# — НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ —

УДК 539.3

# ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ

### © 2020 г. Г. Ж. Сахвадзе

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

> Поступила в редакцию 07.02.2020 г. Принята к публикации 27.03.2020 г.

В статье разрабатывается численная модель, позволяющая прогнозирование влияния технологии лазерно-ударно-волновой обработки материалов на возникновение новых трещин, а также на характер распространения уже существующих трещин. Исследуются линейные трещины и так называемые V-образные трещины. Определяются возникающие при лазерно-ударно-волновой обработке поля остаточных напряжений. Выявлены оптимальные режимы лазерно-ударно-волновой обработки в смысле максимального замедления скорости распространения трещин. Полученные результаты хорошо согласовываются с экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* лазерно-ударно-волновая обработка, метод конечных элементов, остаточные напряжения, коэффициент интенсивности напряжений, скорость роста трещины, трещиностойкость

DOI: 10.31857/S0235711920040124

Лазерно-ударно-волновая обработка (ЛУВО) материалов – это новая технология обработки поверхностей, которая широко используется для улучшения усталостных характеристик особо ответственных высоконагруженных деталей машин. Во время процесса ЛУВО лазерный импульс высокой мощности проникает через прозрачный слой (обычно это слой воды или стекло) и фокусируется на защитном слое, нанесенном на исследуемом образце, который сразу же ионизируется и становится высокотемпературной плазмой [1-6]. Затем эта плазма взрывается и создает высокое давление (порядка нескольких ГПа) в течение очень короткого промежутка времени (10-20 нс), что приводит к генерированию сжимающих остаточных напряжении (СОН) на поверхности и в приповерхностных областях материалов. Поскольку общеизвестно, что усталостная трещина может быть остановлена или замедлена при наличии СОН вдоль пути распространения трещины [4], следует ожидать, что технология ЛУВО способна улучшить усталостные характеристики путем создания СОН. Эти преимущества, безусловно, делают ЛУВО перспективной технологией упрочнения поверхностей для улучшения усталостной долговечности и трещиностойкости, особенно для небольших и важных высоконагруженных деталей, таких как подшипники, зубчатые колеса, валы. Они обычно часто используются в аэрокосмической, энергетической, машиностроительной и биомедицинской промышленности.

Методика проведения исследований. Опишем общую методологию, использованную в настоящей работе. Разработанная численная модель (ЧМ) состоит из двух частей: 1) МКЭ-анализ (МКЭ – метод конечных элементов) с использованием метода конечных элементов (МКЭ, на рис. 1 обведена пунктирными линиями) с целью моделиро-



Рис. 1. Блок-схема численного анализа.

вания технологии ЛУВО и определения остаточных напряжений (OH), и 2) КИН-анализ (КИН –коэффициент интенсивности напряжений). Процедура МКЭ проводилась с использованием конечноэлементного пакета Abaqus. Сначала проводятся подготовительные вычисления и определяются: модель материала, условия нагружения и степень дискретизации сетки (рис. 1). Поле ОН, полученное из процедуры МКЭ, используются в качестве входных данных в модели для КИН-анализа (для получения коэффициента интенсивности остаточных напряжений – КИОН). Общая блок-схема численного моделирования представлена на рис. 1. Исследования провиделись для алюминиевого сплава B95.

Исследование динамики коэффициента интенсивности напряжений (КИН). На первом этапе численного анализа (МКЭ) получаем поля распределения остаточных напряжений (OH). На втором этапе следует оценить степень повышения трещиностойкости и усталостной долговечности материала, для чего следует выбрать соответствующие критерии. В настоящей статье будем использовать классический закон распространения трещин (т.н. закон Пэриса) [4]

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K_{\rm eff}^m,\tag{1}$$

где a — длина трещины; N — число циклов нагружения; C и m — постоянные;  $\Delta K_{\text{eff}}$  — диапазон изменения эффективного коэффициента интенсивности напряжений (КИН), характеризующего перепад напряжений.

С помощью уравнения (1) определяется скорость распространения трещины через  $\Delta K_{\text{eff}}$ , которого, в свою очередь, можно определять следующим образом:

$$\Delta K_{\rm eff} = \max(K_{\rm tot}) - \min(K_{\rm tot}),$$

где  $K_{tot}$  – полный КИН. Его можно представить, как суперпозицию остаточного (внутреннего) КИН (т.н. коэффициента интенсивности остаточных напряжений – КИОН), который образован воздействием остаточных напряжений ( $\delta K_{res}$ ), и внешнего КИН, в нашем случае вызванного циклическим нагружением ( $\delta K_{cvc}$ ) [7]

$$K_{\rm tot} = \delta K_{\rm res} + \delta K_{\rm cvc}.$$



Рис. 2. Схема напряженного состояния вблизи вершины трещины.

Следовательно, важной задачей является определение КИОН, вызванные остаточными напряжениями, которые, в свою очередь, вызваны технологией ЛУВО.

Для определения КИОН необходимо изучить напряженное состояние у вершины трещины. Рассмотрим окрестности вершины двухмерной трещины в поле плоского напряженного состояния (рис. 2).

В этом случае возможны следующие варианты нагружения: нормальное нагружение вдоль направления оси *y* (т.н. Мода-I) и чистый сдвиг вдоль направления *x* (т.н. Мода-II). Любое иное нагружение можно рассматривать как суперпозицию этих двух основных. Им соответствуют КИН нормального отрыва  $(K_I)u$  КИН поперечного сдвига  $(K_{II})$  [8]. Для образца с относительно небольшой толщиной *h* КИОН ( $\delta K_I$  и  $\delta K_{II}$ ) можно определить с использованием уравнений [9]

$$\delta K_{\rm I} = \frac{\int_{0}^{a} \int_{0}^{h} \sigma_{22} f(x, a) dh dx}{B},$$

$$\delta K_{\rm II} = \frac{\int_{0}^{a} \int_{0}^{h} \tau_{12} f(x, a) dh dx}{B},$$
(2)
(3)

где  $\sigma_{22}$  и  $\tau_{12}$  – остаточное нормальное напряжение и остаточное напряжение сдвига, соответственно, показанные на рис. 2 (чтобы не перегружать рисунок, парные для  $\tau_{12}$  напряжения не показаны); *a* – длина трещины; *f*(*x*,*a*) – весовая функция. Для краевой трещины в полубесконечном теле весовую функцию можно определить формулой [10]

$$f(x,a) = \frac{1}{\sqrt{\pi a \left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2\right)}} \left[ 1.3 - 0.3 \left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{2}{4}} \right].$$
 (4)

Для практически важных частных случаев, когда имеем нагружения только по направлению *x* или *y*, КИОН можно непосредственно определить с помощью уравнений (2) и (3). Однако в большинстве случаев имеем остаточные напряжения смешанного типа (т.е., они образованы различными комбинациями Моды-I и Моды-II). Чтобы определить КИОН для смешанных режимов нагружения, требуется некая унификация понятия КИОН.

Для унификации определения коэффициента интенсивности напряжений при смешанных режимах нагружения вводится понятие эквивалентного коэффициента интенсивности напряжений  $\delta K_{mix}$ , основанного на критерии пороговых КИН [10]. На основе анализа напряжений в критической плоскости, можно связать усталостные свойства с КИН при смешанных режимах нагружения [10]

$$\sqrt{\left(\frac{k_1}{K_{\mathrm{I},th}}\right)^2 + \left(\frac{k_2}{K_{\mathrm{II},th}}\right)^2 + A\left(\frac{k^H}{K_{\mathrm{I},th}}\right)^2} = B,\tag{5}$$

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  $k^{\rm H}$  – параметры, связанные с нагружением [4]. *A*, *B* и *s* в уравнении (5) – характеристики материала, определяемые из усталостных испытаний. Тогда эквивалентный КИН можно определить формулой [4]

$$\frac{1}{B}\sqrt{\left(\delta k_{1}\right)^{2}+\left(\frac{\delta k_{2}}{s}\right)^{2}+A\left(\delta k^{H}\right)^{2}}=\delta K'_{\text{mix}}.$$
(6)

Сжимающие напряжения и растягивающие напряжения следует рассчитывать поотдельности, так как в уравнение (6) знак КИН не учитывает (они — в квадрате). Следовательно, окончательное уравнение для определения эквивалентных КИН при смешанном режиме нагружения принимает вид

$$\delta K_{\rm mix} = (\delta K'_{\rm mix})_t - (\delta K'_{\rm mix})_c, \tag{7}$$

где  $(\delta K'_{mix})_t$  рассчитывается из уравнения (6) с использованием положительной части остаточных КИН;  $(\delta K'_{mix})_c - c$  использованием отрицательной (сжимающей) части. Зная эквивалентные остаточные КИН, можно провести анализ усталостной долговечности и темпы роста трещин, а также можно оптимизировать параметры воздействия ЛУВО с целью получения требуемых характеристик материалов.

**Результаты и обсуждение.** Были исследованы трещины с различным расположением в образце и различными геометриями. Варьировались длина и место расположения трещины. Выбирались самые распространенные по форме трещины: так называемые "линейные" трещины (рис. 3а, б, в) и "V-образные" трещины (рис. 3г, д).

На рис. 3 показаны различные режимы ЛУВО – сканирования происходят с пересечением (рис. 3а, г) и без пересечения кончика трещин лазерными лучами (рис. 3б, в, д; заштрихованные области – области обработки ЛУВО (позиций 2)).

На основе уравнений (2), (3) были рассчитаны КИОН, сгенерированные при ЛУ-ВО, для всех пяти изучаемых случаев (для Моды-I, Моды-II и эквивалентные КИОН), которые показаны на рис. 4.

Сначала проанализируем динамику изменения КИОН для трех образцов с "линейными" трещинами (рис. 4а—в). Прежде всего, видим, что возникающие напряжения вокруг вершины трещины — растягивающие (имеем положительные КИОН). Однако в случае, когда область ЛУВО покрывает кончик трещины (рис. 4а), амплитуда растягивающих КИОН вокруг кончика трещины быстро уменьшается по сравнению с данными на рис. 4б, в, когда область ЛУВО не покрывает кончик трещин, и они переходят в сжимающие КИОН. Кроме того, видно, что растягивающие напряжения вокруг вершины трещины в основном вызваны Модой-I на рис. 4а, б, и Модой-II на рис. 4в. Более того, если мы сравним компоненты Моды-I на рис. 4б, в, увидим, что существенные отрицательные КИОН генерируются именно на рис. 4в.

На основании полученных результатов для случая "линейной" трещины, можно сделать следующие важные выводы. Прежде всего, для получения максимального эффекта следует выбирать режим ЛУВО с покрытием кончика трещины, при котором создаются максимальные сжимающие КИОН.

При использовании режима ЛУВО без покрытия кончика трещины следует иметь в виду, что: 1) при этом создаются неблагоприятные нормальные растягивающие напряжения (КИОН в Моде-I) вокруг кончика трещины; 2) режим ЛУВО должен быть симметричной относительно направления распространения трещины (направления *x*), чтобы избежать возникновения нежелательных растягивающих напряжений сдвига



**Рис. 3.** Различные, режимы ЛУВО на образцах с "линейной" трещиной (а–в) и "V-образной" трещиной (г–д): *I* – трещина; *2* – область ЛУВО; *3* – направление сканирования: ЛУВО начинается с точки в правом нижнем углу и заканчивается в точке в левом верхнем углу.

(КИОН в Моде-II); 3) следует выбирать режимы ЛУВО с максимально растянутой зоной покрытия в направлении *у*, что приводит к появлению желаемых сжимающих нормальных напряжений.

Проанализируем динамику изменения КИОН для V-образных трещин. Здесь также имеем два режима ЛУВО, один из которых покрывает кончик трещины (рис. 4г), а другой — не покрывает кончик трещины (рис. 4д). На рис. 4д видно, что эквивалентный КИОН становится отрицательной примерно на расстоянии от 0.5 мм и далее, в то время как на рис. 4г отрицательная часть КИОН существует только в пределах от 1.5 мм до 2.7 мм от вершины трещины. Это означает, что режим ЛУВО без покрытия кончика трещины способен генерировать больше сжимающих КИОН. Как видим, в этот раз получили противоположный результат к тому, что получили ранее для случая "линейной" трещины.

Принципиально разное влияние режимов ЛУВО на две разные трещины означает, что режим ЛУВО должен быть настроен строго индивидуально, в том числе на основе анализа геометрических особенностей трещины. Стратегию моделирования, предложенную в этой статье, также можно успешно использовать для индивидуальной настройки режимов ЛУВО для образцов со сложной геометрией.

Для проверки адекватности разработанной численной модели был проведен сравнительный анализ с известными в литературе экспериментальными данными по рас-



**Рис. 4.** Динамика изменения КИОН в зависимости от расстояния от кончика трещины (*x*), вызванные технологией ЛУВО, для пяти изучаемых случаев. *I* – Мода-I ( $\delta k_1$ ); *2* – Мода- II ( $\delta k_2$ ); *3* – эквивалентный КИОН ( $\delta K_{mix}$ ).



**Рис. 5.** Изменение скорости роста трещины в зависимости от КИН: *1* – без ЛУВО; *2* – режим обработки ЛУВО-II. ●, ■ и ▲ – экспериментальные данные из [4].

пространению трещин в трех образцах: образец № 1 – без ЛУВО, образец № 2 – обработанный в режиме ЛУВО-I и образец № 3 – обработанный в режиме ЛУВО-II.

На рис. 5. показаны расчетные кривые изменения скорости роста трещин как функция от КИН (линии 1, 2, и 3 для образцов №№ 1, 2 и 3, соответственно). Из анализа кривых (рис. 5) видно, что, несмотря на небольшое увеличение постоянной *C* от  $7 \times 10^{-8}$  до  $1 \times 10^{-7}$ , показатель роста трещины *m* значительно уменьшается после обработки ЛУВО: с 2.4024 до 2.1207 для ЛУВО-I и до 1.9112 для ЛУВО-II. Очевидно, что

скорость роста трещины при одном и том же КИН уменьшается после применения технологии ЛУВО, особенно при обработке в режиме ЛУВО-II.

Таким образом, экспериментально подтвержденный факт значительного уменьшения скорости роста трещины после обработки материалов в режиме ЛУВО-II [4], хорошо согласуется с результатами нашего численного моделирования, что доказывает адекватность разработанной численной модели (ЧМ).

**Выводы.** Результаты показали, что для повышения трещиностойкости линейных трещин лучше, чтобы область ЛУВО покрывала максимально возможную область трещины. Тем временем, для V-образной трещины для тех же целей лучше, чтобы область ЛУВО располагалась на определенном расстоянии от кончика трещины с тем, чтобы избегать возникновения нежелательных растягивающих остаточных напряжений вдоль пути распространения трещины. Проведенный сравнительный анализ с известными в литературе экспериментальными данными показал адекватность и эффективность разработанной численной модели.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

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. *Peyre P., Fabbro R.* Laser shock processing: a review of the physics and applications // Opt. Quant. Electron. 1995. № 27. P. 1213.
- Vázquez Jiménez C.A., Gómez Rosas G., Rubio González C., Hereñú S. Effect of Laser Shock Processing on fatigue life of 2205 duplex stainless steel notched specimens // Opt. Laser Technol. 2017 № 907. P. 308.
- Rubio-González C., Felix-Martinez C., Gomez-Rosas G., Ocaña J.L., Morales M., Porro J. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth of duplex stainless steel // Mater. Sci. Eng. A. 2011. № 528. P. 914.
- 4. 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.
- Сахвадзе Г.Ж. Особенности конечноэлементного моделирования остаточных напряжений, возникающих в материале при лазерно-ударно-волновой обработке, с использованием метода собственных деформаций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 4. С. 87.
- 6. *Сахвадзе Г.Ж.* Конечноэлементное моделирование технологии многократной лазерноударно-волновой обработки материалов с использованием метода собственных деформаций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 5. С. 91.
- 7. Chahardehi A., Brennan F.P., Steuwer A. The effect of residual stresses arising from laser shock peening on fatigue crack growth // Eng. Fract. Mech. 2010. № 77. P. 2033.
- 8. Lu J.Z., Wu L.J., Sun G.F., Luo K.Y., Zhang Y.K., Cai J. et al. Microstructural response and grain refinement mechanism of commercially pure titanium subjected to multiple laser shock peening impacts // Acta Mater. 2017. № 127. P. 252.
- Kashaev N., Ventzke V., Horstmann M., Chupakhin S., Riekehr S., Falck R. et al. Effects of laser shock peening on the microstructure and fatigue crack propagation behavior of thin AA2024 specimens // Int. J. Fatigue. 2017. V. 98. P. 223.
- Bhamare S., Ramakrishnan G., Mannava S.R., Langer K., Vasudevan V.K., Qian D. Simulationbased optimization of laser shock peening process for improved bending fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy // Surf. Coat. Technol. 2013. V. 232. P. 464.