

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 539.3

ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОБРАЗЦОВ
ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ
ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ© 2019 г. Г. Ж. Сахвадзе^{1,*}, Р. З. Кавтарадзе², М. У. Никабадзе³, О. Г. Киквидзе⁴¹ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*² *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*³ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*⁴ *Государственный университет им. Ак. Церетели, Кутаиси, Грузия*

* e-mail: sakhvadze@mail.ru

Поступила в редакцию 26.02.2019 г.

Принята к публикации 24.04.2019 г.

Проведено исследование влияния технологии лазерно-ударно-волновой обработки (ЛУВО) образцов из нержавеющей стали 03X22H6M2 на их усталостную долговечность путем конечноэлементного моделирования. Известные в литературе экспериментальные усталостные долговечности сравнивались с данными от конечноэлементного моделирования. Наблюдается хорошее сравнение между численными и экспериментальными данными. Показано, что размер толщины образца является важной характеристикой при применении технологии ЛУВО. Установлено, что с уменьшением толщины образца значительно увеличивается усталостная долговечность, обусловленная применением ЛУВО. Показано, что для тонких образцов (порядка 2 мм) применение технологии ЛУВО увеличивает усталостную долговечность до 300%.

Ключевые слова: лазерно-ударно-волновая обработка, усталостная долговечность, остаточные напряжения, конечноэлементное моделирование

DOI: 10.1134/S0235711919040138

Анализ современного состояния. Технология лазерно-ударно-волновой обработки (ЛУВО) является эффективным методом обработки поверхностей ответственных узлов, изготовленных из целого ряда металлов и сплавов, с целью улучшения их усталостных свойств. Потенциальными отраслями успешного использования ЛУВО являются аэрокосмическая, авиационная, автомобильная, атомная промышленности. С помощью ЛУВО улучшаются статические, циклические, усталостные, коррозионные и трибологические характеристики материалов [1]. Улучшение этих характеристик объясняется созданием повышенной плотности дислокаций и сжимающих остаточных напряжений (СОН), вызванных прохождением ударных волн вглубь материала [2]. В последнее время ЛУВО стала также успешно применяться и для нержавеющей сталей [3].

Конечноэлементное моделирование (КЭМ) технологии ЛУВО является эффективным инструментом для оценки влияния различных параметров процесса и анализа отклика на них. Стандартная процедура с использованием КЭМ технологии ЛУВО подразумевает оценку величин, возникающих СОН в приповерхностной области, варьируя различные параметры воздействия [3].

Таблица 1. Химический состав нержавеющей стали 03X22H6M2

| Элемент | C | Si | Mn | P | Cr | Mo | Ni | N | Cu |
|---------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|------|
| % | 0.021 | 0.42 | 1.22 | 0.028 | 22.13 | 3.08 | 5.56 | 0.188 | 0.19 |

Известно, что поле остаточных напряжений, обусловленное с использованием технологии ЛУВО, чрезвычайно чувствительно к геометрическим особенностям поверхностей [4]. Также хорошо известно, что такие геометрические особенности, как выемки или отверстия, являются типичными местами возникновения усталостных трещин, поскольку они являются центрами концентраторов напряжений. Кроме того, толщина образца значительно влияет на трещиностойкость и, следовательно, усталостное поведение материалов. Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) увеличивается при уменьшении толщины образца из-за увеличения размера пластической зоны вокруг вершины трещины [4], и, следовательно, следует ожидать, что эффект влияния ЛУВО на усталостные характеристики материалов также должен существенно зависеть от толщины образца.

В открытой печати имеется лишь несколько работ, в которых анализируется влияние геометрических характеристик материалов на эффективность использования ЛУВО [3–5]. Кроме того, почти нет данных по оценке влияния толщины на усталостную долговечность образцов с надрезами, подвергнутых воздействию ЛУВО.

Постановка задачи. Целью данной работы является исследование влияния толщины образца на усталостное поведение образцов из нержавеющей стали 03X22H6M2, подвергнутых технологии ЛУВО. Процедура КЭМ состоит из двух шагов. Сначала осуществляется моделирование технологии ЛУВО на образцах с надрезом в конечноэлементном пакете ABAQUS/Explicit и определяются поля остаточных напряжений. Затем проводится анализ усталостной долговечности в конечноэлементном пакете FE-SAFE с использованием многоосных критериев усталости. Поля остаточных напряжений, полученных на первом шаге моделирования, используются в качестве входных данных на втором шаге. Полученные данные сравниваются с экспериментальными результатами.

Исследуемый материал. С целью проведения сравнительного анализа в КЭМ был исследован материал, который использовался в экспериментах [6]: нержавеющая сталь 03X22H6M2. Ее химический состав приведен в табл. 1, а механические характеристики такие: предел текучести при растяжении – 520 МПа, предел прочности – 710 МПа, модуль упругости – 190 ГПа.

Размеры образцов показаны на рис. 1а. На рис. 1б показано направление сканирования поверхности при ЛУВО, перпендикулярное продольной оси образца. Чтобы исследовать влияние геометрических параметров образца, были исследованы три значения толщины образца: 2, 3 и 4 мм. По технологии ЛУВО обрабатывалась центральная часть образцов размером 50 × 50 мм с обеих сторон.

Конечноэлементное моделирование. КЭМ технологии ЛУВО было выполнено с использованием конечноэлементного пакета ABAQUS/Explicit. Целью этого анализа является оценка распределения полей остаточных напряжений (ОН) по поверхности и вглубь материала, которые затем используются при анализе усталостного поведения в пакете FE-SAFE. Применяется зигзагообразное направление сканирования исследуемой поверхности с коэффициентом перекрытия лазерных пятен 0.75%. Особенности конечноэлементного моделирования технологии ЛУВО представлены в [7].

Первый шаг (определение полей ОН) состоит из двух этапов: первый – этап нагружения, когда на образец падает лазерный импульс и в нем распространяется ударная волна, и второй – этап релаксации, при котором система возвращается в состояние равновесия с возникновением СОН [7]. Конечноэлементная сетка показана на рис. 2, где для образца толщиной 3 мм были использованы 190 512 линейных

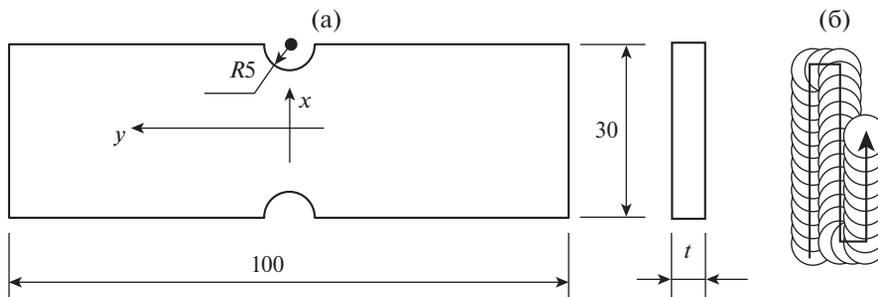


Рис. 1. а) – Геометрические характеристики образцов (исследовались образцы с разными толщинами t : 2, 3 и 4 мм); б) – направление зигзагообразного сканирования исследуемой поверхности при ЛУВО.

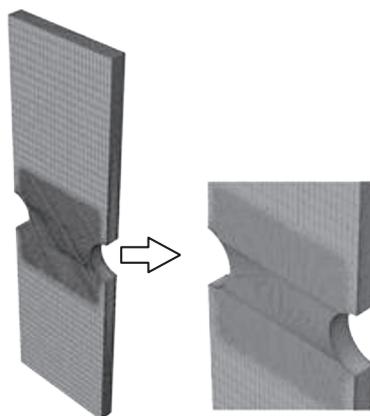


Рис. 2. Конечно-элементная модель образца.

шестигранных элементов C3D8R (для других образцов с толщиной 2 и 4 мм число элементов составило 198 586 и 224 826, соответственно).

В модели сначала все точки на задней поверхности образца были защемлены, и лазерные импульсы подавались к лицевой поверхности. После этого задняя и лицевая поверхности менялись местами, чтобы обработать обе поверхности образца.

Следует заметить, что при моделировании с учетом всех протекающих при ЛУВО процессов, вычислительные затраты будут огромными и они станут недоступными для обычных компьютеров (понадобятся суперкомпьютеры). Чтобы существенно сэкономить вычислительные затраты, был использован метод собственных деформаций, разработанный А.М. Корсунским, подробно описанный в [8].

Прикладываемой на поверхность образца нагрузкой является импульс давления, изменение которого во времени приведено на рис. 3.

Определяющее соотношение. При ЛУВО из-за воздействия большого по величине и кратковременного по времени давления скорости деформации в исследуемом материале достигают величин 10^6 с^{-1} и более, поэтому при расчетах напряженно-деформированного состояния в качестве определяющего соотношения используется модель пластического деформирования материала Джонсона–Кука [9]

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

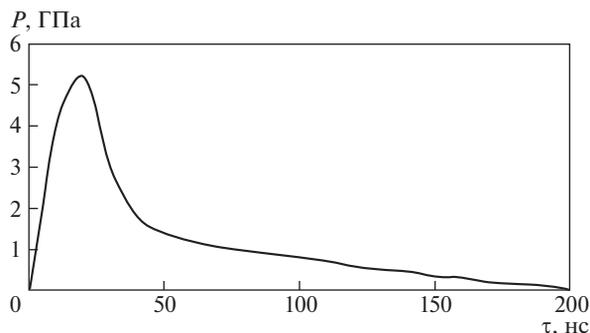


Рис. 3. Профиль изменения давления во времени, прикладываемого по поверхности исследуемого образца.

где σ – 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

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

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. Заметим, что модель Джонсона–Кука в аналогичных задачах апробирована и дает удовлетворительные результаты [10–15]. Материальные константы для нержавеющей стали 03X22Н6М2 приведены в табл. 2 [2].

Модели усталостного разрушения. Существует несколько основных типов критериев и моделей усталостного разрушения [16, 17], позволяющих оценить число циклов нагружения образца материала или элемента конструкции до разрушения по напряженному состоянию (например, модель Сайнса, модель Кроссланда), по деформированному состоянию (классическая модель Коффина–Мэнсона и модели, обобщающие модель Коффина–Мэнсона на случай многоосного усталостного разрушения: модель Брауна–Миллера, модель Фатеми–Соси, модель Смита–Ватсона–Топпера) или по накопленной повреждаемости (Модель Лемэтра–Шабоша, модель УЛ (Университет Льеж)). В настоящей работе для анализа усталостного поведения материала будем применять деформационный подход. Деформационная кривая усталости, представляющая собой зависимость амплитуды полной деформации от числа полуциклов до разрушения (т.н. кривая $\sigma-N$), обычно задается аналитически, например, в виде уравне-

Таблица 2. Константы в модели Джонсона–Кука для нержавеющей стали 03X22Н6М2

| Константа | Значение | Размерность |
|-----------|----------|-------------|
| A | 520 | МПа |
| B | 840.5 | МПа |
| C | 0.0124 | – |
| n | 0.1904 | – |
| m | 0.965 | – |

Таблица 3. Методы оценок параметров Коффина–Мэнсона

| Параметр | Метод однородных материалов | Модифицированный метод универсальных наклонов Мурилидхарана–Мэнсона | Метод твердости Расла–Фатеми | Метод Митчела |
|-------------------|---|---|--|--|
| σ'_f (МПа) | $1.5\sigma_T$ | $0.623\left(\frac{\sigma_T}{E}\right)^{0.832}$ | $4.25(\text{HB}) + 225$ | $\sigma_T + 45$ |
| ϵ'_f | $0.59\alpha;$ $\alpha = 1.375 - 125\frac{\sigma_T}{E}$ | $0.0196\epsilon_f^{0.155}\left(\frac{\sigma_T}{E}\right)^{-0.53}$ | $\frac{1}{E}[0.32(\text{HB})^2 - 487(\text{HB}) + 191000]$ | ϵ_f |
| b | -0.087 | -0.09 | -0.09 | $-\frac{1}{6}\lg\left[\frac{2(\sigma_T + 345)}{\sigma_T}\right]$ |
| c | -0.58 | -0.56 | -0.56 | -0.6 |

Таблица 4. Константы в модели Коффина–Мэнсона для нержавеющей стали 03X22Н6М2

| Параметр | Значение | Размерность |
|---------------|----------|-------------|
| σ'_f | 1443 | МПа |
| ϵ'_f | 0.549 | – |
| B | -0.125 | – |
| C | -0.551 | – |

ния Коффина–Мэнсона, описывающее одноосное усталостное разрушение по изменению деформации в цикле нагружения [18]

$$\frac{\Delta_\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b + \epsilon'_f(2N_f)^c, \quad (2)$$

где Δ_ϵ – диапазон деформации (т.е., $\Delta_\epsilon = \epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}$), N_f – число циклов до разрушения, E – модуль Юнга, σ'_f – коэффициент усталостной прочности (значение амплитуды напряжения, при котором разрушение произойдет за один полуцикл нагружения при условии отсутствия пластических деформаций), ϵ'_f – коэффициент усталостной вязкости (значение амплитуды деформации, при котором разрушение произойдет за один полуцикл нагружения при условии отсутствия упругих деформаций); b – показатель степени усталостной прочности (экспонента Басквина), c – показатель степени усталостной вязкости (экспонента Мэнсона–Коффина). Важным обстоятельством являются значения четырех параметров σ'_f , ϵ'_f , b и c , входящих в уравнение (2), для отыскания которых требуются довольно дорогостоящие экспериментальные исследования.

В литературе было предложено несколько методов для количественной оценки параметров Коффина–Мэнсона по известным свойствам материалов [19]: метод однородных материалов, модифицированный метод универсальных наклонов Мурилидхарана–Мэнсона, метод твердости Расла–Фатеми и метод Митчелла, которые приведены в табл. 3 [3].

Параметры Коффина–Мэнсона для нержавеющей стали 03X22Н6М2, определяемые методом твердости, приведены в табл. 4 [3].

При обобщении соотношения Коффина–Мэнсона на случай многоосного усталостного разрушения используется модель Брауна–Миллера [2], где вводится понятие критической плоскости (плоскости, испытывающей максимальную нормальную амплитуду напряжений). Уравнение Брауна–Миллера предполагает, что максимальное усталостное повреждение возникает в плоскости, испытывающей максимальную амплитуду деформации сдвига, и что это повреждение возникает как от самого напряжения сдвига, так и от нормального напряжения, действующего в плоскости, перпендикулярной к критической. Уравнение Брауна–Миллера дает удовлетворительную оценку усталостного повреждения материалов при малоциклового усталости при сложных (как изгибных, так и крутильных) воздействиях и подходит практически для всех пластических материалов. Кандил разработал улучшенный вариант уравнения Брауна–Миллера с коррекцией по среднему нормальному напряжению (3), которым мы и будем пользоваться (т.н. модель Брауна–Миллера–Кандиля, [4])

$$\frac{\Delta_{\gamma}}{2} + \frac{\Delta_{\varepsilon_n}}{2} = 1.65 \frac{(\sigma'_f - \sigma_m)}{E} (2N_f)^b + 1.75 \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (3)$$

где Δ_{γ} – размах максимальных сдвиговых деформаций, достигаемых в критической плоскости; Δ_{ε_n} – размах нормальных деформаций в этой плоскости, σ_m – среднее за цикл нормальное напряжение.

Согласно рекомендациям [4], для нашего случая наиболее реалистичную оценку усталостной долговечности (максимально приближенные к экспериментальным данным) дает 3-я теория прочности – теория максимальных касательных напряжений.

Критерии максимальных касательных напряжений. Будем использовать этот критерий в качестве основного при исследовании многоосной усталости (хотя в литературе встречается и использование других теорий прочности). Анализируются протекающие процессы в плоскостях, перпендикулярных к критической, и в плоскостях под углом 45° к ней. Алгоритм проведения исследований здесь таков: сначала в каждой из трех главных плоскостей определяются усталостные долговечности, затем они последовательно определяются в восемнадцати вспомогательных плоскостях, разнесенных друг от друга с шагом 10° . В каждой плоскости через главные деформации вычисляются касательные и нормальные напряжения, средние нормальные напряжения и на последнем этапе вычисляются усталостные долговечности.

За расчетной усталостной долговечностью принимается минимальное значение из всех значений и для всех плоскостей.

Обычно описанный выше алгоритм использует кривую напряжение–усталостная долговечность, определяемую уравнением (4) [5]

$$\frac{\Delta_{\gamma}}{2} = 1.3 \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + 1.5 \varepsilon'_f (2N_f)^c. \quad (4)$$

В своих расчетах мы используем уточненную формулу Морроу (5), где вводится коррекция через среднее напряжение σ_m [5]:

$$\frac{\Delta_{\gamma}}{2} = 1.3 \frac{(\sigma'_f - \sigma_m)}{E} (2N_f)^b + 1.5 \varepsilon'_f (2N_f)^c. \quad (5)$$

В литературе предложены ряд других моделей учета влияния среднего напряжения (σ_m) на усталостную долговечность [6]. В настоящей работе была использована модель Морроу.

Анализ усталостной долговечности. Как было отмечено выше, процедура КЭМ состоит из двух шагов: 1) на первом шаге в конечноэлементном пакете ABAQUS/Explicit проводится моделирование технологии процесса ЛУВО, после чего определяется распределение полей остаточных напряжений в образце, затем к образцу прикладывается

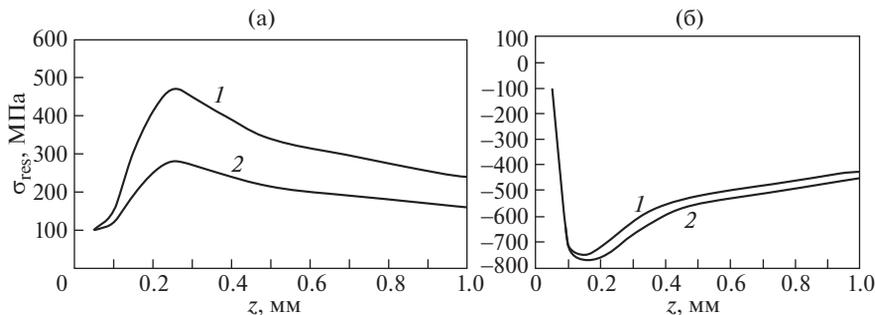


Рис. 4. Профили полей остаточных напряжений (σ_{res}) по глубине образца (z) до (а) и после (б) ЛУВО: 1 – σ_{xx} ; 2 – σ_{yy} .

нагрузка 24 кН (для образца с толщиной 4 мм, данные взяты с эксперимента из [6], чтобы можно было проводить сравнительный анализ с полученными численными результатами). Получаем окончательное напряженное состояние, т.е. сочетание остаточных напряжений, вызванных процедурой ЛУВО и напряжений, вызванных внешней нагрузкой; 2) на втором шаге полученные данные об окончательном напряженном состоянии передаются в конечноэлементный пакет FE-SAFE для анализа усталостной долговечности и оценки количества циклов до разрушения образца.

Таким образом, процедура КЭМ усталостного поведения образца проводилась в условиях, полностью аналогичных условиям в экспериментах, описанных в [6], то есть, при: постоянной амплитуде, коэффициенте асимметрии цикла $R = 0.1$ и максимальном напряжении $\sigma_{max} = 300$ МПа.

Следует отметить, что для оценки вклада ЛУВО в формировании усталостной долговечности образцов, был также проведен аналогичный анализ образцов без процедуры ЛУВО. В этом случае напряжение 300 МПа сразу было приложено к модели, показанной на рис. 2 и полученное поле напряжений затем было передано в FE-SAFE для последующего анализа.

Программный комплекс FE-SAFE позволяет производить исследование усталостной долговечности с помощью современных алгоритмов анализа многоосного деформированного состояния. При этом возможен учет сложного характера циклов нагружения, анализ вероятностей зарождения трещин, размещение виртуальных тензодатчиков на модели. Программа позволяет также производить анализ усталостной прочности в зависимости от температурных воздействий с учетом ползучести материала. Подробности об особенностях применения на практике программного комплекса FE-SAFE изложены в [20, 21].

Полученные результаты и их анализ. Остаточные напряжения. Распределения остаточных напряжений по глубине для образца с толщиной 4 мм до и после ЛУВО показаны на рис. 4. Напряжения σ_{xx} соответствуют компонентам напряжений, параллельных направлению сканирования ЛУВО, а σ_{yy} – напряжениям, перпендикулярных этому направлению. Как видно, в образце до ЛУВО наблюдаются значительные растягивающие остаточные напряжения. Максимальные растягивающие остаточные напряжения равны 475 МПа для (σ_{xx}) и они расположены около 0.25 мм под поверхностью (рис. 4а). Для σ_{yy} эта величина равна 260 МПа и они расположены примерно на той же глубине. После применения ЛУВО картина распределения ОН резко меняется (рис. 4б). Максимальные сжимающие остаточное напряжение наблюдаются для σ_{yy} и они равны порядка 765 МПа, которые расположены на глубине около 0.18 мм.

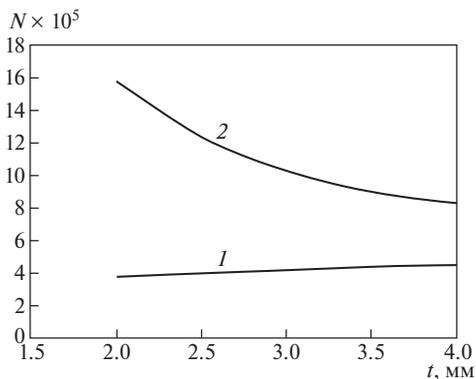


Рис. 5. Повышение циклов до иницирования усталостной трещины, вызванное технологией ЛУВО, на образцах с различными толщинами (2, 3 и 4 мм): 1 – до ЛУВО, 2 – после ЛУВО.

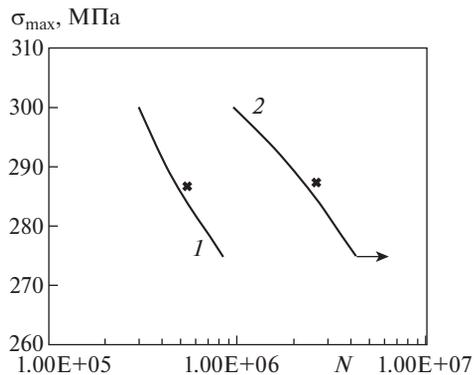


Рис. 6. Расчетная усталостная долговечность до (1) и после применения ЛУВО (2) для образца с толщиной 4 мм. Экспериментальные результаты, взятые из [6] для случая $\sigma_{max} = 287.5$ МПа, показаны крестиками.

Усталостная долговечность. Положительное влияние технологии ЛУВО в проблеме повышения усталостной долговечности, в особенности для тонких образцов (с толщиной 2 мм), показано на рис. 5. Как видим, усталостная долговечность в образцах с толщиной 4 мм увеличена примерно на 79%, в образцах с толщиной 3 мм – на 143%, а в образцах толщиной 2 мм – на 305%.

Заметим, что усталостная долговечность (число циклов до разрушения) образцов без использования ЛУВО рассматривалась как реперная, с которой сравнивались данные после ЛУВО. Все образцы были подвергнуты одинаковым усталостным нагрузкам ($\sigma_{max} = 300$ МПа, т.е. реализовалась мягкая схема нагружения). Эти результаты отчетливо показывают, что чем тоньше образец, тем больше эффект применения ЛУВО в вопросе продления усталостного ресурса. Это обстоятельство следует учитывать при проектировании и использовании ответственных тонкостенных конструкций.

Результаты расчетной усталостной долговечности в виде классической кривой усталости (в координатах максимальное приложенное напряжение–число циклов до разрушения, т.н. кривая $\sigma-N$) для образца с толщиной 4 мм показаны на рис. 6. Видно, что при $\sigma_{max} = 287.5$ МПа, число циклов до разрушения в образцах без применения ЛУВО составляло 460 600, после ЛУВО – 2 228 500 циклов, т.е. увеличение составило примерно 297%. При $\sigma_{max} = 275$ МПа эти цифры составляют до ЛУВО 836 700 циклов, после ЛУВО – 4 200 000 циклов (эта точка обозначена стрелкой на рис. 6). В этом случае эффект от применения ЛУВО составляет около 402%. Отсюда следует и экспериментально подтвержденная закономерность [6], что при уменьшении максимальных приложенных напряжений (σ_{max}), усталостная долговечность значительно увеличивается на образцах, обработанных по технологии ЛУВО. Как видим, наблюдается приемлемое совпадение с экспериментальными результатами, взятыми из [6].

Как известно, усталостная долговечность материала связана с накоплением пластической деформации в локальных областях, что, в свою очередь, после нескольких циклов нагружения, приводит к образованию усталостных трещин. Остаточные напряжения сжатия, вызванные технологией ЛУВО, демпфируют воздействие внешних сил и уменьшают величину деформации в приповерхностной области. Аналогичным

образом, увеличение твердости материала, которому также способствует ЛУВО [14], замедляет процесс возникновения усталостных трещин в этих уязвимых местах. Таким образом, можно заключить, что технология ЛУВО, благодаря своим 2-м основным механизмам – созданию мощных сжимающих остаточных напряжений в приповерхностной области и увеличению микротвердости поверхности, приводит к значительному увеличению усталостного ресурса материалов.

Заметим, что с использованием модуля FE-SAFE можно также прогнозировать и остаточный ресурс (N_{res}) конструкции по упрощенной формуле

$$N_{\text{res}} = N_m + N_a,$$

где N_m – число циклов до образования макротрещины, N_a – число циклов до образования лавинообразной трещины.

Выводы. Исследовано влияние толщины образца на усталостное поведение образцов из нержавеющей стали 03X22Н6М2, подвергнутых лазерно-ударно-волновой обработке (ЛУВО). Показано, что после применения ЛУВО для тонких образцов (толщиной 2 мм), усталостная долговечность была увеличена более чем на 300%. Подтверждена закономерность, что чем тоньше образец, тем больше эффект от ЛУВО в проблеме продления усталостного ресурса.

Приведенный алгоритм конечноэлементного моделирования является мощным инструментом в процессе определения и оптимизации параметров воздействия во время применения технологии ЛУВО к конкретным компонентам машин, особенно к тонкостенным конструкциям, на стадиях их проектирования и изготовления.

Благодарность. Авторы выражают благодарность к.т.н. Власову Н.А. за помощь в проведении расчетов в конечноэлементных пакетах ABAQUS и FE-SAFE.

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 № 14.607.21.0191 от 26.09.2017 г., проект RFMEFI60717X0191.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peyre P., Fabbro R.* Laser shock processing: a review of the physics and applications // *Opt. Quant. Electron.* 1995. № 27. P. 1213.
2. *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.
3. *Peyre P., Chaieb I., Braham C.* FEM calculations of residual stresses induced by laser shock processing in stainless steels // *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* 2007. № 15. P. 205.
4. *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.
5. *Cuellar S.D., Hill M.R., DeWald A.T., Rankin J.E.* Residual stress and fatigue life in laser shock peened open hole samples // *Int. J. Fatigue.* 2012. № 44. P. 8.
6. *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.
7. *Ivetic G.* Three-dimensional FEM analysis of laser shock peening of aluminium alloy 2024–T351 thin sheets // *Surf. Eng.* 2011. № 27. P. 445.
8. *Korsunsky A.M.* Residual elastic strain due to laser shock peening: modelling by eigenstrain distribution // *J. Strain Anal. Eng. Des.* 2006. V. 41. № 3. P. 195.
9. *Сахвадзе Г.Ж.* Особенности конечноэлементного моделирования остаточных напряжений, возникающих в материале при лазерно-ударно-волновой обработке, с использованием метода собственных деформаций // *Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин.* 2018. № 4. С. 87.

10. Сахвадзе Г.Ж. Конечноэлементное моделирование технологии многократной лазерно-ударно-волновой обработки материалов с использованием метода собственных деформаций // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 5. С. 91.
11. Сахвадзе Г.Ж., Гаврилина Л.В., Киквидзе О.Г. Влияние эффекта перекрытия лазерных пятен на остаточные напряжения при лазерно-ударно-волновой обработке материалов // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 3. С. 77.
12. Сахвадзе Г.Ж., Гаврилина Л.В. Лазерно-ударно-волновая обработка материалов при однократных и многократных импульсных воздействиях // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 6. С. 75.
13. Сахвадзе Г.Ж., Кавтарадзе Р.З., Никабадзе М.У. Использование метода собственных деформаций при моделировании технологий однократной и многократной лазерно-ударно-волновой обработки материалов // Ж. Вестник машиностроения. 2018. № 7. С. 41.
14. Сахвадзе Г.Ж., Пугачев М.С., Киквидзе О.Г. Особенности упрочнения материалов технологией лазерно-ударно-волновой обработки // Ж. Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 9 (141). С. 20.
15. Сахвадзе Г.Ж., Булекбаева Г.Ж., Киквидзе О.Г. Исследование качества поверхностных слоев, упрочненных лазерно-ударно-волновой технологией при различных степенях перекрытия лазерных пятен // Ж. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 2. С. 132.
16. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука, 2008. С. 528.
17. Махутов Н.А. Критериальная база прочности, ресурса, надежности, живучести и безопасности машин и человеко-машинных комплексов // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 5. С. 25.
18. Бураго Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С., Якушев В.Л. Исследование различных режимов усталостного разрушения и оценка долговечности диска компрессора газотурбинного двигателя // Ж. Математическое моделирование. 2016. Т. 28. № 2. С. 53.
19. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Кочерова Е.Е., Злобин А.С. Оценка малоциклового усталости на основе использования зависимости Мэнсона–Коффина при отнулевом цикле “мягкого” нагружения // Ж. Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 1. С. 129.
20. Тропкин С., Девятков А., Винклер А., Тляшева Р., Закирничная М. Прогнозирование усталостной прочности рабочих колес центробежных насосных агрегатов с помощью решений SIMULIA: Abaqus, fe-safe и комплекса гидродинамического анализа FlowVision // Ж. САПР и графика. 2014. № 5. С. 1.
21. Закирничная М.М., Кульшарипов И.М. Особенности расчета ресурса безопасной эксплуатации клиновых задвижек с учетом рабочих параметров в технологических трубопроводах // Ж. Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 4. С. 121.