

Экспериментально-теоретический метод оптимизации параметров процесса лазерной резки образцов материалов из алюминиевых сплавов по критерию максимальной долговечности

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Предложен экспериментально-теоретический метод оптимизации параметров процесса лазерной резки образцов материалов по критерию максимальной долговечности, которую находят из системы уравнений, связывающих долговечность с параметрами относительных факторов последствия процесса лазерной резки (микротвердости зоны термического воздействия, протяженности этой зоны и высоты микронеровностей). Каждый из этих параметров последствия процесса лазерной резки выражен через относительные факторы причины снижения долговечности – параметры процесса: скорость лазерной резки, давление вспомогательного газа и мощность лазерного излучения регрессионной зависимостью аналогичного вида.

Ключевые слова: долговечность, лазерная резка, параметры факторов последствия и причины изменения долговечности образца, регрессионные уравнения связи.

Украина входит в десятку государств мира, имеющих полный цикл создания современных воздушных судов (ВС) транспортной категории, по своим эксплуатационным характеристикам не уступающих зарубежным аналогам [1].

Однако жесткая конкуренция на мировом рынке авиационных услуг требует не только высокого функционального качества поставляемых ВС, но и привлекательной для покупателя их цены, так как критерий минимального отношения «цена – качество» определяет успех в современном авиационном бизнесе [2].

Приемлемая цена ВС характеризуется многими составляющими, среди которых видное место принадлежит себестоимости продукции ВС, зависящей от трудоемкости производственных процессов. В связи с этим внедрение в серийное производство высокоэффективных современных технологий является одним из определяющих факторов снижения стоимости ВС. К числу таких технологических процессов относится и лазерная резка силовых панелей планера ВС, объем которых составляет значительную долю заготовительных работ.

Как отмечалось [3], лазерный раскрой материалов, как и другие процессы их обработки (пробивка отверстий, сварка, поверхностное упрочнение и др.), имеет ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с традиционными механическими процессами (вырубка, фрезерование) в аспекте интенсификации производства деталей из листовых материалов, снижения трудоемкости и в итоге его себестоимости.

Однако любой процесс разделения материала вызывает в большей или меньшей степени определенное изменение его свойств в непосредственной близости к зоне этого разделения вследствие возникновения структурных химических (металлографические превращения) или физических (остаточные напряжения) факторов, влияющих на несущую способность деталей при их эксплуатации в изделиях [4].

Обеспечивая существенное снижение производственных затрат и экономию времени, лазерная резка силовых панелей из ряда алюминиевых сплавов, как установлено в процессе предварительных исследований, может явиться причиной некоторого снижения их долговечности, а следовательно, и ресурса планера ВС.

В связи с этим проведение комплексных исследований, позволяющих установить критерии экономической эффективности лазерной резки силовых панелей планера ВС из алюминиевых сплавов при обеспечении их высокого качества и ресурса изделия, конкурентоспособного на рынке авиаперевозок, является актуальной проблемой.

В случае лазерного раскроя изменения структуры и свойств материала провоцируются высокой температурой в зоне реза [4 – 5]. Эти изменения структуры и свойств материала имеют протяженность порядка 1 мм от границы реза, образуя область (зону), обладающую характеристиками, отличными от имеющих место вне этой зоны.

Исследования, проводимые рядом авторов [5 – 7], показали, что материал этой зоны обладает двумя основными особенностями (факторами):

- наличием микронеровностей в виде гратов (наплывов) и заусенцев, увеличивающих шероховатость поверхности зоны реза;
- охрупчиванием материала, проявляющимся в интегральном увеличении микротвердости в этой зоне.

Оба этих фактора в силу малой протяженности зоны лазерного реза, называемой зоной термического влияния (ЗТВ), не могут оказать ощутимого влияния на статическую прочность деталей, полученных лазерным раскроем, когда подвергающееся нагружению растягивающими усилиями поперечное сечение детали существенно больше, чем у образца материала, специально изготовленного для анализа влияния ЗТВ при лазерном раскрое в сравнении с вырубкой или фрезерованием [5 – 7]

Однако эти комплексные факторы могут явиться причиной снижения долговечности образцов материалов после лазерной резки, так как наличие микронеровностей (гратов или заусенцев) на границе реза приводит к развитию в них микротрещин, а увеличение (приращение) микротвердости в ЗТВ образцов, вызывает охрупчивание материала, способствующее возникновению и последующему развитию микротрещин.

Таким образом, для разных материалов возможны четыре сочетания этих комплексных факторов:

1. Наличие охрупчивания (изменения микротвердости) и гратов (заусенцев). Это самый негативный вариант, приводящий, вероятно, к наибольшему снижению долговечности. В этом сочетании комплексных факторов, по-видимому, наибольшее влияние оказывает режим лазерной резки, вызывающий граты.

Вторичную роль играет природа материала, провоцирующая охрупчивание. Однако на охрупчивание может влиять и температурный режим лазерной резки, а также ее скорость и другие составляющие режима. В этом варианте наибольшую эффективность, т.е. наименьшее снижение долговечности, представляется оправданным искать в рамках оптимизации режима лазерной резки.

2. Наличие гратов без видимого охрупчивания в зоне резки. В этом варианте необходим поиск оптимального режима лазерной резки.

3. Наличие охрупчивания при отсутствии гратов. В этом варианте, по-видимому, дальнейшая оптимизация режима малоэффективна. Следует принять радикальные меры: зашлифовать лазерный рез на глубину ЗТВ.

4. Отсутствие гратов и охрупчивания. В этом варианте режим лазерной резки оптимален во всех своих составляющих в сочетании с природой материала, индифферентной к термическому влиянию лазерной резки.

Однако все предположения, высказанные выше, относительно оптимизации параметров, входящих в указанные выше четыре сочетания комплексных факторов, в целях минимизации снижения долговечности материала, требуют теоретических и экспериментальных исследований.

Долговечность (усталость) металлов изучается уже 100 лет исследователями всего мира. Только отечественная литература по этой проблеме насчитывает до 100 монографий и десятки тысяч публикаций. Однако проблема далека от полного решения в ее различных (специфических) аспектах. Именно одним из таких аспектов является влияние лазерной резки на долговечность панелей, анализируемое выше.

По-видимому, непосредственное (прямое) решение задачи чрезвычайно сложно или практически невозможно. Решение видится в сравнительном (косвенном) подходе.

Чтобы исключить влияние множества действующих факторов [3], представляется оправданным ставить задачу в плане сравнения искомой функции долговечности образцов, полученных лазерным раскроем, с идентичными образцами из того же материала и тех же геометрических размеров, изготовленных технологическим методом, наименее влияющим на зону реза, – фрезерованием.

Здесь просматриваются два подхода:

1. Чисто экспериментальный. Сравнивают результаты испытаний на долговечность двух партий образцов, изготовленных лазерным раскроем и фрезерованием. Полученный результат однозначно определяет, насколько технология фрезерования по долговечности эффективнее технологии лазерного раскроя.

Однако при этом трудоемкость подхода оказывается весьма высокой, так как каждое изменение любого фактора, определяющего режим раскроя, потребует повторения полного цикла испытаний образцов.

2. Теоретико-экспериментальный. Эвристический анализ последствий исследуемого процесса лазерной резки приводит к заключению, что задача может быть существенно упрощена, если удастся разделить взаимосвязанные факторы причины снижения долговечности образцов материалов после лазерной резки и следствия (последствия) этого процесса.

Несомненно, факторами причины снижения долговечности являются параметры самого технологического процесса лазерной резки. Факторы следствия снижения долговечности – изменение свойств или формоизменение образцов материала в результате воздействия на этот материал параметров технологического процесса лазерной резки (факторов причины).

В качестве факторов следствия снижения долговечности установлены следующие факторы конкретного материала:

- осредненная микротвердость ЗТВ $H_{\mu(20)ЗТВ}$, МПа;
- ширина (протяженность) ЗТВ $t_{ЗТВ}$, мм;
- средняя высота микронеровностей (гратов, заусенцев) h_z , мм;
- микротвердость исходного материала (в состоянии поставки) $H_{\mu(20)0}$, МПа;

– толщина образца материала t_0 , мм.

Первой особенностью приведенного перечня факторов является то, что два последних оказывают влияние на последствия лазерного реза – снижение долговечности, однако не представляет собой факторы этого процесса.

Второй особенностью перечня факторов последствия является их различная размерность, затрудняющая дальнейшую их формализацию в соответствующей математической модели.

Обе эти особенности представляется оправданным нейтрализовать конструированием трех взаимонезависимых факторов:

– относительная осредненная микротвердость ЗТВ, отнесенная к микротвердости исходного материала $H_{\mu(20)0}$:

$$X_1 = \bar{H}_{\mu(20)ЗТВ} = \frac{H_{\mu(20)ЗТВ}}{H_{\mu(20)0}}; \quad (1)$$

– относительная протяженность ЗТВ, отнесенная к толщине образца материала t_0 :

$$X_2 = \bar{t}_{ЗТВ} = \frac{t_{ЗТВ}}{t_0}; \quad (2)$$

– относительная средняя высота микронеровностей, отнесенная к толщине образца материала t_0 :

$$X_3 = \bar{h}_2 = \frac{h_2}{t_0}. \quad (3)$$

При выявленных факторах (1) – (3), влияющих на долговечность, задача синтеза математической модели может решаться выбором множественной регрессии [8]. Функцию долговечности представляют в виде [8]

$$\bar{\sigma}_\delta = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \alpha_{ij} X_i X_j, \quad (4)$$

где α_0 – долговечность базового образца, за который принят образец, полученный фрезерованием; $\bar{\sigma}_\delta$ – относительная долговечность образца, отнесенная к долговечности базового (фрезерованного) образца

$$\bar{\sigma}_\delta = \frac{\sigma_{\delta \text{ лаз}}}{\sigma_{\delta \text{ фрез}}}. \quad (5)$$

Принимая $\alpha_0 = 1$, получаем развернутую функцию для относительной долговечности образца материала при лазерном раскрое

$$\bar{\sigma}_\delta = 1 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \alpha_{11} X_1^2 + \alpha_{12} X_1 X_2 + \alpha_{13} X_1 X_3 + \alpha_{22} X_2^2 + \alpha_{23} X_2 X_3 + \alpha_{33} X_3^2, \quad (6)$$

Таким образом, экспериментальному определению в общем случае подлежат девять коэффициентов регрессии. Для их определения необходимо девять партий образцов, испытанных на различных режимах лазерной резки, для которых должна быть определена долговечность. В результате получения девяти

значений $\bar{\sigma}_{\partial i}$ ($i = 1, 2, \dots, 9$) при соответствующих значениях X_1^i, X_2^i, X_3^i ($i = 1, 2, \dots, 9$). При этом максимальное значение $\bar{\sigma}_{\partial max}$ из этих девяти значений, наиболее близко приближающееся к единице, определит собою и квазиоптимальный режим лазерной резки, обеспечивающий значения $\{X_1^k, X_2^k, X_3^k\}_{opt}$. Здесь k соответствует значению $\bar{\sigma}_{max}^k$.

При этом для некоторых режимов лазерной резки образцов материалов возможны три частных случая:

1. Наличие ЗТВ X_1, X_2 и отсутствие видимых средних микронеровностей $X_3=0$. При этом

$$\bar{\sigma}_{\partial} = 1 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_{11} X_1^2 + \alpha_{12} X_1 X_2 + \alpha_{22} X_2^2 \quad (7)$$

и для определения квазиоптимального режима лазерной резки необходимо пять партий образцов, испытанных на долговечность.

2. Отсутствие ЗТВ $X_1 = X_2 = 0$ при наличии микронеровностей X_3 :

$$\bar{\sigma}_{\partial} = 1 + \alpha_3 X_3 + \alpha_{33} X_3^2. \quad (8)$$

В этом случае для определения квазиоптимального режима лазерной резки необходимо две партии образцов, испытанных на долговечность.

3. Материал не теряет долговечности после лазерной резки: $X_1 = X_2 = X_3 = 0, \bar{\sigma}_{\partial} = 1$. В испытаниях на долговечность нет надобности.

Анализ возможностей лазерных установок типа LATINO 2040 фирмы PRIMA INDUSTRIA и им подобных, работающих в непрерывном и импульсном режимах, позволяет выделить следующие основные факторы (параметры), определяющие процесс лазерной резки [9]:

- скорость резки V_p , м/мин;
- мощность лазерного излучения W , Вт;
- давление вспомогательного газа P , МПа;
- диаметр сфокусированного пятна d_f , мм.

Для импульсного режима к этим параметрам добавляются:

- частота следования импульсов ν , Гц;
- длительность импульсов t_u , мс;
- средняя мощность излучения W_{cp} , Вт.

Представлялось бы рациональным в целях общности рассматривать в качестве базового импульсный процесс лазерной резки.

Как и в случае факторов следствия лазерной резки, рассмотренных выше, необходимо ввести относительные безразмерные факторы. При этом каждый из таких факторов будем относить к наибольшему значению интервала (диапазона) регулирования того или иного фактора, допускаемого лазерной установкой*:

- относительная скорость лазерной резки

*) Выбор оснований, к которым отнесены факторы, не принципиален, так как от него зависят только масштабы определяемых в дальнейшем коэффициентов регрессионной математической модели, по которым осуществляется переход к абсолютным значениям факторов.

$$y_1 = \frac{V_p}{V_{p \max}}; \quad (9)$$

– относительное давление вспомогательного газа

$$y_2 = \frac{P}{P_{\max}}; \quad (10)$$

– относительная (средняя) мощность лазерного излучения

$$y_3 = \frac{W_{cp}}{W_{cp \max}}; \quad (11)$$

– относительный диаметр сфокусированного пятна

$$y_4 = \frac{d_f}{d_{f \max}}; \quad (12)$$

– относительная частота следования импульсов

$$y_5 = \frac{\nu}{\nu_{\max}}; \quad (13)$$

– относительная длительность импульсов

$$y_5 = \frac{t_u}{t_{u \max}}. \quad (14)$$

Каждый из этих факторов в той или иной степени влияет на все факторы последствия процесса лазерной резки X_1, X_2, X_3 .

Так как количество факторов причины снижения долговечности достаточно велико (y_1, \dots, y_6), использование регрессионной модели второго порядка, аналогичной (4), применительно к каждому относительному фактору $X_{i \text{ opt}} (i = 1, 2, 3)$

$$X_{i \text{ opt}} = \bar{\beta}_{0i} + \sum_{j=1}^n \beta_j y_j + \sum_{j=1}^n \sum_{\xi=1}^n \beta_{j\xi} y_j y_\xi, \quad (15)$$

где $\bar{\beta}_{0i}$ – значение i -го фактора базового образца, за который принят образец, полученный фрезерованием;*) $X_{i \text{ opt}}$ – значение i -го фактора последствия лазерной резки, определенное при $\{\bar{\sigma}_\delta\}_{\max}$, практически невозможно, так как это потребовало бы определения всех коэффициентов β_i, β_{ij} , существенного увеличения количества образцов материала, а следовательно, и непомерного роста трудоемкости испытаний по затратам времени и средств.

В связи с этим ограничимся на данном этапе использованием вместо регрессионной модели (4) модели вида [8]

$$\bar{\sigma}_\delta = \sum_{i=1}^3 \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \alpha_{ij} X_i X_j \quad (16)$$

и вместо (15) модели вида

*) $\bar{\beta}_{01} = 0, \bar{\beta}_{02} = 0$, так как у фрезерованных образцов ЗТВ отсутствует, $\bar{\beta}_{03} = 1$.

$$X_{i \text{ opt}} = \sum_{i=1}^3 \beta_i y_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} y_i y_j, \quad (17)$$

исключив из них коэффициенты α_0, β_{0i} , а также не учитывая факторы y_4, y_5 и y_6 , тем самым считая самым слабым влияние относительного диаметра сфокусированного пятна, а также факторы импульсного режима лазерной установки.

Математические модели фактора следствия (16) и причины (17) снижения долговечности образцов материалов в результате лазерной резки позволяют предложить следующий экспериментально-теоретический метод оптимизации параметров этого процесса по критерию максимальной долговечности.

Для реализации метода необходимо из системы девяти уравнений (16) при уже известных коэффициентах α_i и α_{ij} выбрать то, в левой части которого имеет место $\{\bar{\sigma}_{\partial}\}_{max}$. Для этой цели необходимо вырезать лазером девять партий образцов, соответствующих девяти параметрам режимов резки y_i^k ($i=1, 2, 3$), определив экспериментально для этих девяти партий девять значений X_i^k ($i=1, 2, 3$), ($k=1, 2, 3$), по формуле (17), представляющей собой систему девяти уравнений с девятью неизвестными коэффициентами β_i и β_{ij} ($i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$). Эти же партии образцов необходимо испытать на долговечность, определив $\bar{\sigma}_{\partial i}$. Подставив в систему уравнений (16) значения $\bar{\sigma}_{\partial i}$ ($i=1, 2, 3$) и ранее определенные значения X_i^k ($i=1, 2, 3$) ($k=1, 2, 3$) и решив систему (16), определим коэффициенты регрессии α, α_{ij} .

Системы уравнений (16) и (17) с уже определенными в них коэффициентами могут использоваться для реализации предложенного экспериментально-теоретического метода оптимизации параметров режима лазерной резки по критерию максимальной долговечности $\{\bar{\sigma}_{\partial i}\}_{max}^{*})$.

Выводы

1. Установлено, что причиной снижения долговечности материала образцов являются факторы (параметры) технологического процесса лазерного раскроя (в первую очередь скорость резания V_l , давление вспомогательного газа p и мощность лазера N), которые обуславливают изменения факторов следствия этого процесса – микронеровностей h_z , микротвердости в ЗТВ $H_{\mu(20)ЗТВ}$ и протяженности этой зоны $t_{ЗТВ}$.

2. Предложена математическая модель снижения относительной долговечности образцов материалов в виде регрессионной зависимости второго порядка (16), связывающая относительную долговечность с относительными

) Отметим, что соответствующие $\{\bar{\sigma}_{\partial i}\}_{max}$ значения параметров y_i, y_j ($i, j=1, 2, 3$) не являются строго оптимальными, так как возможны промежуточные сочетания y_i^, y_j^* и $X_i^*(y_i^*, y_j^*)$, приводящие к $\{\bar{\sigma}_{\partial i}\}$, среди которых может существовать $\{\bar{\sigma}_{\partial i}^*\}_{max} > \{\bar{\sigma}_{\partial i}\}_{max}$. Проверку такой возможности нетрудно сделать известными способами.

факторами последствия лазерного раскроя, каждый из которых связан структурно аналогичной регрессионной зависимостью с относительными факторами причины снижения долговечности (17).

3. Предложенные математические модели позволили реализовать экспериментально-теоретический метод прогнозирования снижения долговечности образцов материалов в зависимости от их свойств и режимов лазерной резки, который предшествует определению экономической эффективности рассматриваемого технологического процесса по одному из критериев, синтезированных в работе [10].

Список литературы

1. Цивільна авіація України. Історико-аналітичний огляд. – К.: Аеробізнес, 2003. – 127 с.
2. Кривов Г.А. Основные тенденции корпоративно-индустриальной стадии развития авиационного производства / Г.А. Кривов // Технологические системы. – 2000. – № 3(5). – С. 5 – 18.
3. Гайдачук В.Е. Анализ эффективности технологии лазерной обрезки листовых деталей из алюминиевых сплавов в авиационном производстве / В.Е. Гайдачук, А.И. Костенко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2(62). – Х., 2010 – С. 85 – 98.
4. Костенко А.И. Микроструктурный анализ зоны термического влияния после лазерной резки образцов листовых материалов и их механические характеристики / А.И. Костенко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 46. – Х, 2010.– С. 114 – 127.
5. Григорянц А.Г. Лазерная техника и технология: в 7 кн. – Кн. 7. Лазерная резка металлов: учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорянц, А.А. Соколов; под ред. А.Г. Григорянца. – М.: Высш. шк., 1988. – 127 с.
6. Дьюш У. Лазерная технология и анализ материалов / У. Дьюш. – М.: Мир, 1986. – 504 с.
7. Блинков В.В. Анализ моделей лазерной резки металлов в среде неактивного газа / В.В. Блинков / Тр. Ин-та теор. физики и прикл. механики СО РАН. – 1999. – Т. 7 (24), № 2. – С. 133 – 150.
8. Демиденко Е.В. Линейная и нелинейная регрессии / Е.В. Демиденко. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
9. Блинков В.В. Лазерные технологии в авиационной промышленности / В.В. Блинков // Лазер – Информ. – 2009. – №23 (422). – С. 5 – 9.
10. Костенко А.И. Критерии эффективности технологии лазерного раскроя листовых конструкционных материалов для производства панелей воздушных судов транспортной категории / А.И. Костенко // Авиационно-космическая техника и технология, 2010. - № 4(71). – С. 5 – 11.

Рецензент: канд техн. наук, проф. В.В. Кириченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 01.06.10

Експериментально-теоретичний метод оптимізації параметрів процесу лазерного різання зразків матеріалів з алюмінієвих сплавів за критерієм максимальної довговічності

Запропоновано експериментально-теоретичний метод оптимізації параметрів процесу лазерного різання зразків матеріалів за критерієм максимальної довговічності, яку знаходять із системи рівнянь, що пов'язують довговічність з параметрами відносних чинників результату процесу лазерного різання (мікротвердості зони термічної дії, протяжності цієї зони і висоти мікронерівностей).

Кожний із цих параметрів результату процесу лазерного різання виражено через відносні чинники причини зниження довговічності – параметри процесу: швидкість лазерного різання, тиск допоміжного газу і потужність лазерного випромінювання регресійною залежністю аналогічного вигляду.

Ключові слова: довговічність, лазерне різання, параметри чинників результату і причини зміни довговічності зразка, регресійні рівняння зв'язку.

Experimental-theoretical method of optimization parameters for process of the laser cutting of standards of materials from aluminium alloys on the criterion of maximal longevity

The experimental-theoretical method of optimization of parameters of process of the laser cutting of standards of materials on the criterion of maximal longevity, which is found from the system of equalizations linking longevity to the parameters of relative factors of consequence of process of the laser cutting, is offered (microhardness of area of thermal influence, extent of this area and height of microscopic).

Each of these parameters of consequence of process of the laser cutting is expressed through the relative factors of reason of decline of longevity - parameters of process: speed of the laser cutting, pressure of auxiliary gas and power of laser radiation by regressive dependence of a similar kind.

Keywords: longevity, laser cutting, parameters of factors of consequence and reason of change of longevity of standard, regressive equalizations of communication.