

УДК 621.7

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ПРОКОВКИ НА МАЛО- И МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ОТ4-0

Е. А. Гачегова, Р. Сихамов*, Ф. Фенцке*, Н. Кашаев*, О. А. Плехов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013 Пермь, Россия

* Институт механики материалов центра им. Гельмгольца в г. Гестахт,
21502 Гестахт, Германия

E-mails: gachegova.e@icmm.ru, ruslan.sikhamov@hzg.de, volker.ventzke@hzg.de,
nikolai.kashaev@hzg.de, poa@icmm.ru

Исследуется влияние лазерной ударной проковки на усталостную долговечность титанового сплава ОТ4-0. Лазерная проковка проводилась с использованием лазера Nd:YAG с модулированной дробностью, работающего с частотой повторения импульсов 10 Гц. В результате анализа влияния различных параметров лазерной обработки на величину и распределение остаточных напряжений по толщине образца установлено, что оптимальный режим лазерной ударной обработки позволяет создавать зону сжимающих остаточных напряжений глубиной до 1 мм с их максимальным значением 600 МПа. Результаты исследования структуры поверхностей разрушения показывают, что механизм усталостного разрушения изменяется, при этом срок эксплуатации образцов как в малоцикловом, так и в многоцикловом режиме усталости после лазерной ударной проковки значительно увеличивается.

Ключевые слова: лазерная ударная проковка, титановый сплав ОТ4-0, остаточные напряжения, усталостный ресурс.

DOI: 10.15372/PMTF20220217

Введение. Усталостное разрушение материала является одной из основных причин повреждения деталей и конструкций, подвергаемых воздействию напряжений, циклически изменяющихся во времени. Длительное циклическое изменение нагрузки приводит к разрушению при значениях амплитуды напряжения, меньших предела текучести [1, 2]. Задачи прогнозирования и увеличения усталостного ресурса наиболее актуальны в авиастроении, поскольку разрушение авиационных конструкций, как правило, приводит к катастрофам. Важным фактором, влияющим на усталостные характеристики деталей, является наличие в них концентраторов напряжений в виде отверстий и краевых вырезов. Именно в областях, где происходит концентрация напряжений, появляются усталостные трещины, приводящие к разрушению [3]. Поскольку усталостный ресурс отдельных конструкций самолета чрезвычайно важен для обеспечения безопасности всего летательного аппарата, существуют различные способы увеличения ресурса деталей, имеющих концентраторы напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 20-48-596005).

© Гачегова Е. А., Сихамов Р., Фенцке Ф., Кашаев Н., Плехов О. А., 2022

В настоящее время одним из наиболее перспективных методов повышения усталостного ресурса металлических элементов конструкций является лазерная ударная проковка (ЛУП) [4]. Суть данного метода заключается в следующем: под действием лазерных импульсов на поверхности детали генерируется плазма, при увеличении давления которой возникают ударные волны, распространяющиеся вглубь материала. В результате появляются остаточные сжимающие напряжения, препятствующие зарождению и распространению усталостных трещин [5]. В процессе лазерной ударной проковки обрабатываемая поверхность покрывается непрозрачным для лазерного излучения слоем материала с низкой температурой испарения (черной краской, металлической фольгой или лентой). Поверх него наносится слой прозрачного вещества, в качестве которого часто используется вода. Энергия лазерного импульса поглощается непрозрачным слоем, что приводит к его нагреву и испарению с образованием высокотемпературной плазмы. Плазма, ограниченная с одной стороны поверхностью материала, а с другой — слоем прозрачного вещества, оказывает значительное давление на материал, что приводит к возникновению в нем ударной волны. В случае если сжимающие напряжения в волне превышают упругий предел Гюгонио, материал пластически деформируется, вследствие чего в нем появляются сжимающие остаточные напряжения. Поверхностные сжимающие остаточные напряжения уравниваются полем напряжений внутри материала или в зонах, примыкающих к области лазерного воздействия.

В последнее время проведено большое количество исследований влияния ЛУП на усталостные характеристики образцов. В работе [6] изучается влияние ЛУП на усталостное поведение образцов из сплава Fe–Cr, имеющих один боковой вырез. В [7] получена оценка влияния размеров участка, обработанного методом ЛУП, на усталостные характеристики образцов из сплава AA2024-T3. Рассматривались два случая: ЛУП непосредственно вокруг отверстия и ЛУП по всей ширине образца. Результаты исследования показали, что образцы, обработанные непосредственно вокруг отверстия, могут выдерживать большее количество циклов нагружения, чем образцы, упрочненные по всей ширине. В работе [8] исследована связь между направлениями приложенной нагрузки и лазерного упрочнения. Установлено, что если направление обработки параллельно направлению нагрузки, то увеличение усталостного ресурса достигает 471 %. В случае если эти направления перпендикулярны друг другу, увеличение составляет лишь 166 %. В [9] изучено влияние ЛУП на усталостные характеристики стыковых соединений Ti–6Al–4V, сваренных лазерным лучом, и отмечено, что в основном лазерная проковка оказывает влияние на поверхностные дефекты, а не на внутренние. Что касается усталостного ресурса, то после обработки он увеличивается в три раза.

Анализ указанных выше работ позволяет сделать вывод, что ЛУП приводит к значительному улучшению усталостных характеристик образцов. При этом определяющими факторами увеличения ресурса являются энергия лазерного импульса, количество проходов лазера при проведении обработки, а также размер и форма обрабатываемой области.

Целью данной работы является экспериментальное определение оптимальных параметров лазерной обработки для титанового сплава OT4-0, а также изучение влияния лазерной ударной проковки на усталостный ресурс образцов, выполненных из этого материала, в областях как малоциклового, так и многоциклового усталости.

1. Материалы и экспериментальные методы. В экспериментах испытывался титановый сплав OT4-0, механические характеристики которого имеют следующие значения: плотность — 4457 кг/м^3 , предел прочности — 650 МПа, предел текучести — 550 МПа, коэффициент Пуассона — 0,32, модуль Юнга — 110 ГПа.

Использовались две партии образцов различной геометрии для анализа остаточного напряжения после проковки и для испытаний на усталость (рис. 1).

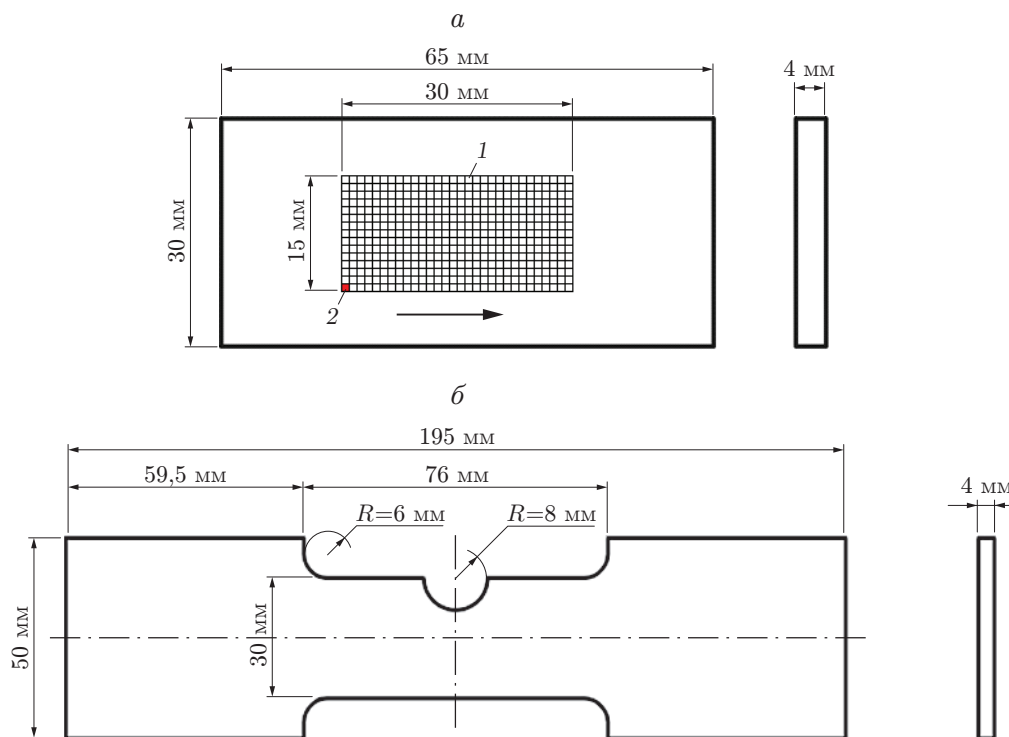


Рис. 1. Геометрия образцов для анализа остаточных напряжений (а) и для испытаний на усталость (б):

1 — зона обработки, 2 — начальное положение лазера; стрелка — направление ЛУП (размер пятна лазера 1×1 мм)

1.1. *Программа экспериментов.* На первом этапе испытаний проводились лазерная ударная проковка и анализ остаточных напряжений в образцах первой партии. Было протестировано пять образцов, которые обрабатывались с использованием различных режимов ЛУП для определения оптимальных параметров обработки на втором этапе испытаний. Остаточные напряжения измерялись методом сверления отверстий [10].

Второй этап экспериментов включал испытания 20 образцов, половина из которых подвергалась ЛУП. Пять необработанных и четыре обработанных образца были испытаны с фиксированным циклом нагружения (максимальное напряжение — 500 МПа, коэффициент асимметрии цикла — 0,1) для оценки вероятности разрушения в режиме малоциклового усталости. Остальные образцы испытывались при различных циклах напряжений для построения кривой Веллера. Для анализа микроструктуры поверхности излома применялся метод электронной микроскопии.

1.2. *Лазерная ударная обработка и анализ остаточных напряжений.* Основная цель применения ЛУП — создание в материале сжимающих остаточных напряжений [11]. В экспериментах использовался лазер Nd:YAG с модулированной дробностью, работающий с частотой повторения импульсов 10 Гц. Длина волны лазера составляла 1065 нм. В качестве варьируемых параметров были выбраны энергия лазера E , длительность импульса t и количество проходов лазера n (табл. 1). Геометрия зоны обработки показана на рис. 1, а. Обработка выполнялась на обеих поверхностях образца.

Для получения распределений остаточных напряжений по толщине образцов использовалась установка Stresstech PRISM, оснащенная электронным спекл-интерферометром. Подробная информация о методе сверления отверстий приведена в стандарте ASTM E837-08 [10].

Таблица 1
 Параметры ЛУП образцов первой партии

Образец	E , Дж	t , нс	n
1	5	20	1
2	5	20	2
3	3	10	1
4	3	10	2
5	3	10	3

В результате получены распределения напряжений вдоль осей x и y по толщине образцов h . Наибольший интерес представляют результаты, полученные после обработки образцов (энергия 3 Дж, длительность 10 нс). На рис. 2 представлены профили остаточных напряжений в случаях, когда лазер обрабатывал поверхность один и три раза.

При трехкратной обработке остаточные напряжения проникают на большую глубину, чем при однократной, но в среднем их величины различаются несущественно, при этом технологическая сложность процесса ЛУП значительно возрастает. В случае трехкратной лазерной проковки остаточные напряжения превышают 80 % значения предела текучести материала, поэтому результаты считаются неточными и требуют корректировки [12].

На основе проведенного анализа сделан вывод, что для образцов второй партии оптимальными параметрами ЛУП являются энергия, равная 3 Дж, длительность 10 нс, размер пятна лазера 1×1 мм и однократная проковка. Зону обработки (рис. 3) следует выбирать с учетом размеров образца и геометрии концентратора напряжений. Как отмечено выше, выполнение ЛУП по всей ширине образца для продления усталостной долговечности нецелесообразно, так как в этом случае в средней плоскости образца образуются растягивающие напряжения [6]. В случае если зона обработки полностью окружена концентратором, растягивающие напряжения возникают на краю, а концентратор полностью окружен остаточными сжимающими напряжениями.

До начала обработки по всей ширине образца наклеивалась стальная фольга толщиной 0,1 мм. В процессе ЛУП поверхность зоны обработки покрывалась ламинарным слоем воды толщиной $1 \div 3$ мм. Обрабатывались обе поверхности образцов.

1.3. *Испытания на усталость.* В экспериментах на усталость использовалась испытательная машина Schenck. Было проведено две серии тестов.

1. Испытания в зоне малоциклового усталости. На основе результатов, приведенных в [13], были выбраны следующие основные параметры цикла испытаний на малоцикловую усталость: коэффициент асимметрии цикла $R = 0,1$, максимальное напряжение в цикле $\sigma_{\max} = 500$ МПа, частота нагружения $f = 15$ Гц. В экспериментах использовались пять необработанных образцов и четыре образца, обработанных методом ЛУП.

2. Испытания с разными уровнями напряжений. Было протестировано пять необработанных и шесть обработанных образцов. Параметры цикла представлены в табл. 2. Во всех экспериментах $f = 10$ Гц, $R = 0,1$.

1.4. *Исследование микроструктуры образцов.* Для исследования микроструктуры поверхности излома после усталостных испытаний были выбраны четыре образца. Первая пара образцов — необработанный образец и образец, обработанный методом ЛУП, которые испытывались при максимальном напряжении $\sigma_{\max} = 100$ МПа, вторая пара — необработанный и обработанный образцы, испытанные при $\sigma_{\max} = 500$ МПа. Структура поверхностей разрушения исследована на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490LV.

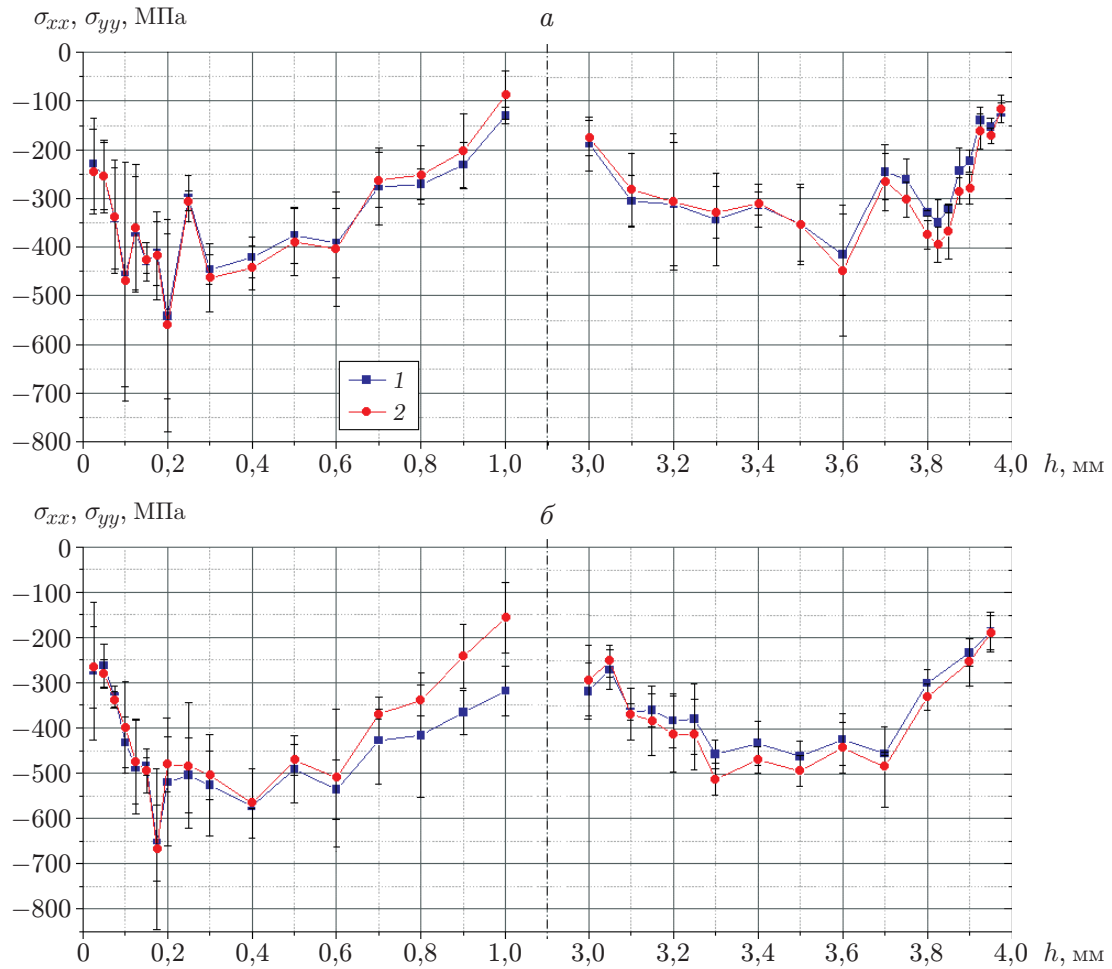


Рис. 2. Профили остаточных напряжений для образца, обработанного методом ЛУП один раз (а) и три раза (б) ($E = 3$ Дж, $t = 10$ нс):

1 — σ_{xx} , 2 — σ_{yy}

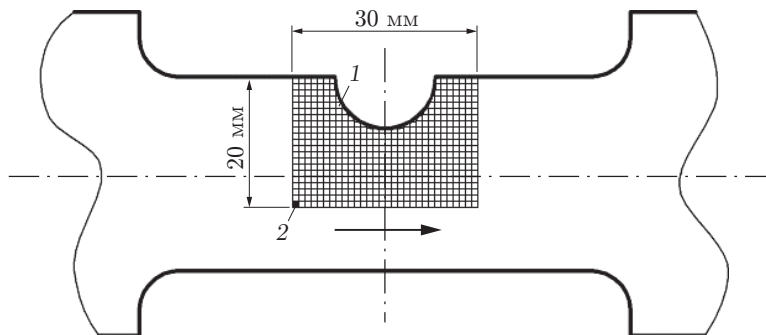


Рис. 3. Зона ЛУП для образцов второй партии:

1 — зона обработки, 2 — начальное положение лазера; стрелка — направление ЛУП

Таблица 2

Результаты усталостных испытаний при $f = 10$ Гц, $R = 0,1$

$\sigma_{\max}$, МПа	N_1	N_2	$((N_2 - N_1)/N_1) \cdot 100$ %
500	996	1693	70,0
375	4221	4612	9,3
250	11 120	19 345	74,0
150	44 193	104 793	137,1
100	242 731	613 436	152,7
90	511 086	831 228	62,6
85	—	1 208 018	—

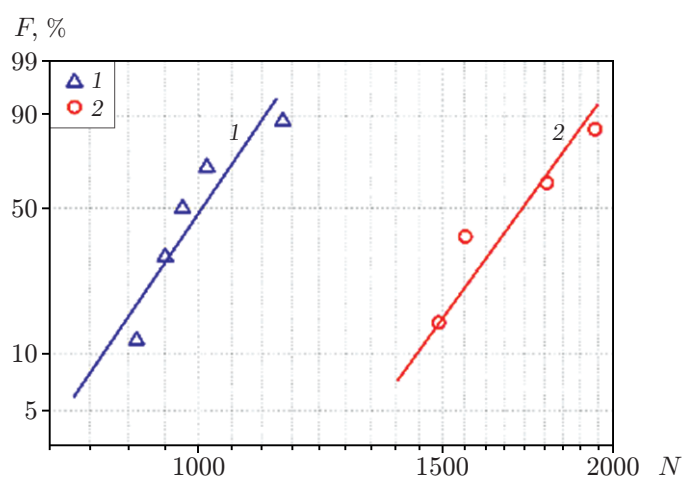


Рис. 4. Распределение Вейбулла:

1 — необработанный образец ($b = 11,353$, $T = 1038$), 2 — образец, обработанный методом ЛУП ($b = 10,651$, $T = 1774$)

2. Результаты исследования и их обсуждение. В результате первой серии усталостных испытаний получена оценка вероятности разрушения. Для анализа результатов усталостных тестов использовалось двухпараметрическое распределение Вейбулла

$$F(N) = 1 - e^{-(N/T)^b}, \quad (1)$$

где $F(N)$ — вероятность разрушения; N — количество циклов; T — параметр масштаба; b — параметр формы. Параметр формы характеризует разброс данных, а значение параметра масштаба T представляет собой количество циклов, в течение которых доля разрушенных образцов в среднем составляет 63,2 %.

С использованием полученных экспериментальных данных и пакета OriginLab строилось распределение Вейбулла, описанное формулой (1). Параметры распределения получены с помощью метода наименьших квадратов для обработанных и необработанных образцов.

Результаты обработки данных первой серии экспериментов (при $\sigma_{\max} = 500$ МПа) представлены на рис. 4.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы. Параметр масштаба рассматривается как величина, описывающая усталостную долговечность, а параметр формы характеризует статистический разброс результатов эксперимента. Сравнение параметров масштаба необработанных и упрочненных образцов показывает, что использование ЛУП приводит к увеличению усталостной долговечности приблизительно

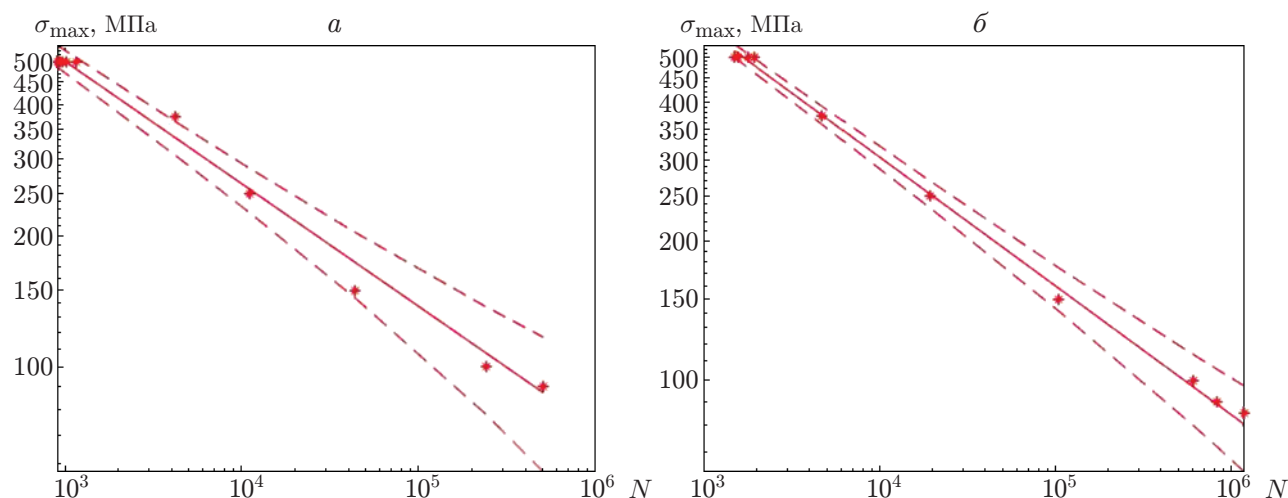


Рис. 5. Усталостные кривые:

а — необработанные образцы, *б* — образцы, обработанные методом ЛУП; точки — экспериментальные данные, сплошные линии — средние значения максимальных напряжений, штриховые — минимальные и максимальные значения напряжений, полученные в эксперименте

на 70 %. В свою очередь, параметр формы незначительно уменьшается. Однако невозможно утверждать, что ЛУП обуславливает увеличение разброса экспериментальных данных и уменьшение достоверности данных о вероятности разрушения, поскольку было проанализировано лишь небольшое количество образцов, недостаточное для получения полной статистической картины.

В результате второй серии испытаний были построены кривые усталости для образцов, обработанных методом ЛУП, и необработанных образцов (рис. 5). Для более точного анализа результатов использовалась методика оценки, описанная в [14]. Для оценки результатов вводятся два параметра: коэффициент рассеяния и обратный наклон. Коэффициент рассеяния — параметр, определяющий степень корреляции между экспериментальными данными и аппроксимирующей кривой.

Из результатов анализа полученных данных следует, что после проковки характер кривой усталости образцов практически не изменился, о чем свидетельствует обратный наклон: для необработанных образцов он составляет 3,57, для образцов, обработанных методом ЛУП, — 3,60. Однако разброс экспериментальных данных существенно уменьшился: для необработанных образцов коэффициент рассеяния составляет 2,99, для образцов, обработанных методом ЛУП, — 1,64.

Данные об увеличении усталостной долговечности образцов в результате лазерной обработки приведены в последней графе табл. 2 (N_1 , N_2 — количество циклов нагружения необработанного образца и образца, обработанного методом ЛУП).

Следует отметить, что положительное влияние ЛУП наблюдается в областях как малоциклового усталости, так и многоциклового. Разброс степени увеличения усталостной долговечности (см. табл. 2) обусловлен тем, что усталость является статистическим процессом. Поэтому полученные результаты можно рассматривать как качественные, но не количественные. Для получения количественных результатов необходимо проводить несколько испытаний при одном и том же значении напряжения, аналогично тому как это было сделано в первой серии усталостных испытаний.

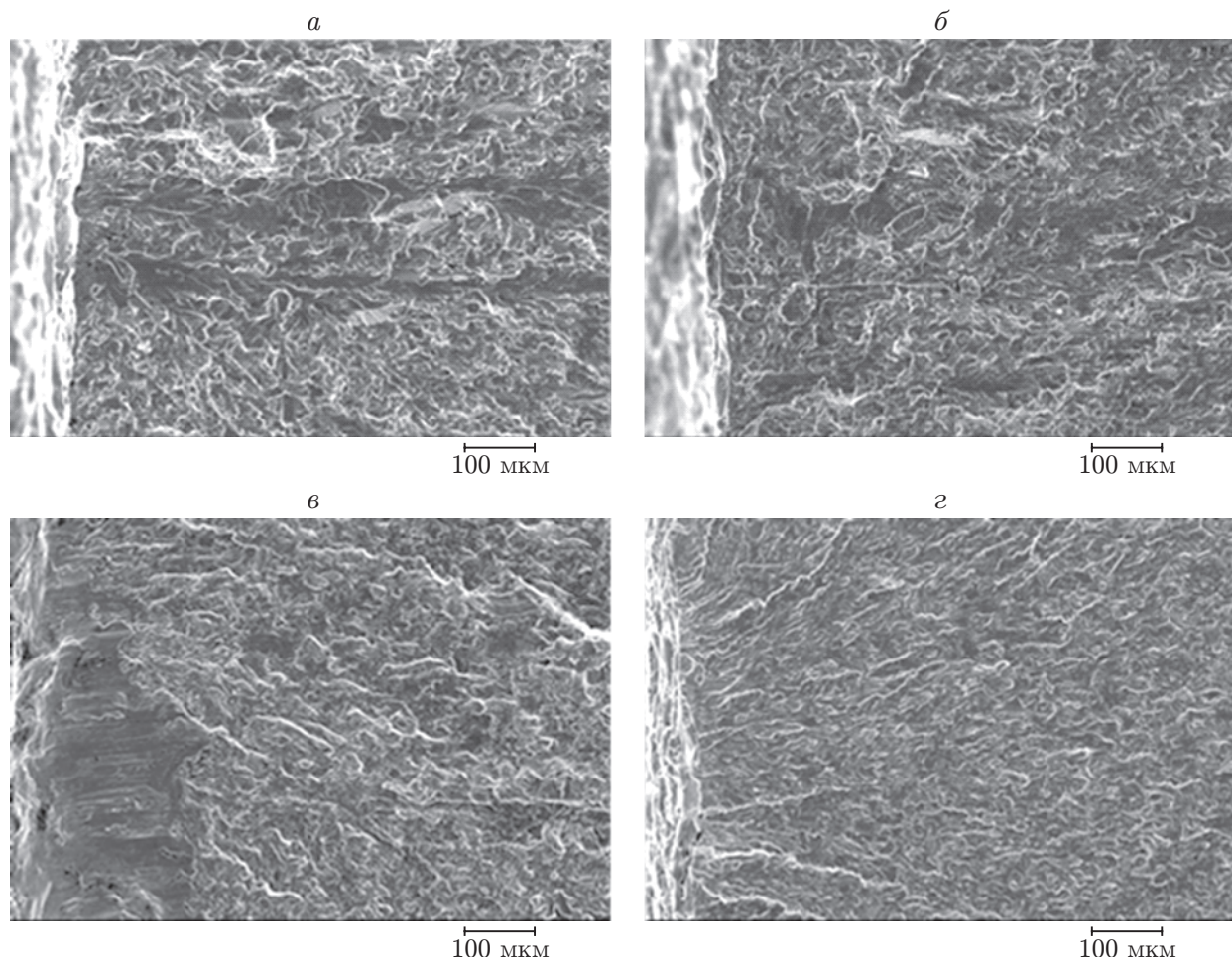


Рис. 6. Поверхности разрушения образцов, испытанных при максимальном напряжении $\sigma_{\max} = 100$ МПа (*а, б*) и $\sigma_{\max} = 500$ МПа (*в, г*):

а, в — необработанные образцы, *б, г* — образцы, обработанные методом ЛУП

На рис. 6, *а, б* приведены поверхности зарождения усталостных трещин первой пары образцов вблизи отверстия. Видно, что поверхность необработанного образца более гладкая, чем поверхность обработанного. При большем увеличении видно, что поверхности разрушения обработанного образца более шероховатые. С увеличением амплитуды напряжений шероховатость поверхности увеличивается. На рис. 6, *в, г* представлены поверхности разрушения образцов, испытанных при максимальном напряжении $\sigma_{\max} = 500$ МПа. У необработанного образца область поверхности вблизи концентратора напряжений является гладкой, у образца, обработанного методом ЛУП, такая область отсутствует. Это свидетельствует об изменении механизма зарождения трещины после проведения лазерного упрочнения.

Морфология переходной зоны для обоих образцов первой пары характеризуется наличием пустот и впадин. В отличие от необработанного образца в образце, обработанном методом ЛУП, количество впадин небольшого размера существенно увеличилось, причем они расположены более плотно. Это свидетельствует о том, что ЛУП позволяет увеличить пластичность переходной зоны и зоны, в которой распространяется трещина, тем самым улучшая усталостные характеристики.

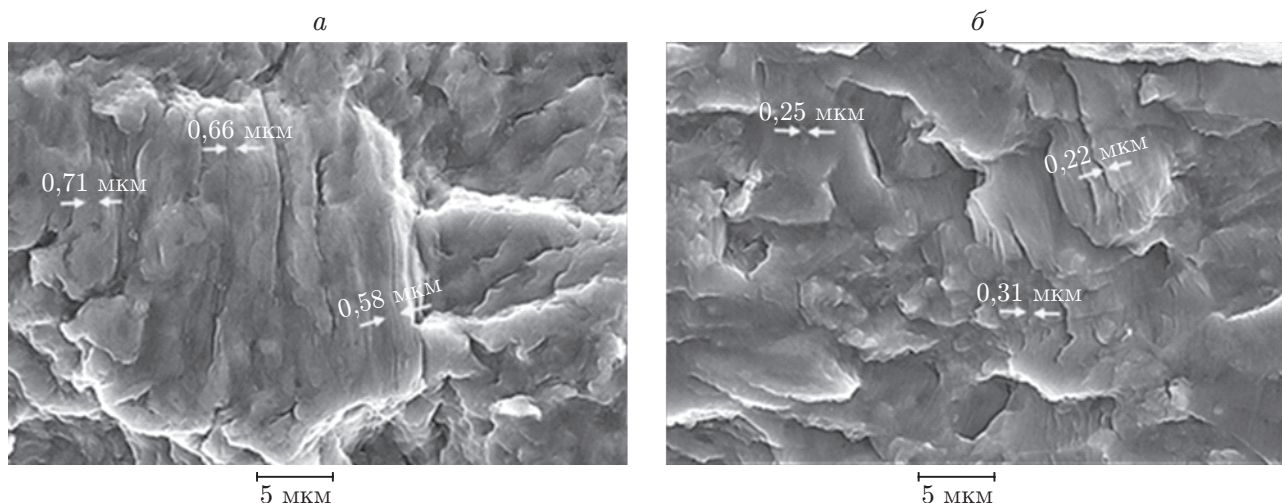


Рис. 7. Усталостные бороздки в образцах:

а — необработанный образец, *б* — образец, обработанный методом ЛУП

На рис. 7 показаны поверхности образцов первой пары, на которых видны усталостные бороздки, возникающие в результате приложения к образцу нагрузки. Бороздки расположены параллельно друг другу и перпендикулярно направлению роста трещины. Расстояние между ними зависит от скорости распространения усталостной трещины: чем меньше расстояние, тем меньше скорость роста трещины. На поверхности обработанного образца плотность расположения усталостных бороздок больше, чем на поверхности необработанного образца, что указывает на более медленный рост усталостной трещины. В среднем расстояние между бороздками уменьшилось на 0,39 мкм.

Заключение. В работе изучено влияние лазерной ударной проковки на усталостную долговечность образцов из титанового сплава ОТ4-0 с концентраторами напряжений. После обработки образцов были проведены испытания на усталость при различных циклах нагружения.

Определены оптимальные параметры лазерной ударной проковки титанового сплава ОТ4-0: энергия лазера — 3 Дж, длительность импульса — 10 нс, однократная проковка.

Толщина слоя, в котором возникают остаточные сжимающие напряжения, увеличивается с увеличением количества проходов лазера.

Изучено влияние ЛУП на усталостную долговечность титанового сплава ОТ4-0. Увеличение долговечности зафиксировано на различных участках кривой усталости, что свидетельствует об эффективности лазерной ударной обработки деталей, эксплуатируемых в разных условиях.

Лазерная ударная обработка позволяет значительно уменьшить скорость роста усталостных трещин, о чем свидетельствуют результаты эксперимента, в частности исследования микроструктуры поверхности разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванова В. С.** Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Терентьев. М.: Металлургия, 1975.
2. **Hertzberg R. W.** Deformation and fracture mechanics of engineering materials. 4th ed. N. Y.: John Wiley and Sons, 1996.
3. **Schijve J.** Fatigue of structures and materials. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2003.

4. **Ding K., Ye L.** Laser shock peening: performance and process simulation. Cambridge: Woodhead Publ. Ltd, 2006.
5. **Yang J. M., Her Y. C., Han N., Clauer A.** Laser shock peening on fatigue behavior of 2024-T3 Al alloy with fastener holes and stopholes // *Materials Sci. Engng. A*. 2001. V. 298. P. 296–299.
6. **Huang S., Zhu Y., Guo W., et al.** Impact toughness and microstructural response of Ti-17 titanium alloy subjected to laser shock peening // *Surface Coatings Technol.* 2017. V. 327. P. 32–41.
7. **Achinta M., Nowell D., Furfari D., et al.** Fatigue behavior of geometric features subjected to laser shock peening: Experiments and modeling // *Intern. J. Fatigue*. 2014. V. 62. P. 171–179.
8. **Correa C., Ruiz de Lara L., Díaz M., et al.** Effect of advancing direction on fatigue life of 316L stainless steel specimens treated by double-sided laser shock peening // *Intern. J. Fatigue*. 2015. V. 79. P. 1–9.
9. **Fomin F., Klusemann B., Kashaev N.** Surface modification methods for fatigue properties improvement of laser-beam-welded Ti–6Al–4V butt joints // *Procedia Struct. Integr.* 2018. V. 13. P. 273–278.
10. **E837-08.** Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method. West Conshohocken: Amer. Soc. Testing Materials, 2008.
11. **Sticchi M., Schnubel D., Kashaev N., Huber N.** Review of residual stress modification techniques for extending the fatigue life of metallic aircraft components // *Appl. Mech. Rev.* 2015. V. 67. 010801.
12. **Chupakhin S., Kashaev N., Klusemann B., Huber N.** Artificial neural network for correction of effects of plasticity in equibiaxial residual stress profiles measured by hole drilling // *J. Strain Anal. Engng Design*. 2017. V. 52, N 3. P. 137–151.
13. **Zhou J. Z., Meng X. K., Huang S., et al.** Effects of warm laser peening at elevated temperature on the low-cycle fatigue behavior of Ti6Al4V alloy // *Materials Sci. Engng. A*. 2015. V. 643. P. 86–95.
14. **Peng Y., Chen J., Dong J.** Experimental data assessment and fatigue design recommendation for stainless-steel welded joints // *Metals*. 2019. V. 9, N 7. 723.

*Поступила в редакцию 24/III 2021 г.,
после доработки — 26/III 2021 г.
Принята к публикации 26/IV 2021 г.*
