(t) = \begin{cases} \frac{t}{t_1} P_{peak}, & 0 \leq t < t_1, \\ \frac{t_2 - t}{t_1} P_{peak}, & t_1 \leq t < t_2, \end{cases} \quad (8)$$

где  $t_1$ ,  $t_2$  — времена нарастания и убывания давления. Пиковое значение давления  $P_{peak}$  рассчитывалось в соответствии с моделью абляции (испарения вещества с поверхности при нагреве) в ограниченной среде, предложенной R. Fabbro [26]:

$$P_{peak} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} ZI. \quad (9)$$

Здесь  $Z = 2Z_w Z_t / (Z_w + Z_t)$ , где  $Z_w$  и  $Z_t$  — акустические импедансы воды и материала поглощающего слоя (покрытия обрабатываемой поверхности) [13];  $\alpha$  — корректирующий множитель;  $I$  — плотность энергии излучения.

Верификация применяемой математической модели формирования остаточных напряжений выполнена в работе [27], где проведено сравнение профиля остаточных напряжений, измеренного экспериментально, с построенным по данным численного моделирования на примере пластины толщиной 3 мм из материала ВТ6. Лазером обрабатывалась область размерами  $11 \times 11$  мм без перекрытий лазерных пятен, имеющих форму квадрата  $1 \times 1$  мм. На рисунке 1 показана фотография образца после ЛУ обработки и соответствующая расчетная схема. Профили остаточных напряжений ( $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ ) после ЛУ обработки в один проход и после повторной обработки в том же режиме приведены на рисунке 2. Результаты экспериментальных измерений величины остаточных напряжений получены методом сверления отверстий [28], согласно стандарту Американского общества по испытанию материалов (ASTM E837-13a).

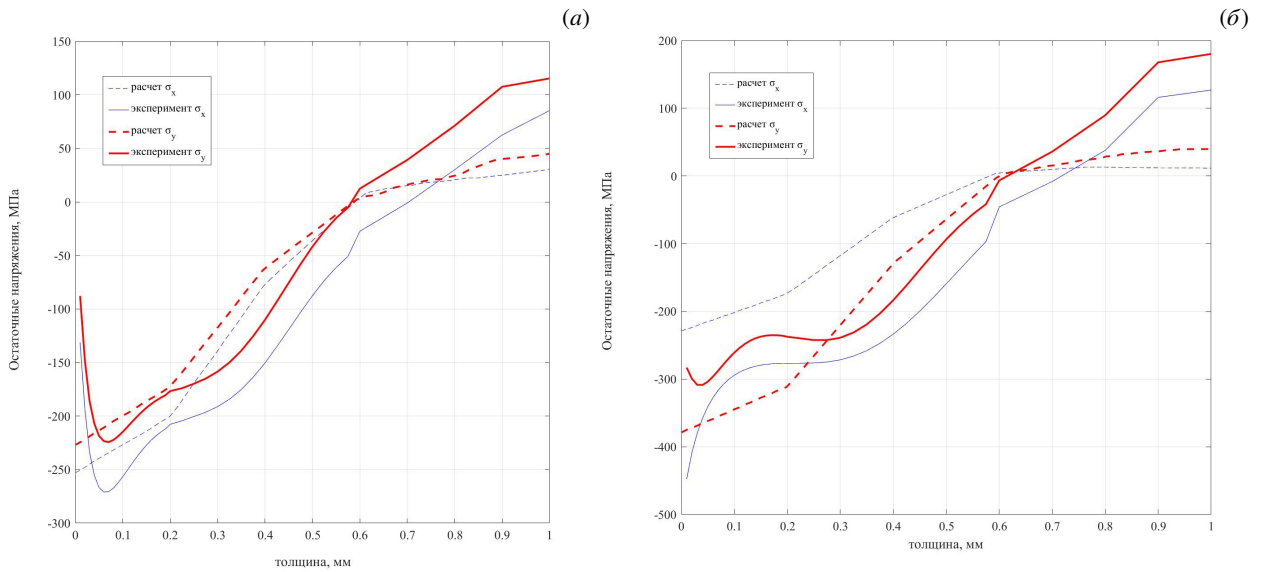
При численном расчете использованы следующие граничные условия:

- нижняя поверхность пластинки закреплена, то есть отсутствуют вертикальные перемещения  $u_z|_1 = 0$ ;
- боковые поверхности пластинки свободны от нагрузки  $\sigma \cdot n|_2 = 0$ ;
- в зоне обработки, расположенной на верхней поверхности образца, задано механическое давление  $\mathbf{P}$  (длительность одного импульса составляет 60 нс)  $\sigma \cdot n|_3 = \mathbf{P}$ .

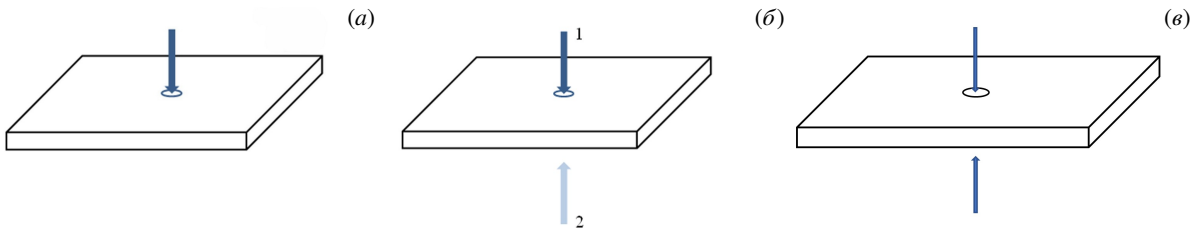
Дискретизация расчетной области проводилась при помощи 8-узловых гексаэдральных конечных элементов с линейными функциями формы. Для расчета профилей остаточных напряжений сетка вблизи места приложения нагрузки сгущалась и состояла из элементов с размером стороны 20 мкм. По мере удаления к границам пластины размер стороны элемента увеличивался до 2000 мкм. Общее число элементов расчетной сетки равнялось 149590.

### 3. Сравнительный анализ остаточных напряжений при одиночном ударе

Описанная численная модель применена далее для определения величины и характера остаточных напряжений



**Рис. 2.** Профили остаточных напряжений после одного (а) и двух последовательных (б) проходов лазерного луча по поверхности



**Рис. 3.** Воздействия при ЛУ обработке: удар с одной стороны (а), последовательные удары с одной стороны, а затем с противоположной ей (б), одновременный симметричный удар разделенным на 2 пучка лучом лазера (в)

в пластине при изменении ее толщины и последовательности нагружения. Оценивается, как меняется глубина упрочнения и профиль остаточных напряжений в материале в случае одиночного лазерного удара:

- при изменении толщины образца (пластинки);
- удар производится с одной стороны (Рис. 3а);
- сначала лазер ударяет по одной стороне образца, а затем по противоположной ей (Рис. 3б);
- при разделении лазерного луча на 2 пучка с энергией излучения, равной половине исходного значения (Рис. 3в).

При одиночном ударе с одной стороны (Рис. 3а) и поочередных ударах с одной и с другой сторон прикладывалось давление  $P_{peak} = 4.2$  ГПа; при одновременном ударе лучом, разделенным на 2 пучка (Рис. 3в) рассматривалось два варианта давления:  $P_{peak} = 2.1$  ГПа и  $P_{peak} = 4.2$  ГПа.

Численное исследование проведено на квадратном образце (пластине)  $40 \times 40$  мм при толщине 0.35, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0 и 3.0 мм. Энергия импульса составляла 2 Дж, плотность энергии —  $6.37$  ГВт/см<sup>2</sup>. Моделировалось воздействие лазерного луча с круглым пятном диаметром 2 мм. Полученные профили остаточных напряжений сравнивались друг с другом для каждой толщины (Рис. 4). При вычислении пикового давления по формуле (9) для данных параметров обработки его значение равнялось  $P_{peak} = 4,2$  ГПа.

По характеру распределений остаточных напряжений в образцах (на поверхности обработки и по толщине) при варьировании последовательности приложения и величины нагрузки сделаны следующие выводы:

- 1) При достаточно малой толщине пластины (Рис. 4а, б) одиночный лазерный удар с одной стороны инициирует на поверхности, к которой прикладывается давление, растягивающие остаточные напряжения.
- 2) Разделение лазерного луча на 2 одновременных удара, когда давление менее 2.1 ГПа, приводит к образованию на поверхности обработки сжимающих остаточных напряжений, составляющих менее 100 МПа и не зависящих от толщины образца; в некоторых случаях напряжения на поверхности являются растягивающими (Рис. 4б, г).
- 3) Последовательные удары (сначала с одной стороны, потом с противоположной) для толщин менее 1 мм

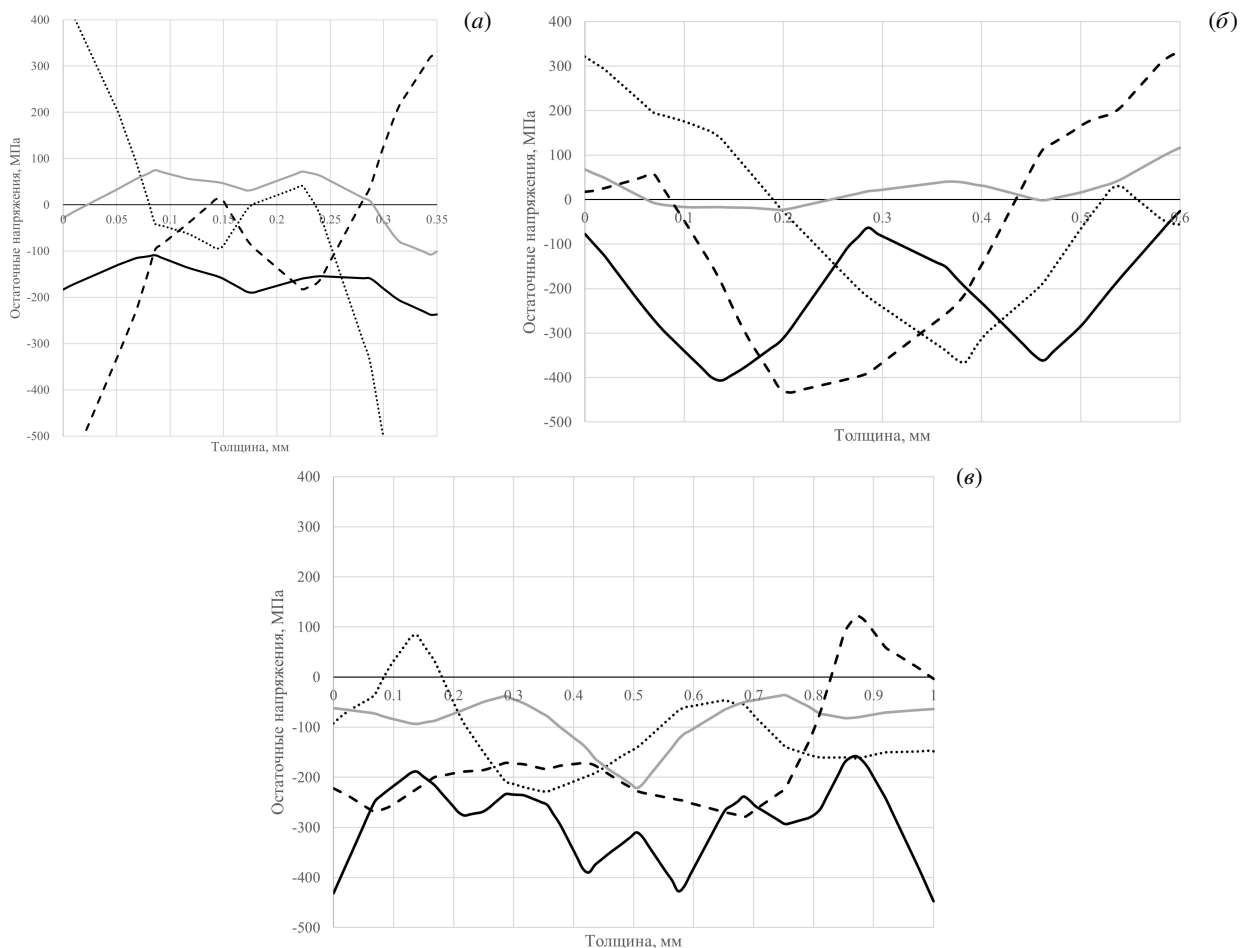
(также, как и в пункте 1) на поверхности приложения нагрузки вызывают растягивающие остаточные напряжения.

4) Одновременная обработка двух противоположных поверхностей пластины, когда давление с каждой стороны составляет 4.2 ГПа, способствует формированию сжимающих остаточных напряжений на поверхности образца при всех толщинах. Для толщин от 1 мм и менее напряжения имеют характер сжимающих по всей толщине. Если толщина более 1 мм, по толщине наблюдается чередование зон с растягивающими и сжимающими напряжениями.

#### 4. Конечно-элементный анализ остаточных напряжений при симметричной двухсторонней обработке тонкой пластины

Результаты расчета в пакете ANSYS остаточных напряжений в тонкой пластинке при двухсторонней симметричной обработке сравнивались с данными, измеренными экспериментально в работе [29] с помощью метода рентгеновской дифракции. На основе оптимизации процесса в ходе экспериментов авторами [29] установлено, что наиболее эффективно лазерное пятно диаметром 1.2 мм. Лазерному воздействию подвергалась область размерами около  $40 \times 6$  мм на поверхности образца. Толщина образца равнялась 0.35 мм. Степень перекрытия пятен лазерного луча составила 50%, энергия лазерного излучения — 2.8 Дж, длительность импульса — 18 нс. На рисунке 5 показан оптимизированный режим ЛУ обработки, позволяющий избежать абляции обработанной поверхности и образования растягивающих напряжений на кромке образца при последовательном облучении [29]. Обрабатываемая поверхность была покрыта черной лентой (толщиной примерно 0.1 мм) и слоем воды (толщиной 1–2 мм). На рисунке 6 приведена схема нанесения лазерных ударов, использованная в [29] и в настоящей работе при численном моделировании для верификации модели формирования поля остаточных напряжений.

Для сравнения экспериментальных и расчетных профилей остаточных напряжений по толщине образца,



**Рис. 4.** Распределение остаточных напряжений по толщине образца при ее разных значениях, мм: 0.35 (а), 0.6 (б), 1.0 (в), 1.5 (г), 2.0 (д), 3.0 (е)

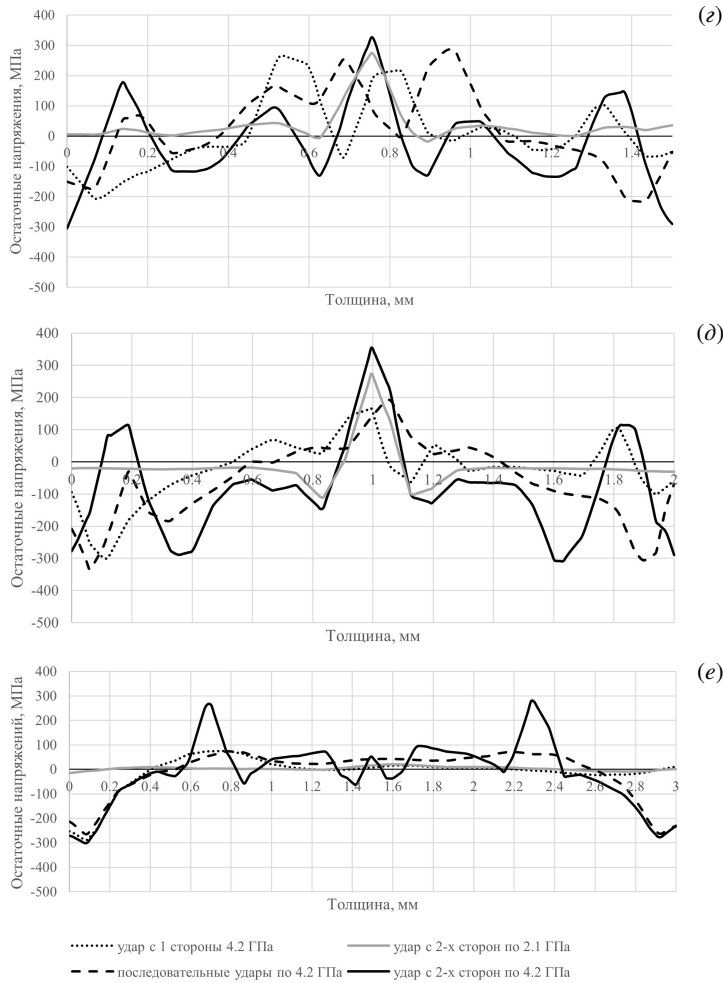


Рис. 4. Продолжение

действующих в плоскости, ортогональной приложенной нагрузке, на рисунке 7 показано их распределение. По всей толщине сформировались сжимающие остаточные напряжения, что свидетельствует о благоприятном сценарии, который может применяться при обработке реальных изделий. В то же время за пределами обработанной зоны, согласно данным численного эксперимента (см. Рис. 8), появляются области растягивающих остаточных напряжений, в которых может произойти образование трещин и разрушение. Таким образом, для дальнейшей оценки работоспособности упрочненного изделия необходимо проводить, например, численное моделирование при нагрузках, соответствующих эксплуатационным.

## 5. Заключение

С помощью пакета ANSYS проведен расчет профилей остаточных напряжений, возникающих в образцах вида тонкой пластины, изготовленных из титанового сплава ВТ6, при разной толщине образцов и различной последовательности лазерной ударной обработки их поверхности. Используемая для расчета модель не рассматривает процесс образования плазмы, имеющей высокое давление, а описывает упрочнение за счет остаточных напряжений, которые инициируются в материале упругопластическими волнами, возникающими при ее расширении. Результаты численного моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Двухстороннее симметричное воздействие при ЛУ обработке снижает деформацию в образцах-пластинах при толщине менее 1 мм и в то же время создает поле сжимающих остаточных напряжений на всей поверхностной зоне обработки.

2. Профиль остаточных напряжений по глубине образца, построенный по данным численного моделирования для предложенной схемы обработки тонкой пластины толщиной 0.35 мм, соответствует данным, замеренным

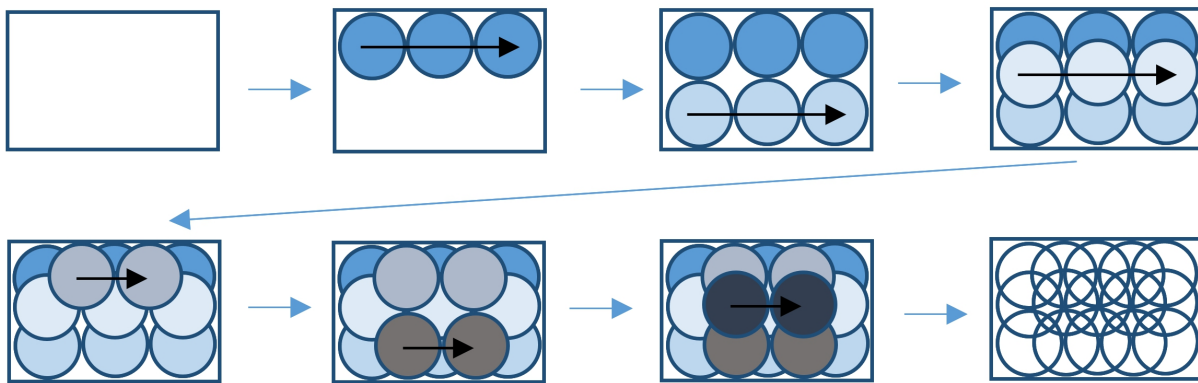


Рис. 5. Последовательность ЛУ обработки (положения лазерных пятен), описанная в [29]

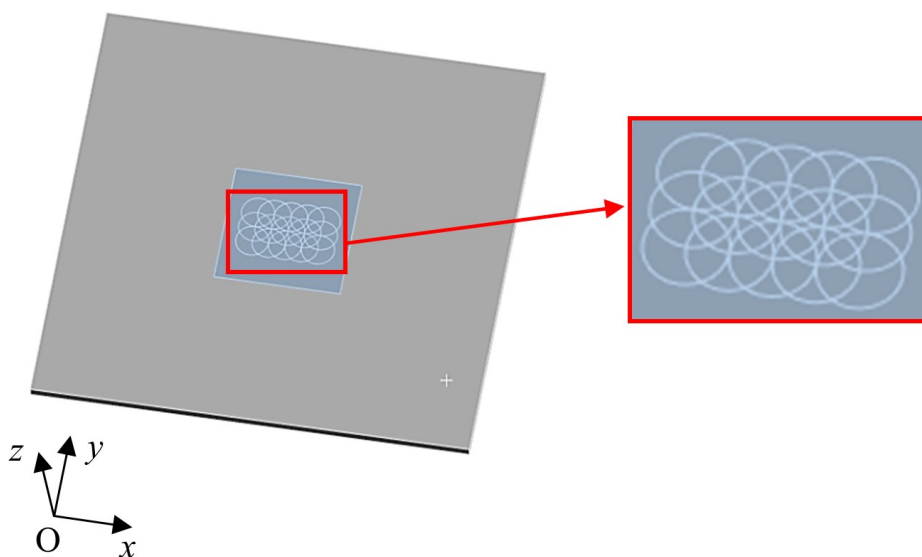


Рис. 6. Расчетная схема для численного моделирования и зона ЛУ обработки в увеличенном масштабе

экспериментально методом рентгеновской дифракции.

3. При эксплуатации изделий в виде пластин необходимо учитывать, что после двухстороннего симметричного ЛУ упрочнения за пределами обработанной области на поверхности формируется зона с растягивающими остаточными напряжениями, что может привести к смещению мест зарождения дефектов.

Измерения остаточных напряжений и математическая постановка задачи ЛУ упрочнения выполнены А.Ю. Изюмовой, Е.А. Гачеговой, А.Н. Вшивковым, О.А. Плеховым в рамках государственного задания (регистрационный номер темы 124020700047-3). Численное моделирование и анализ полученных данных осуществлены М.Л. Бартоломей при финансовой поддержке Министерства образования и науки Пермского края (соглашение № С-26/829).

## Литература

1. Askar'yan G.A., Moroz É.M. Pressure on evaporation of matter in a radiation beam // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics. 1963. Vol. 43. P. 1638–1639.
2. White R.M. Elastic Wave Generation by Electron Bombardment or Electromagnetic Wave Absorption // Journal of Applied Physics. 1963. Vol. 34. P. 2123–2124. DOI: 10.1063/1.1729762
3. Peyre P., Fabbro R. Laser shock processing: a review of the physics and applications // Optical and Quantum Electronics. 1995.



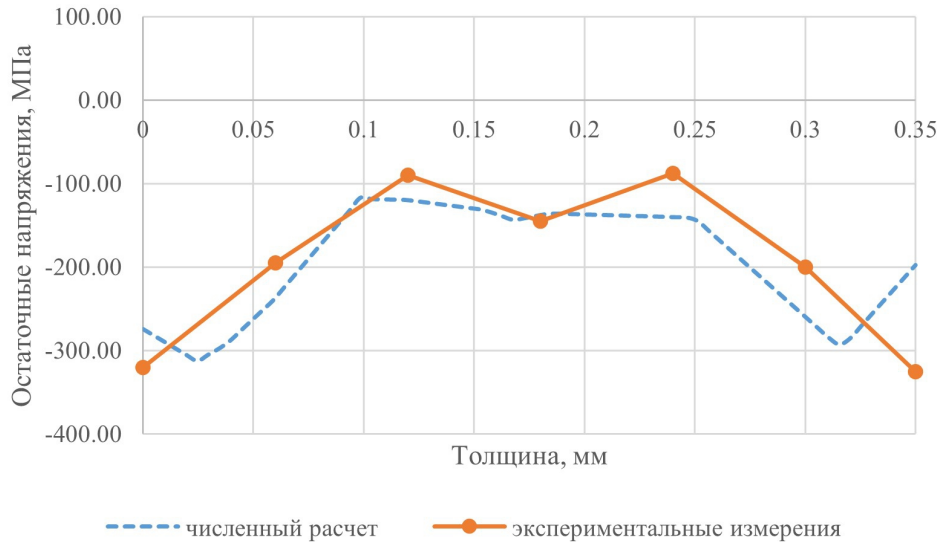


Рис. 7. Распределение остаточных напряжений по толщине пластины после ЛУ обработки

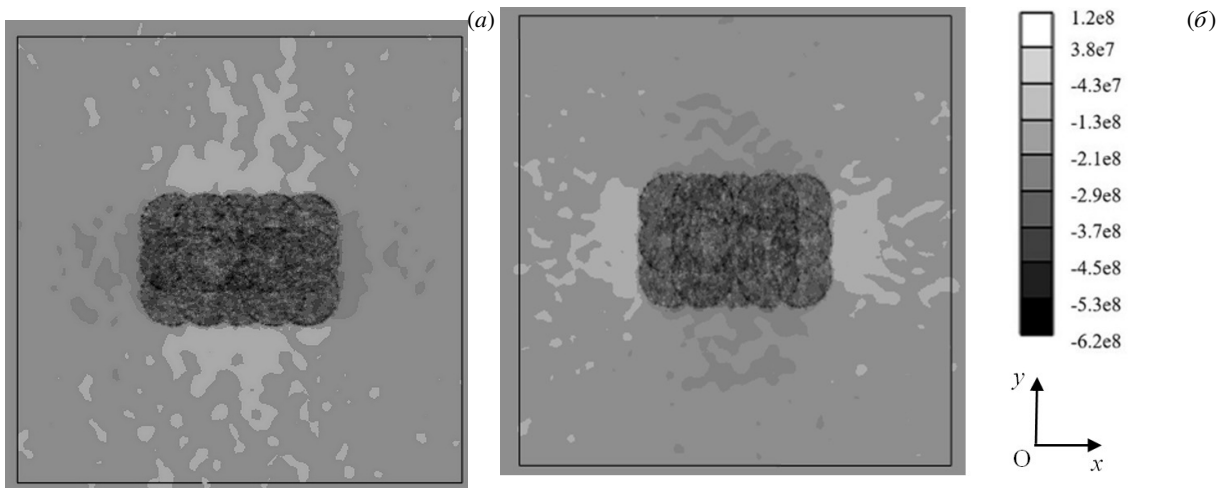


Рис. 8. Остаточные напряжения на обработанной поверхности пластины:  $\sigma_x$  (а),  $\sigma_y$  (б)

Vol. 27. P. 1213–1229. DOI: 10. 1007/BF00326477

4. *Peyre P., Scherpereel X., Berthe L., Fabbro R.* Current trends in laser shock processing // *Surface Engineering*. 1998. Vol. 14, no. 5. P. 377–380. DOI: 10. 1179/sur. 1998. 14. 5. 377
5. *Clauer A.H.* Laser Shock Peening, the Path to Production // *Metals*. 2019. Vol. 9, no. 6. 626. DOI: 10. 3390/met9060626
6. *Clauer A.H.* A historical perspective on laser shock peening // *Metal Finishing News*. 2009. Vol. 10. P. 18–19.
7. *Gujba A.K., Medraj M.* Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening // *Materials*. 2014. Vol. 7. P. 7925–7974. DOI: 10. 3390/ma7127925
8. *Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В.* Остаточные напряжения: теория и приложения. М.: Наука, 1982. 109 с.
9. *Tang Z., Gao J., Xu Z., Guo B., Jiang Q., Chen X., Weng J., Li B., Chen J., Zhao Z.* Effect of Laser Shock Peening on the Fatigue Life of 1Cr12Ni3Mo2VN Steel for Steam Turbine Blades // *Coatings*. 2023. Vol. 13. 1524. DOI: 10. 3390/coatings13091524
10. *Давиденков Н.Н.* К вопросу о классификации и проявлении остаточных напряжений // *Заводская лаборатория*. 1959. № 3. С. 318–319.
11. *Биргер А.И.* Остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1963. 223 с.

12. *Pan X., Li X., Zhou L., Feng X., Luo S., He W.* Effect of Residual Stress on S–N Curves and Fracture Morphology of Ti6Al4V Titanium Alloy after Laser Shock Peening without Protective Coating // *Materials*. 2019. Vol. 12, no. 22. 3799. DOI: 10.3390/ma12223799
13. *Ouyang P., Luo X., Dong Z., Zhang S.* Numerical Prediction of the Effect of Laser Shock Peening on Residual Stress and Fatigue Life of Ti-6Al-4V Titanium Alloy // *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 16. 5503. DOI: 10.3390/ma15165503
14. *Bakhtiari M., Fayazi Khanigi A., Seyed-Salehi M., Farnia A.* Ti6Al4V Bone Implants: Effect of Laser Shock Peening on Physical, Mechanical, and Biological Properties // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023. DOI: 10.1007/s11665-023-08511-2
15. *Cao Z., Xu H., Zou S., Che Z.* Investigation of Surface Integrity on TC17 Titanium Alloy Treated by Square-spot Laser Shock Peening // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2012. Vol. 25. P. 650–656. DOI: 10.1016/S1000-9361(11)60429-9
16. *Kallien Z., Keller S., Ventzke V., Kashaev N., Klusemann B.* Effect of Laser Peening Process Parameters and Sequences on Residual Stress Profiles // *Metals*. 2019. Vol. 9. 655. DOI: 10.3390/met9060655
17. *Sun R., He G., Bai H., Yan J., Guo W.* Laser Shock Peening of Ti6Al4V Alloy with Combined Nanosecond and Femtosecond Laser Pulses // *Metals*. 2022. Vol. 12. 26. DOI: 10.3390/met12010026
18. *Achintha M., Nowell D.* Residual stress in geometric features subjected to laser shock peening // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2014. Vol. 229, no. 11. P. 1923–1938. DOI: 10.1177/0954406214550511
19. *Ballard P., Fournier J., Fabbro R., Frelat J.* Residual stresses induced by laser-shocks // *Le Journal de Physique IV*. 1991. Vol. 1. P. 487–494. DOI: 10.1051/jp4:1991369
20. *Канель Г.И., Гаркушин Г.В., Разоренов С.В.* Температурно-скоростные зависимости напряжения течения и сопротивления разрушению титанового сплава ВТ6 в условиях ударного нагружения при температурах 20 и 600 °С // *Журнал технической физики*. 2016. Т. 86, № 8. С. 111–117.
21. *Fan Y., Wang Y., Vukelic S., Yao Y.L.* Numerical Investigation of Opposing Dual Sided Microscale Laser Shock Peening // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2007. Vol. 129, no. 2. P. 256–264. DOI: 10.1115/1.2540771
22. *Staden S.N., Polese C., Glaser D., Nobre J.-P., Venter A.M., Marais D., Okasinski J., Park J.-S.* Measurement of residual stresses in different thicknesses of laser shock peened aluminium alloy samples // *Materials Research Proceedings (MRP)*. 2018. Vol. 4. P. 117–122. DOI: 10.21741/9781945291678-18
23. *Базмутов В.П., Денисевич Д.С., Захаров И.Н., Захаров И.Н.* Моделирование связанных процессов формирования остаточных напряжений в металлическом сплаве с учетом трансформации структуры при импульсном термосиловом поверхностном упрочнении // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2022. Т. 15, № 4. С. 449–465. DOI: 10.7242/1999-6691/2022.15.4.35
24. *Кузькин В.А., Михалюк Д.С.* Применение численного моделирования для идентификации параметров модели Джонсона-Кука при высокоскоростном деформировании алюминия // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2010. Т. 3, № 1. С. 32–43. DOI: 10.7242/1999-6691/2010.3.1.4
25. *Kuliiiev R., Keller S., Kashaev N.* Identification of Johnson-Cook material model parameters for laser shock peening process simulation for AA2024, Ti-6Al-4V and Inconel 718 // *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 28. P. 1975–1989. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.11.168
26. *Fabbro R., Fournier J., Ballard P., Devaux D., Virmont J.* Physical study of laser-produced plasma in confined geometry // *Journal of Applied Physics*. 1990. Vol. 68. P. 775–784. DOI: 10.1063/1.346783
27. *Kostina A., Zhelnin M., Swaroop S., Vedernikova A., Bartolomei M.* Finite-element simulation of residual stresses induced by laser shock peening in TC4 samples structurally similar to a turbine blade // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2024. Vol. 18, no. 67. P. 1–11. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.67.01
28. *Rendler N.J., Vigness I.* Hole-drilling strain-gage method of measuring residual stresses // *Experimental Mechanics*. 1966. Vol. 6. P. 577–586. DOI: 10.1007/BF02326825
29. *Tang Y., Li S., Liao Y., Ma Y., Wu X., Chi Y., Lin C., Zhang Y.* Improvement of fatigue life of Ti-6Al-4V alloy treated by double-sided symmetric oblique laser shock peening // *Materials Today Communications*. 2024. Vol. 39. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.109121

## Сведения об авторах:

Бартоломей Мария Леонидовна (корр.), ктн, нс, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, д. 1; e-mail: bartolomei.m@icmm.ru; ORCID: 0009-0003-3193-7605

Изюмова Анастасия Юрьевна, кфмн, нс, ИМСС УрО РАН; e-mail: fedorova@icmm.ru; ORCID: 0000-0002-1769-9175

*Гачегова Елена Алексеевна*, асп., инж., ИМСС УрО РАН; e-mail: gachegova.e@icmm.ru; ORCID: 0000-0001-6849-9889

*Вишников Алексей Николаевич*, б/с, мнс, ИМСС УрО РАН; e-mail: vshivkov.a@icmm.ru; ORCID: 0000-0002-7667-455X

*Плехов Олег Анатольевич*, дфмн, чл.-корр. РАН, внс, ИМСС УрО РАН; e-mail: poa@icmm.ru; ORCID: 0000-0002-0378-8249

*Swaroop Sathya*, PhD, Prof., School of Advanced Sciences, Vellore Institute of Technology (VIT), Vellore, 632014, Tamil Nadu, India; e-mail: n.r.sathya.swaroop@gmail.com; ORCID: 0000-0001-9872-811X