

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИН В МЕТАЛЛЕ

*Сахвадзе Г.Ж., Пугачев М.С., Сахвадзе Г.Г.*

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г.Москва*

**Ключевые слова:** лазерно-ударно-волновая обработка (ЛУВО), распределение остаточных напряжений, коэффициент интенсивности остаточных напряжений (КИН), трещина.

**Аннотация.** Рассмотрено применение технологии ЛУВО для повышения трещиностойкости изделий из металлов. Разработана численная модель для оценки эквивалентных коэффициентов интенсивности напряжений, позволяющая анализировать усталостную долговечность и скорость роста трещины в металлах в зависимости от места и технологических параметров ЛУВО. Определены оптимальные режимы обработки в зависимости от расположения и геометрии трещины, снижающие её скорость распространения.

## EFFECT LASER SHOCK PROCESSING TECHNOLOGY ON THE PROPAGATION OF CRACKS IN METAL

*Sakhvadze G.Zh., Pugachev M.S., Sakhvadze G.G.*

*Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow*

**Keywords:** laser shock processing (LSP), residual stress distribution, residual stress intensity factor (RSIF), crack.

**Abstract.** The use of LSP to increase the crack resistance of metal products is considered. A numerical model has been developed for estimating equivalent stress intensity coefficients, which allows analyzing fatigue life and crack growth rate in metals depending on the location and technological parameters of the LSP. The optimal treatment modes depending on the location and geometry of the crack, which reduce its propagation speed, were determined by calculation.

Одной из современных инновационных технологий повышения механических свойств ответственных изделий является технология лазерно-ударно-волновой обработки материалов (ЛУВО). Основными преимуществами этой технологии является возможность обработки с высокой точностью поверхности неоднородных изделий со сложной геометрией, незначительное тепловое воздействие с ограниченным уровнем деформации [1].

ЛУВО проводится мощным лазерным импульсом, который воздействует на поверхность изделия, покрытую двумя тонкими слоями. Наружный слой прозрачный в виде воды или стекла, а внутренний поглощающий в виде краски, которая при воздействии лазером превращается в плазму и взрывается, оказывая высокое импульсное давление на поверхность изделия. Распространяясь в приповерхностную область и деформируя её, возникшая ударная волна формирует сжимающие остаточные напряжения (подробнее об особенностях применения ЛУВО – в [1-2]).

На развитие усталостных трещин, имеющих в приповерхностной области, оказывает существенное влияние величина и вид остаточных напряжений [1]. Применение ЛУВО может существенно повысить ресурс изделий, подвергающихся усталостному нагружению, например валов,

подшипников, зубчатых колес, которые применяются в большинстве отраслей промышленности.

Целью работы являлось исследование влияния ЛУВО на распространение трещин в зависимости от технологических параметров обработки и видов трещин.

Была разработана численная модель, объединяющая метод конечных элементов (МКЭ) с анализом коэффициента интенсивности напряжений (КИН) [2], для оценки влияния остаточных напряжений, создаваемых ЛУВО, на распространение трещин в образцах. С помощью этой модели исследовали различные режимы ЛУВО.

Для оценки напряженно-деформированного состояния в качестве определяющего соотношения использовалась модель пластического деформирования материала Джонсона-Кука [2]:

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + C\dot{\bar{\epsilon}}^*)[1 - (T^*)^m], \quad (5)$$

где  $\sigma$  – эквивалентное напряжение по Мизесу,  $\bar{\epsilon}$  – эквивалентная пластическая деформация,  $\dot{\bar{\epsilon}}^* = \dot{\bar{\epsilon}} / \dot{\bar{\epsilon}}_0$  – безразмерная эквивалентная скорость деформации ( $\dot{\bar{\epsilon}}_0 = 1.0 \text{ с}^{-1}$ ),  $T^*$  – гомологическая температура, связь которой с абсолютной температурой  $T$  определяется следующим образом:

$$T^* = (T - T_0) / (T_m - T_0), \quad (2)$$

где  $T_0$  – комнатная температура,  $T_m$  – температура плавления материала образца.

Уравнение (1) содержит пять материальных констант, которые определяются эмпирическим путем:  $A$  – статический предел текучести,  $B$  – модуль деформационного упрочнения,  $n$  – показатель степени в законе деформационного упрочнения,  $C$  – коэффициент скорости деформаций,  $m$  – показатель степени в законе температурного разупрочнения. Материальные константы применялись для алюминиевого сплава В95 [3].

Для определения коэффициента интенсивности напряжений при смешанных режимах нагружения использовался эквивалентный коэффициент интенсивности напряжений, основанный на критерии пороговых КИН [3]. На основе анализа напряжений в критической плоскости [4], использовали критерий, связывающий усталостные свойства с КИН при смешанных режимах нагружения:

$$\sqrt{\left(\frac{k_1}{K_{I,th}}\right)^2 + \left(\frac{k_2}{K_{II,th}}\right)^2 + A\left(\frac{k^H}{K_{I,th}}\right)^2} = B, \quad (3)$$

где  $K_{I,th}$  и  $K_{II,th}$  – пороговые значения КИН (максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений, при которых трещина не растет в течение заданного числа циклов нагружения) при нагружениях по направлениям  $x$  или  $y$ , соответственно. Их отношение  $s = K_{II,th} / K_{I,th}$ .  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k^H$  – параметры, связанные с нагружением, которые определялись из уравнений [4].

Для исследования влияния остаточных напряжений на усталостную долговечность, в уравнении (3) коэффициенты интенсивности пороговых напряжений ( $K_{I,th}$  и  $K_{II,th}$ ), заменяли на КИОН ( $\delta k_1$  и  $\delta k_2$ ). После, этого эквивалентный КИН определялся формулой:

$$\frac{1}{B} \sqrt{(\delta k_1)^2 + \left(\frac{\delta k_2}{s}\right)^2} + A(\delta k^H)^2 = \delta k'_{mix}, \quad (4)$$

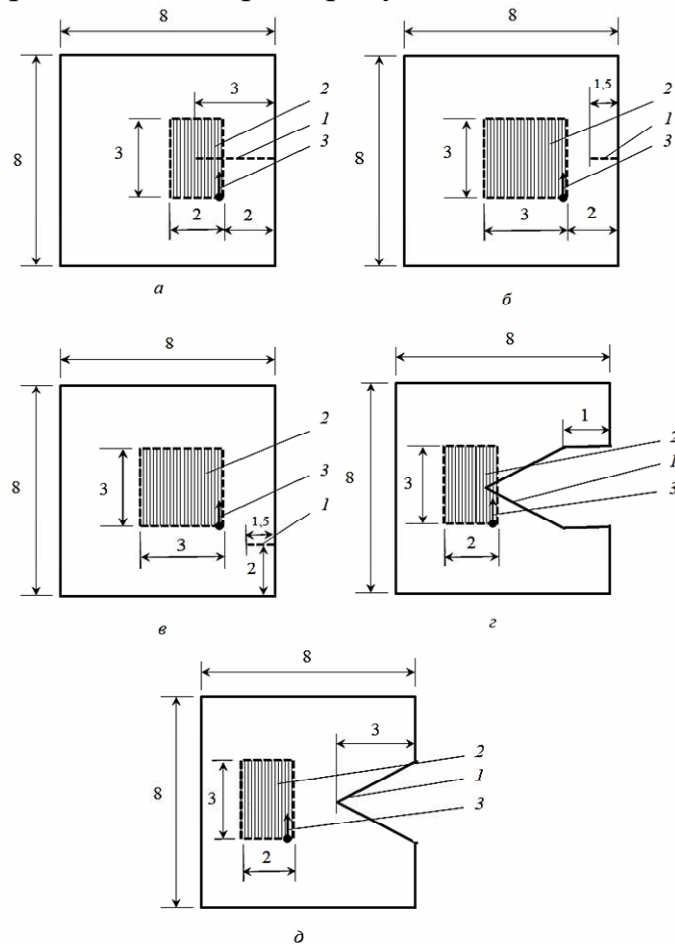
Так как уравнение (4) не учитывает знак КИН, необходимо сжимающие и растягивающие напряжения рассчитать по-отдельности. Окончательное уравнение для определения эквивалентных КИОН при смешанном режиме нагружения принимало вид:

$$\delta K_{mix} = (\delta k'_{mix})_t - (\delta k'_{mix})_c, \quad (5)$$

где  $(\delta k'_{mix})_t$  рассчитывалось из уравнения (4) с использованием только положительной части остаточных КИН,  $(\delta k'_{mix})_c$  – с использованием только отрицательной (сжимающей) части.

Используя эквивалентные КИОН, был проведен анализ усталостной долговечности и темпы роста трещин, а также оптимизировали параметры воздействия ЛУВО.

Исследовались пять наиболее распространенных трещин с различным расположением в образце и геометрией рисунок 1.



3 – направление сканирования: ЛУВО начинается с точки в правом нижнем углу и заканчивается в точке в левом верхнем углу

Рис. 1. Различные режимы ЛУВО на образцах с «линейной» трещиной (а – в) и «V-образной» трещиной (г – д), сканирования происходят с пересечением кончика трещины (а, г) и без пересечения кончика трещин лазерными лучами (б, в, д): 1 – трещина, 2 – область ЛУВО (заштрихованные области)

Было выявлено, что для линейных трещин ЛУВО должна покрывать максимально возможную область трещины, для V-образной трещины, ЛУВО должна проводиться на расстоянии 2 мм от кончика трещины, для исключения появления растягивающих остаточных напряжений вдоль пути распространения трещины.

Максимальный эффект ЛУВО достигается при симметричной обработке по отношению к трещине и вытянутой в направлении перпендикулярном пути распространения трещины.

Таким образом, проведенные исследования позволили подтвердить положительное влияние ЛУВО на распространение трещин в металле при определенных технологических параметрах обработки в зависимости от вида трещин.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Соглашение о предоставлении субсидии № 075-15-2019-1865 от 02.12.2019 г. (внутренней номер соглашения: 05.607.21.0300), проект RFMEFI60719X0300.*

#### Список литературы

1. Сахвадзе Г.Ж., Кавтарадзе Р.З., Натриашвили Т.М., Сахвадзе Г.Г. Усталостная долговечность материалов, упрочненных по технологии лазерно-ударно-волновой обработки // Вестник машиностроения. 2019. № 10. С. 79-85.
2. Сахвадзе Г.Ж. Конечноэлементное моделирование технологии многократной лазерно-ударно-волновой обработки материалов с использованием метода собственных деформаций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 5. С. 91-98.
3. Achintha M., Nowell D., Fufari D., Sackett E.E., Bache M.R. Fatigue behaviour of geometric features subjected to laser shock peening: experiments and modelling // Int. J. Fatigue. 2014. № 62. P. 171-179.
4. Liu Y., Mahadevan S. Threshold stress intensity factor and crack growth rate prediction under mixed-mode loading // Eng. Fract. Mech. 2007. Vol.74. P. 332-345.

#### Сведения об авторах:

*Сахвадзе Геронтий Жорович* – д.т.н., главный научный сотрудник, ИМАШ РАН, г.Москва;

*Пугачев Максим Сергеевич* – научный сотрудник, ИМАШ РАН, г.Москва;

*Сахвадзе Георгий Геронтиеви*ч – младший научный сотрудник, ИМАШ РАН, г.Москва.