
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 539.3

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БИОМИМЕТИЧЕСКОЙ
ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ**

© 2022 г. Г. Ж. Сахвадзе

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия**e-mail: sakhvadze@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.03.2022 г.

После доработки 13.04.2022 г.

Принята к публикации 20.04.2022 г.

В статье изучается влияние новой технологии биомиметической лазерно-ударно-волновой обработки на коэффициент интенсивности напряжений применительно к образцам из алюминиевого сплава Д16. Разработана 3D конечно-элементная модель для изучения влияния биомиметической лазерно-ударно-волновой обработки на коэффициенты интенсивности напряжений и остаточную усталостную долговечность образцов. Показано, что при такой обработке коэффициенты интенсивности напряжений обработанных образцов эффективно снижаются, что значительно увеличивает их остаточную усталостную долговечность.

Ключевые слова: биомиметика, лазерно-ударно-волновая обработка, остаточные напряжения, коэффициент интенсивности напряжений, остаточная усталостная долговечность, алюминиевый сплав Д16

DOI: 10.31857/S0235711922040125

Наблюдения за природными явлениями, а также проведенные многочисленные эксперименты показывают, что листья растений и крылья насекомых выдерживают длительную переменную нагрузку без растрескивания, что дает основание детально изучить их структуры, чтобы извлечь из них оптимальную форму и размеры для анализа механизма их устойчивости к растрескиванию [1–6]. Например, в работе [3] предложена простая, но эффективная конечно-элементная модель распространения трещин в крыльях стрекозы, где показано, что поперечные жилки в крыльях насекомых являются важными структурными элементами для замедления распространения трещин.

Известно, что технология лазерно-ударно-волновой обработки (ЛУВО) позволяет предотвратить образование трещин и повышает трещиностойкость материалов, в том числе алюминиевых сплавов [7, 8]. ЛУВО вызывает локальную пластическую деформацию на поверхности, а также способствует измельчению зерен с помощью прикладывания мгновенного сверхкороткого высокоэнергетического лазерного импульса, что, в свою очередь, способствует замедлению образования трещин [9, 10].

Таким образом, биомиметика (подход к созданию технологических схем, при котором основные идеи и элементы заимствованы из живой природы) является перспективным методом, который успешно можно применить, например, в сочетании с технологией ЛУВО, для повышения сопротивляемости к распространению трещин (трещиностойкости). Этой цели и посвящена настоящая статья.

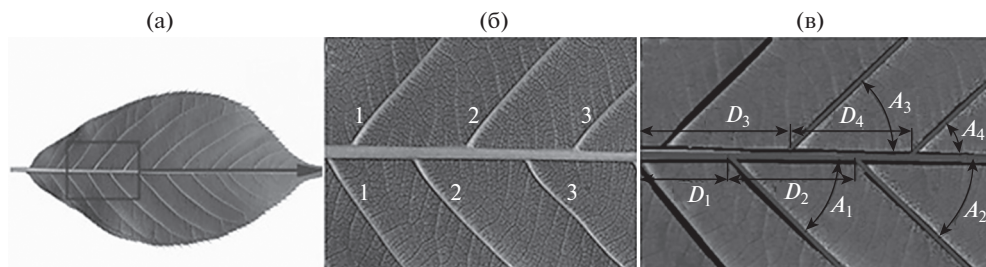


Рис. 1. Извлечение биомиметических параметров из листьев растений: (а) — исследуемая область; (б) — увеличенное изображение исследуемой области; (в) — биомиметические параметры (D_1 – D_4) и (A_1 – A_4).

В настоящей статье исследуются особенности применения так называемой биомиметической лазерно-ударно-волновой обработки (БЛУВО) материалов [11]. При применении БЛУВО возникает синергетический эффект вследствие сочетания классической технологии ЛУВО и теории биомиметики. Из структуры листьев растений извлекаются биомиметические параметры, которые в дальнейшем используются для создания трехмерной конечноэлементной модели, с помощью которой анализируются динамика КИН и, соответственно, остаточная усталостная долговечность образцов из алюминиевого сплава Д16.

На рис. 1 показаны биомиметические параметры, извлеченные из листьев растений (вишни) [11].

Для проектирования различных биомиметических структур, которые в дальнейшем используются при БЛУВО, применяется метод центрального композитного проектирования (МЦКП) [12]. Этот метод генерирует наборы данных, которые равномерно распределяются по всему пространству проектирования. В этой модели случайным образом генерируются множество выборок в соответствии с их параметрами нормального распределения (μ и σ). В табл. 1 приведены отобранные из всего многообразия три характерные модели, которые будут изучаться в дальнейшем.

На рис. 2 показаны значения извлеченных из листьев вишни параметров A_1 и A_2 для моделей М19, М23 и М15.

Как видим, значение параметра A_1 для модели М15 больше, чем для моделей М19 и М23, что, например, на начальном этапе роста трещины должно способствовать большему суммарному углу поворота трещины по сравнению с углами поворота в моделях М19 и М23.

Исследуемый материал. Исследуемый образец — алюминиевый сплав Д16 (зарубежный аналог — алюминиевый сплав 2024-T351) широко используется в авиа- и машиностроении, например, в обшивке самолетов, поскольку обладает хорошими технологи-

Таблица 1. Модели образцов, отобранных для дальнейшего анализа, из множества вариаций, предложенных методом центрального композитного проектирования (МЦКП)

Номер модели образца	Рассчитанные биомиметические параметры				
	D_1	D_2	D_3	D_4	θ°
М15	5.3550	1.7230	0.3086	0.2650	56.2725
М19	0.0370	3.5970	0.4858	0.2650	38.2216
М23	2.2550	0.3140	0.3086	0.4158	38.2216

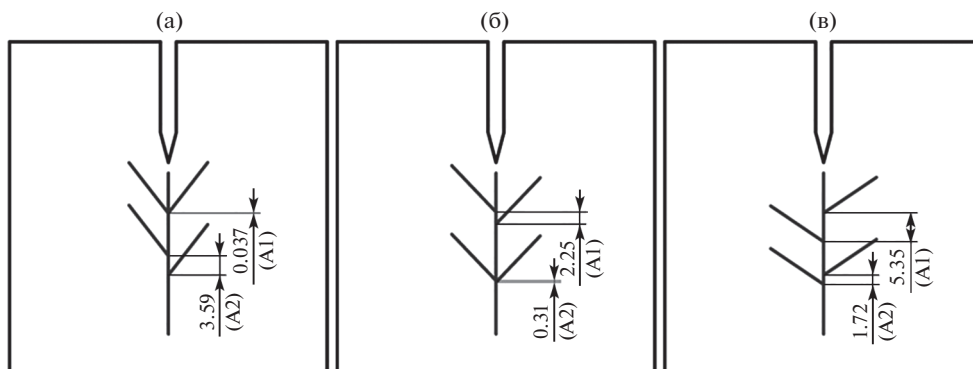


Рис. 2. Схема исследуемых моделей: (а) – М19; (б) – М23; (в) – М15.

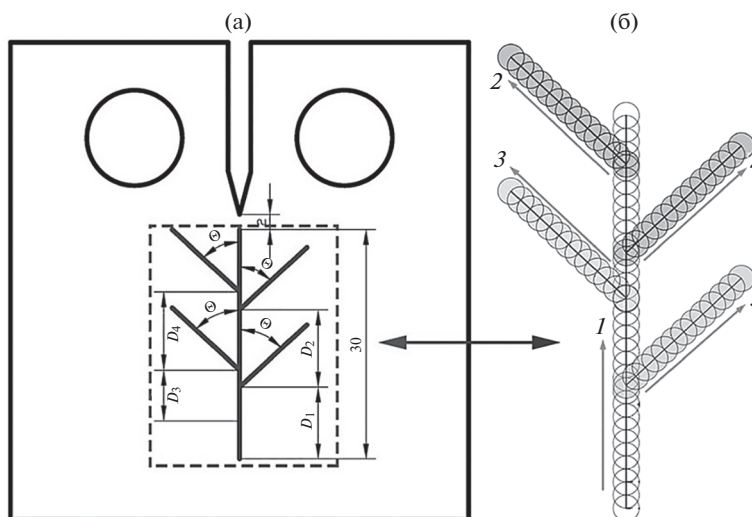


Рис. 3. (а) – схематизация биомиметической ЛУВО (БЛУВО); (б) – направления сканирования вдоль главной жилы 1 и четырех вторичных жил 2–5.

ческими свойствами, высокой прочностью и уникальным соотношением прочность/плотность.

Исследуемый образец моделируется пластинкой с длиной 62.5 мм, шириной 60 мм и толщиной 2 мм (рис. 3). Граничные условия – защемление по краям (особенности моделирования подробнее приведены в [12]).

Процесс моделирования БЛУВО разделяется на два этапа: на этап воздействия лазерного импульса и на этап релаксации [12]. Конечноэлементная модель (КЭМ) исследуемого образца разработана в пакете Abaqus. Этап лазерного импульсного воздействия обычно моделируется явным решателем (Abaqus/explicit). По окончании явного анализа результаты воздействия последнего лазерного импульса становятся в качестве начальных условий. Затем используется неявный анализ (Abaqus/Standard) для моде-

лирования стадии релаксации напряжений. На этом этапе динамические процессы в образце уже релаксированы и достигнуто состояние статического равновесия.

Расчет коэффициентов интенсивности напряжений с помощью M -интеграла. Для исследования задачи по определению КИН в растянутом образце с трещиной используется теория линейного упругого разрушения, с помощью которой определяются поля напряжений вокруг вершины трещины [13–18]. Кроме того, будем считать, что имеем плоское напряженное состояние. Тогда расчеты обычно ведутся с помощью J -интеграла [19]

$$J = \frac{1}{A_q} \int_V \left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} - W \delta_{1j} \right) \frac{\partial q}{\partial x_j} dV, \quad i, j = 1, 2, 3; \quad (1)$$

$$W = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}, \quad (2)$$

где A_q – это фактическая суммарная площадь распространяющейся трещины; V – контур интегрирования; σ_{ij} – тензор напряжений; ε_{ij} – тензор деформации; $i, j = 1, 2, 3$ – координаты вершины трещины x, y и z , (в расчетах – x_1, x_2, x_3); u_i – перемещение у вершине трещины; W – плотность энергии деформации линейного упругого тела; q – функция, используемая при численном счете, она равна единице у вершины трещины и равна нулю в любой другой произвольной точке области интегрирования; δ_{1j} – символ Кронекера.

Обозначив через K_I , K_{II} и K_{III} коэффициент s интенсивности упругих напряжений, J -интеграл можно записать через КИН следующим образом [19]:

$$J = \frac{1 - \nu^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1 + \nu}{E} K_{III}^2, \quad (3)$$

где E – модуль упругости материала; ν – коэффициент Пуассона.

В соответствии с принципом суперпозиции, тензор напряжений, тензор деформаций, а также тензор перемещений можно записать в виде суммы

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(1)} + \sigma_{ij}^{(2)}, \quad \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{(1)} + \varepsilon_{ij}^{(2)}, \quad u_{ij} = u_{ij}^{(1)} + u_{ij}^{(2)}, \quad (4)$$

где верхний индекс (1) обозначает данных, полученных с помощью конечноэлементного моделирования, а верхний индекс (2) представляет собой данные аналитического решения у вершины трещины. В таких случаях часто вместо классического J -интеграла используется т.н. M -интеграл [19], формулу которого получим, подставляя (4) в (1)

$$M^{(1,2)} = \frac{1}{A_q} \int_V \left(\sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} + \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1} - W^{(1,2)} \delta_{1j} \right) \frac{\partial q}{\partial x_j} dV. \quad (5)$$

Поскольку материал линейно-упругий, коэффициенты интенсивности напряжений также можно записать в виде суммы (по аналогии с тензорами напряжений, деформаций и перемещений)

$$K_I = K_I^{(1)} + K_I^{(2)}, \quad K_{II} = K_{II}^{(1)} + K_{II}^{(2)}, \quad K_{III} = K_{III}^{(1)} + K_{III}^{(2)}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (3), получим окончательную формулу для определения M -интеграла через КИН

$$M^{(1,2)} = \frac{2(1 - \nu^2)}{E} K_I^{(1)} K_I^{(2)} + \frac{2(1 - \nu^2)}{E} K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)} + \frac{2(1 + \nu)}{E} K_{III}^{(1)} K_{III}^{(2)}. \quad (7)$$

При численном анализе для определения коэффициентов интенсивности напряжений K_i поступаем по схеме, предложенной в [19]: верхний индекс (1) выбирается в ка-

честве интересующего нас решения: $K_i^{(1)} = K_i$, а верхний индекс (2) принимается равным единице: $K_i^{(2)} = 1$. Два других коэффициента интенсивности напряжений принимаются равными нулю как для верхнего индекса (1), так и для индекса (2). Подставляя эти значения в уравнение (10) и приравнявая уравнения (8) и (10), получаем окончательные уравнения для определения КИН

$$\begin{aligned} K_I &= \frac{E}{2(1-\nu^2)} \frac{1}{A_q} \int_V \left(\sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} + \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1} - W^{(1,2)} \delta_{1j} \right) \frac{\partial q}{\partial x_j} dV, \\ K_{II} &= \frac{E}{2(1-\nu^2)} \frac{1}{A_q} \int_V \left(\sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} + \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1} - W^{(1,2)} \delta_{1j} \right) \frac{\partial q}{\partial x_j} dV, \\ K_{III} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{A_q} \int_V \left(\sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} + \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1} - W^{(1,2)} \delta_{1j} \right) \frac{\partial q}{\partial x_j} dV, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\sigma_{ij}^{(1)}$ и $u_i^{(1)}$ получаются с помощью МКЭ-анализа, а $\sigma_{ij}^{(2)}$ и $u_i^{(2)}$ — аналитического решения (как видим, при такой постановке задачи $K_I = K_{II}$).

Граничные условия образцов при БЛУВО для расчета коэффициентов интенсивности напряжений — заземление по краям. Одноосная растягивающая нагрузка направлена вдоль положительного направления оси X , величина нагрузки составляет 800 Н, частота составляет 10 Гц, а коэффициент асимметрии — 0.1. Следовательно, максимальная и минимальная растягивающая нагрузка цикла нагружения для расчета коэффициентов интенсивности напряжения составляют 800 Н и 80 Н, соответственно. Растягивающее приспособление располагается в двух специально сделанных отверстиях, где левая точка является неподвижной точкой, а правая точка — точкой приложения растягивающей нагрузки (рис. 4). Предварительно изготовлена усталостная трещина длиной 4 мм.

Определение остаточной усталостной долговечности. Уравнение для прогнозирования остаточной усталостной долговечности (в литературе применяется также термин “остаточный усталостный ресурс”) для изделий машиностроения можно получить из формулы Пэриса [19]

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m, \quad (9)$$

где C и m — материальные константы, полученные экспериментально; ΔK — диапазон изменения коэффициента интенсивности напряжений (K_I); a_0 , a_c — начальная длина трещины и критическая длина трещины, соответственно. Путем интегрирования уравнения (9) получаем формулу для определения остаточной усталостной долговечности изделия

$$N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{C (\Delta K)^m} da. \quad (10)$$

Полученные результаты и их анализ. Влияние БЛУВО на коэффициент интенсивности напряжений и остаточную усталостную долговечность. Коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) в процессе распространения усталостной трещины в материале определяются с помощью M -интеграла. Как показывают расчеты, КИН выбранных 60 образцов, обработанных по технологии БЛУВО, по сравнению с необработанным образцом, уменьшаются, правда, с разной степенью.

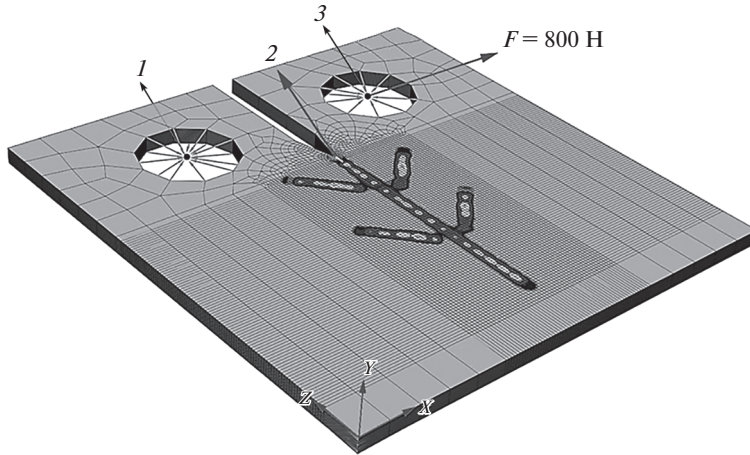


Рис. 4. Схема 3D конечноэлементного моделирования технологии ЛУВО: 1, 3 – центральные точки установок растягивающего приспособления; 2 – заранее сделанная усталостная трещина длиной 4 мм; 3 – точка приложения растягивающей нагрузки.

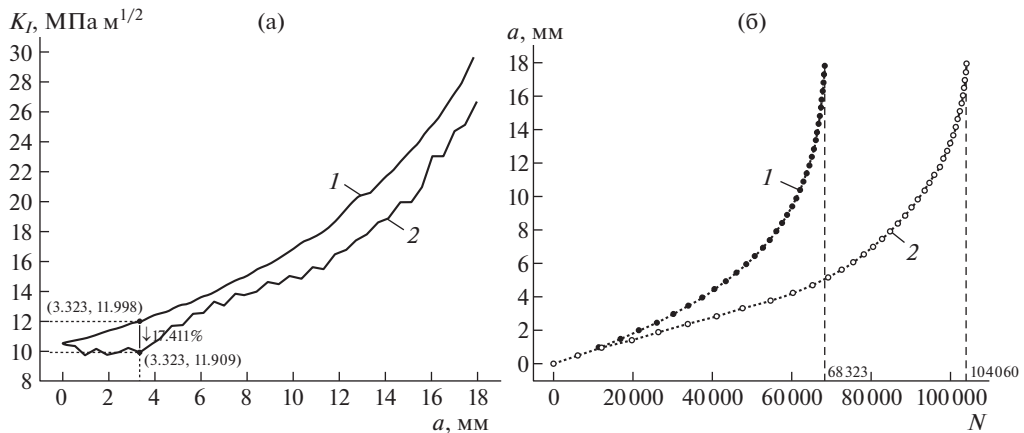


Рис. 5. (а) – изменение коэффициента интенсивности напряжений K_I в зависимости от длины трещины a ; (б) – изменение остаточной усталостной долговечности N в зависимости от длины трещины a для модели М19.

1 – необработанный образец; 2 – образец после БЛУВО.

Изменения коэффициента интенсивности напряжений и остаточной усталостной долговечности для модели М19 показаны на рис. 5а, б.

Как видим, по сравнению с необработанным образцом, коэффициенты интенсивности напряжений для модели М19, обработанной по технологии БЛУВО, уменьшаются, а остаточная усталостная долговечность – увеличивается. Коэффициент интенсивности напряжений у вершины трещины максимально снижается при распространении трещины на 3.323 мм – на 17.411% (с 11.998 $\text{МПа м}^{1/2}$ до 9.909 $\text{МПа м}^{1/2}$).

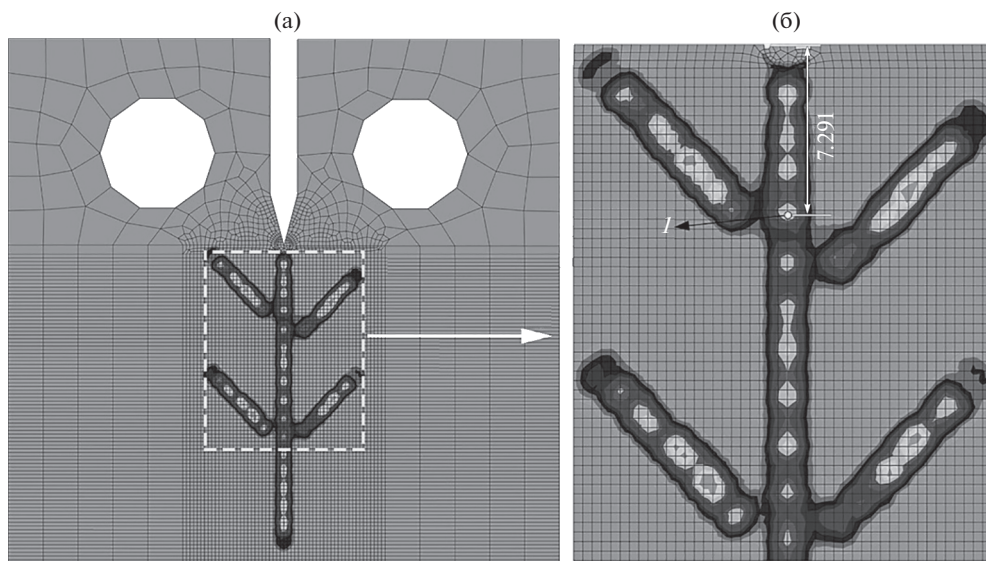


Рис. 6. (а) – распределения остаточных напряжений в модели М19; (б) – увеличенное изображение зоны БЛУВО.

I – зона максимального снижения коэффициента интенсивности напряжений у вершины трещины.

Из рис. 6 показано распределение остаточных напряжений в модели М19. Видно, что область максимального снижения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) находится в области БЛУВО.

Основная причина этого явления заключается в том, что сжимающие остаточные напряжения (СОН), возникающие при БЛУВО, по модулю намного превосходят растягивающие остаточные напряжения (РОН), что способствует тому, что часть растягивающей нагрузки, приложенной к образцам, уравнивается сжимающими остаточными напряжениями. Следовательно, в области БЛУВО резко снижается КИН и повышается остаточная усталостная долговечность. Таким образом, имеем, что остаточная усталостная долговечность модели М19, обработанной по технологии БЛУВО, увеличивается на 152.3% (с 68 323 до 104 060) по сравнению с необработанным образцом.

Таким образом, на коэффициент интенсивности напряжений влияют как остаточные напряжения, так и биомиметические структуры, возникшие при БЛУВО на поверхности исследуемого материала. Образец, обработанный с использованием технологии БЛУВО, демонстрирует лучшую способность к замедлению распространения трещины, при этом остаточная усталостная долговечность образцов значительно увеличивается, а скорость роста трещин – снижается.

Выводы. Разработана 3D конечноэлементная модель, моделирующая технологию БЛУВО, где классическая технология ЛУВО гармонично сочетается с теорией биомиметики, обеспечивая получение синергетического эффекта. Показано, что коэффициент интенсивности напряжений образцов, обработанных по технологии БЛУВО, меньше, чем у необработанного образца, т.к. сжимающие остаточные напряжения, расположенные в приповерхностной области, уравнивают часть растягивающей нагрузки, приложенной к образцам. Соответственно, у образцов, обработанных по технологии БЛУВО, повышается остаточная усталостная долговечность. Показано,

что биомиметические структуры, возникшие при БЛУВО на поверхности исследуемого материала, также повышает остаточную усталостную долговечность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jing Z., Zhou H., Zhang P. et al.* Effect of thermal fatigue on the wear resistance of graphite cast iron with bionic units processed by laser cladding WC // *Appl. Surf. Sci.* 2013. V. 271. P. 329.
2. *Rajabi H., Darvizeh A., Shafiei A. et al.* Numerical investigation of insect wing fracture behavior // *J. Biomech.* 2015. V. 48. P. 89.
3. *Zhang Z., Zhang L., Yu Z. et al.* Liang, In-situ mechanical test of dragonfly wing veins and their crack arrest behavior // *Micron.* 2018. V. 110. P. 67.
4. *Wang C., Huang Y., Zan Q. et al.* Biomimetic structure design – a possible approach to change the brittleness of ceramics in nature // *Mater. Sci. Eng.* 2000. V. 11 (1). P. 9.
5. *Zhang Z., Ren L., Zhou H. et al.* Effect of thermal fatigue loading on tensile behavior of H13 die steel with biomimetic surface // *J. Bionic Eng.* 2010. V. 7 (4). P. 390.
6. *Wu L., Wang T., Hu Y. et al.* A method for improving the crack resistance of aluminum alloy aircraft skin inspired by plant leaf // *Theor. Appl. Fract. Mech.* 2020. V. 106. P. 102444.
7. *Liao Y., Ye C., Cheng G.J.* A review: Warm laser shock peening and related laser processing technique // *Opt. Laser Technol.* 2016. V. 78. P. 15.
8. *Sun R., Li L., Zhu Y., Guo W. et al.* Microstructure, residual stress and tensile properties control of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy with laser shock peening // *J. Alloy. Compd.* 2018. V. 747. P. 255.
9. *Yang K., Li J., Wang Q. et al.* Effect of laser remelting on microstructure and wear resistance of plasma sprayed Al₂O₃-40%TiO₂ coating // *Wear.* 2019. V. 426–427. P. 314.
10. *Liu J., Wu L., Song M. et al.* Crack resistance behaviour of aluminium alloy for aircraft skin with bionic coupling units processed by laser cladding // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2020. V. 43. P. 2756.
11. *Сахвадзе Г.Ж., Сахвадзе Г.Г.* Особенности остаточных напряжений, возникающих при биомиметической лазерно-ударно-волновой обработке // *Проблемы машиностроения и автоматизации.* 2022. № 1. С. 54.
12. *Keller S., Chupakhin S., Staron P. et al.* Experimental and numerical investigation of residual stresses in laser shock peened AA2198 // *J. Mater. Process. Technol.* 2018. V. 255. P. 294.
13. *Dorman M., Toparli M., Smyth N. et al.* Effect of laser shock peening on residual stress and fatigue life of clad 2024 aluminium sheet containing scribe defects // *Mater. Sci. Eng.: A.* 2012. V. 548. P. 142.
14. *Adu-Gyamfi S., Ren X.D., Larson E.A. et al.* The effects of laser shock peening scanning patterns on residual stress distribution and fatigue life of AA2024 aluminium alloy // *Opt. Laser Technol.* 2018. V. 108. P. 177.
15. *Sakhvadze G.Zh., Sakhvadze G.G., Kavtaradze R.Z.* Increasing the Crack Resistance of Materials by Means of Laser Shock Processing // *Russian Engineering Research.* 2021. V. 41. № 1. P. 27.
16. *Huang S., Sheng J., Wang Z. et al.* Finite element and experimental analysis of elevated-temperature fatigue behavior of IN718 alloy subjected to laser peening // *Int. J. Fatigue.* 2020. V. 131. 105337.
17. *Song M., Wu L., Liu J. et al.* Effects of laser cladding on crack resistance improvement for aluminum alloy used in aircraft skin // *Opt. Laser Technol.* 2021. V. 133. 106531.
18. *Bohan L., Wang C., Junliang D. et al.* Numerical simulation on laser shock peening of TC4 titanium alloy // *J. Aerospace Power.* 2021. V. 5.
19. *Hu Y., Song M., Liu J. et al.* Effects of stop hole on crack turning, residual fatigue life and crack tip stress field // *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2020. V. 42 (5).