

УДК 629.7.002: 621.375.826

А.И. Костенко,  
В.Е. Гайдачук, д-р техн. наук,  
И.П. Змиевской

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ РАСКРОЕМ ДЛЯ ПАНЕЛЕЙ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА**

В последние годы в отечественной и зарубежной практике все шире применяют лазерные технологии для раскроя панелей планера самолета из алюминиевых сплавов [1–2]. Это связано с рядом преимуществ лазерного раскроя (ЛР) по сравнению с фрезерованием и другими технологическими процессами, в том числе высокой производительностью процесса, быстрой окупаемостью капитальных затрат на оборудование (0,5 – 1 год) [2] и др.

Стоимость лазерного раскроя погонного метра листа из алюминиевого сплава при энергетических затратах в США составляет 1 кВт/ч электроэнергии в 0,55\$ и 1м<sup>3</sup> азота 0,92\$ при толщине листа 1,5 мм – 0,043\$, а при толщине листа 3 мм – 0,2\$, что соответствует производительности (90...250) м/ч, значительно превосходящей раскрой фрезерованием [2].

В то же время лазерный раскрой листов из алюминиевых сплавов имеет характерные особенности, связанные с их оптическими и теплофизическими характеристиками: низкой поглотательной способностью для лазерного излучения и большой теплопроводностью [1, 3].

В связи с этим на границе реза в зависимости от основных параметров лазерного раскроя (скорости резания, мощности лазерного излучения и давления вспомогательного газа), связанных с параметрами его последствия (микротвердостью в зоне термического влияния (ЗТВ), ее протяженностью (шириной) и шероховатостью в совокупности с гратами – заусенцами и застывшими каплями реза), возникают предпосылки для снижения долговечности панели в условиях эксплуатации самолета [4].

В нашей работе [4] приведены результаты микроструктурного анализа зоны термического влияния образцов тонколистовых материалов различной толщины из неупрочняемых алюминиевых сплавов АМцМ, АМцН, АМг2М, АМг6М, упрочняемых Д16АМ, 1163АМВ, АК-1чУТ1ВК, АК4АТ1, Д16АТ, а также сталей 30ХГСА и 12Х18Н10Т после их раскроя на установке PLATINO 2040 производства фирмы PRIMA INDUSTRIA (Италия) с лазером на углекислом газе серии CP 4000 по оптимальным режимам. Исследована микротвердость этих материалов в зоне термического влияния по сравнению с замеренной на образцах, рас-

кроенных фрезерованием. Выявлены особенности и степень чувствительности различных материалов к нагреву при лазерной резке. Приведены также результаты испытаний образцов из данных листовых материалов, полученных лазерным раскроем и фрезерованием, на прочность при растяжении и дан их анализ.

Из этого анализа следует, что статическая прочность образцов, вырезанных лазерным лучом и фрезерованием, практически одинакова, а охрупчивание материала в ЗТВ может отразиться на долговечности панелей планера самолета из алюминиевых сплавов.

В связи с этим в [5] предложен экспериментально-теоретический метод оптимизации параметров процесса лазерной резки образцов материалов по критерию максимальной долговечности, которые находят из системы уравнений, связывающих долговечность с параметрами относительных факторов последствия процесса лазерной резки (микротвердости зоны термического влияния, 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 – регрессионными зависимостями аналогичного вида.

В работе [6] описан предложенный нами трехуровневый алгоритм оптимизации режимов лазерного раскроя заготовок силовых панелей из алюминиевых сплавов планера самолета в серийном производстве по критерию их максимальной долговечности.

Алгоритм основан на реализации экспериментально-теоретического метода прогнозирования снижения долговечности образцов материалов в зависимости от изменения их свойств в ЗТВ лазерного реза, связанных с параметрами режимов данного технологического процесса их математическими моделями в виде регрессионных зависимостей второго порядка.

Реализация многоуровневого алгоритма для серийного производства позволяет определить близкие к оптимальным параметры режима лазерного раскроя для различных типов материалов.

Однако реализация результатов, изложенных в работах [5, 6] требует значительного объема экспериментальных исследований долговечности образцов, полученных ЛР.

Известно, что испытание образцов материалов на долговечность (усталость) чрезвычайно трудоемкий и затратный по средствам и времени процесс. С другой стороны, заключение о долговечности того или иного конструкционного материала всегда имеет ряд существенных оговорок, ограничивающих его четкими граничными условиями [7].

Стандарт [8] различает многоцикловую усталость, соответствующую базе  $10^6$  циклов нагружения, и малоцикловую усталость, ограниченную базой  $4 \cdot 10^4$  циклов нагружения (табл. 1) [9].

Таблица 1 – Малоцикловая усталость некоторых алюминиевых сплавов

Номер п/п	Наименование сплава	Марка сплава	$N_{мцу}$ , $10^4$ циклов
1	Сплавы системы <i>Al – Li</i>	1420ТГ1	10,5
		1421ТГ1	15
		>1461	25
		1460	30-50
		1464	20-25
		1468	>25
2	Сплавы системы <i>Al – Cu – Mg</i> , <i>Al – Cu – Mg – Fe – Ni</i>	1163АТ (216)	11
3	Сплавы системы <i>Al – Zn – Mg – Cu</i> , <i>Al – Zn – Mg</i>	1973Т2 (7150, Т76)	22
4	Сплавы системы <i>Al – Zn – Mg</i> <i>Al – Zn – Mg – Cu</i>	9504Т2	16
		В96 Ц3 – Т2	20
		В96 Ц-3Т12	22

Оговариваются характер цикла нагружения, вид и размеры образца, уровень нагрузки, условия проведения испытаний и оборудование, а также требования к точности геометрических размеров образцов и к объему их партий, гарантирующему приемлемую степень точности результатов.

Отмеченный выше далеко не полный перечень требований и условий свидетельствует о том, что экспериментальные исследования сравнительной долговечности образцов материала панелей планера самолета, полученных лазерным раскроем и фрезерованием, могут быть ограничены временным интервалом в тысячи часов и объемом сотен образцов. Поэтому были предприняты приемлемые обоснованные ограничения программы с учетом исследований, проведенных в [4 – 6], и следующих из них выводов, а также ряда публикаций других авторов [2 – 3].

Прежде всего объем испытаний был ограничен наиболее распространенным по применению в панелях крыльев и фюзеляжей гражданских самолетов сплавом Д16АТ. Кроме этого на образцах, вырезанных лазерной резкой для испытаний на долговечность в центре рабочей зоны выполнялось отверстие диаметром 4 мм, которое значительно увеличивало ЗТВ в критическом сечении образца и, соответственно, параметры ее влияния  $H_{\mu(20) ЗТВ}$ ,  $t_{ЗТВ}$  и  $Rz$ , а следовательно, существенно снижало долговечность образцов по сравнению с аналогами без концентратора напряжений в виде отверстия, сокращая время испытаний.

С учетом всего отмеченного выше была разработана сокращенная программа исследований долговечности при малоцикловой усталости

образцов. Этой программой было предусмотрено изготовление всех партий образцов из сплава Д16АТ из одного листа материала толщиной  $\delta = 3$  мм и  $\delta = 1$  мм и проведение исследований:

- микротвердости образцов, вырезанных фрезерованием;
- микротвердости в ЗТВ, ширины этой зоны, а также средней величины микронеровностей в зоне резания образцов, вырезанных лазерным лучом на установке Platino 2040 HS.

Образцы для испытаний на долговечность имели геометрические параметры, указанные на рис. 1, соответствующие IV типу образцов по ГОСТ 25.502-79.

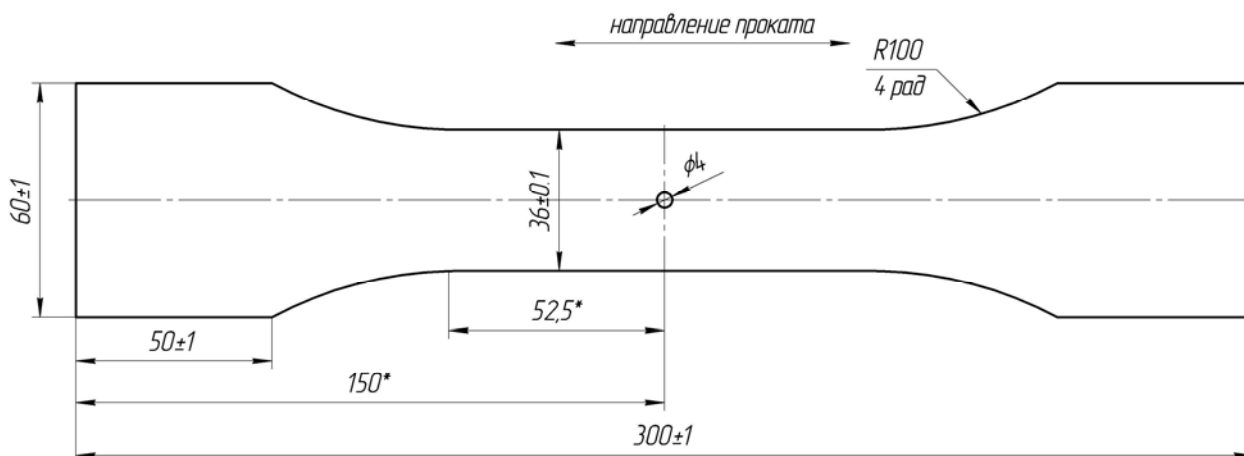


Рисунок 1 – Геометрические параметры образца пластины с отверстием

Образцы изготавливались в объеме трех серий. Первая серия в количестве трех образцов, предназначенных для определения исходной микротвердости материала Д16АТ, имела размеры 20x20x3 мм. Вторая серия изготавливалась вырезкой из листа фрезерованием на режимах, принятых при резке панелей планера самолета в серийном производстве. Число образцов второй серии равно пяти. Третья серия образцов изготавливалась лазерной резкой на установке Platino 2040 HS в количестве 35 штук по пять образцов в каждой группе. Каждая группа из пяти образцов вырезалась на разных режимах лазерной установки.

Испытания образцов на долговечность проводилось на гидравлической машине немецкого производства ЦДМ-10Пу без вариатора частот на постоянной частоте 11,3 Гц.

Испытания образцов по данной программе производилось при отнулевых циклах при максимальной нагрузке  $P = 1404$  кгс и напряжениях  $\sigma_{\text{вр}_{\text{max}}}^{\text{min}} = 0 \dots 130$  МПа до разрушения после выхода машины на рабочий режим по истечении шести часов при температуре в лаборатории 20°C и влажности, соответствующей требованиям стандарта [8].

На рис. 2 приведены фотографии типовых разрушений образцов некоторых из испытанных партий. Как видно, все образцы разрушались в ослабленной рабочей зоне по отверстию.



Рисунок 2 – Типичный характер разрушения образцов различных партий

Режимы лазерной резки, соответствующие каждой группе двух серий образцов, а также число циклов малоциклового усталости и их отношение к базовому значению приведены в табл. 2 и 3. Базовое среднее значение циклов малоциклового усталости для партий фрезерованных образцов  $T_{ц\phi} = 232400$  циклов.

На испытанных партиях образцов проводили замеры микротвердости  $H_{\mu(20)}$ , ширины ЗТВ  $t_{ЗТВ}$  и средних значений микронеровностей  $Rz$  образцов всех групп третьей партии в трех сечениях рабочей части по стандартным методикам. Результаты замеров приведены в табл. 4 и 5.

Для практической реализации предложенного ранее экспериментально-теоретического метода оптимизации параметров процесса лазерной резки образцов материалов из алюминиевых сплавов по критерию максимальной долговечности  $\bar{N}_{ц}$  (относительное значение циклов малоциклового усталости для партий образцов, раскроенных лазером)

сначала необходимо определить неизвестные коэффициенты  $\alpha_j$  для множественной линейной\*) модели регрессионного анализа:

$$\bar{N}_{\zeta i} = \alpha_0 + \alpha_1 X_{i1} + \alpha_2 X_{i2} + \alpha_3 X_{i3}, \quad (1)$$

где  $i = 1 \dots n$  – номер выборки наблюдений,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – коэффициенты регрессии, которые показывают, на какую величину в среднем изменится относительное значение циклов малоциклового усталости  $\bar{N}_{\zeta}$ ;  $\alpha_0$  – свободный член, который также подлежит определению;  $X_1 = \bar{H}_{\mu(20)ЗТВ}$ ;  $X_2 = \bar{t}_{ЗТВ}$ ,  $X_3 = \bar{Rz}$ .

Таблица 2 – Режимы лазерной резки и среднее значение малоциклового усталости образцов алюминиевого сплава Д16АТ при  $\delta=3\text{мм}$

$\delta$ , мм	Номер партии	$V$ , м/мин	$\bar{V} = \frac{V}{V_{\text{баз}}}$	$P$ , МПа	$\bar{P} = \frac{P}{P_{\text{max}}}$	$W$ , кВт	$\bar{W} = \frac{W}{W_{\text{max}}}$	$N_{\zeta \text{ ср}}, \cdot 10^3 \text{ц}$	$\bar{N}_{\zeta \text{ ср}}$
3	1	4	1	1,3	1	3	1	184,76	0,795
	2	2,5	0,61	1	0,77	2,25	0,75	135,95	0,585
	3	0,9	0,225	0,6	0,46	1,5	0,5	108,07	0,465
	4	4	1	1	0,77	2,25	0,75	146,41	0,63
	5	2,45	0,61	0,6	0,46	1,5	0,5	101,09	0,435
	6	4	1	0,6	0,46	1,5	0,5	149,9	0,645
	7	0,9	0,225	1,3	1	3	1	125,5	0,54

Таблица 3 – Режимы лазерной резки и среднее значение малоциклового усталости образцов алюминиевого сплава Д16Т при  $\delta=1\text{мм}$

$\delta$ , мм	Номер партии	$V$ , м/мин	$\bar{V} = \frac{V}{V_{\text{баз}}}$	$P$ , МПа	$\bar{P} = \frac{P}{P_{\text{max}}}$	$W$ , кВт	$\bar{W} = \frac{W}{W_{\text{max}}}$	$N_{\zeta \text{ ср}}, \cdot 10^3 \text{ц}$
1	1	10	1	0,998	0,76	3	1	0,92
	2	7	0,7	0,998	0,76	3	1	0,683
	3	4	0,4	0,6	0,46	0,9	0,3	0,543
	4	10	1	1,3	1	1,6	0,53	0,735
	5	7	0,7	0,6	0,46	3	1	0,507
	6	4	0,4	0,998	0,76	0,9	0,3	0,753
	7	7	0,7	1,3	1	2,25	0,75	0,63

\*)Как отмечалось ранее, для построения нелинейных множественных моделей регрессионного анализа требуется существенное увеличение количества образцов материала, а следовательно, и непомерный рост трудоемкости испытаний по затратам времени и средств. Поэтому в силу большой трудоемкости экспериментов на данном этапе ограничались использованием только линейной модели регрессии. Не учитывались также случайные ошибки наблюдения, не зависящие друг от друга.

Таблица 4 – Параметры последействия лазерной резки образцов из алюминиевого сплава Д16АТ толщиной  $\delta=3$  мм

$\delta$ , мм	Номер партии	$H_{\mu(20)ЗТВ}$ МПа	$\bar{H}$	$t_{ЗТВ}$ , мм	$\bar{t}_{ЗТВ}$	$Rz$ , мм	$\bar{Rz}$	$N_{ц\text{ ср}}$ , $\cdot 10^3$ ц	$\bar{N}_{ц\text{ ср}}$
3	1	1000	2	0,25	0,08	0,011	$3,667 \cdot 10^{-3}$	184,76	0,795
	2	900	1,8	0,3	0,1	0,030	$10,0 \cdot 10^{-3}$	135,95	0,585
	3	690	1,38	0,4	0,133	0,04	$13,33 \cdot 10^{-3}$	108,07	0,465
	4	890	1,78	0,25	0,091	0,02	$6,667 \cdot 10^{-3}$	146,41	0,63
	5	900	1,8	0,3	0,1	0,055	$18,33 \cdot 10^{-3}$	101,09	0,435
	6	970	1,94	0,25	0,085	0,015	$5 \cdot 10^{-3}$	149,9	0,645
	7	750	1,6	0,4	0,133	0,035	$11,66 \cdot 10^{-3}$	125,5	0,54

Таблица 5 – Параметры последействия лазерной резки образцов из алюминиевого сплава Д16АТ толщиной  $\delta=1$  мм

$\delta$ , мм	Номер партии	$H_{\mu(20)ЗТВ}$ МПа	$\bar{H}$	$t_{ЗТВ}$ , мм	$\bar{t}_{ЗТВ}$	$Rz$ , мм	$\bar{Rz}$	$N_{ц\text{ ср}}$ , $\cdot 10^3$ ц
1	1	470	0,94	0,07	0,07	0,015	0,015	0,92
	2	670	1,34	0,015	0,015	0,03	0,03	0,683
	3	860	1,72	0,155	0,155	0,045	0,045	0,543
	4	470	0,94	0,08	0,08	0,025	0,025	0,735
	5	670	1,34	0,12	0,12	0,05	0,05	0,507
	6	470	0,94	0,085	0,085	0,02	0,02	0,753
	7	860	1,72	0,14	0,14	0,035	0,035	0,63

Примечание  $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ} = \frac{H_{\mu(20)ЗТВ}}{H_{ЗТВ0}}$ ;  $H_{ЗТВ0} = 500$  МПа;

$$\bar{t}_{ЗТВ} = \frac{t_{ЗТВ}}{\delta_0}; \bar{Rz} = \frac{Rz}{\delta_0}.$$

В матричной форме регрессионная модель (1) имеет следующий вид:

$$(\bar{N}_u) = [X](\alpha) \quad (2)$$

или

$$\begin{pmatrix} \bar{N}_{u_1} \\ \dots \\ \bar{N}_{u_i} \\ \dots \\ \bar{N}_{u_n} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & X_{13} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{i1} & X_{i2} & X_{i3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & X_{n3} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $(\bar{N}_u)$  – вектор-столбец наблюдаемых значений результативного признака (относительное значение циклов малоцикловой усталости);  $[X]$  – матрица наблюдаемых значений аргументов (параметры последствия лазерной резки);  $(\alpha)$  – вектор-столбец неизвестных коэффициентов регрессии, которые не обходимо определить. В первом столбце матрицы  $[X]$  указывается единица при свободном члене  $\alpha_0$ , т.к. предполагается, что существует переменная последствия лазерной резки, которая во всех наблюдениях принимает значения, равные единице.

Для оценки вектора-столбца  $(\alpha)$  использован метод наименьших квадратов, согласно которому в качестве оценки принимают вектор-столбец  $\begin{pmatrix} \tilde{\alpha} \end{pmatrix}$ , минимизирующий сумму квадратов отклонений наблюдаемых значений матрицы  $\bar{N}_u$  от их модельных значений:

$$\begin{pmatrix} \tilde{\alpha} \end{pmatrix} = ([X]^T [X])^{-1} [X]^T (\bar{N}_u), \quad (4)$$

где  $[X]^T$  – транспонированная матрица  $[X]$ ;  $([X]^T [X])^{-1}$  – матрица, обратная матрице  $[X]^T [X]$ .

Реализация алгоритма пошагового регрессионного анализа для результатов испытаний на малоцикловую усталость партий образцов толщиной  $\delta=3$  мм и  $\delta=1$  мм привела к следующим регрессионным уравнениям:

$$\bar{N}_{u(\delta=3)} = 0,202 + 0,257 \bar{H}_{\mu(20)3TB} + 1,121 \bar{t}_{3TB} - 18,863 \bar{Rz}, \quad (5)$$

$$\bar{N}_{u(\delta=1)} = 1,022 - 0,017 \bar{H}_{\mu(20)3TB} + 0,066 \bar{t}_{3TB} - 10,339 \bar{Rz}. \quad (6)$$

Для последующей реализации предложенного метода необходимо было бы при уже известных регрессионных коэффициентах  $\alpha_i$  опреде-



лить те оптимальные параметры последствия лазерного излучения ( $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ\ opt}$ ,  $\bar{t}_{ЗТВ\ opt}$ ,  $\bar{Rz}_{opt}$ ), которые обеспечивали  $\bar{N}_{ц\ max}$  и были бы структурно связаны (регрессионными зависимостями, полученными в результате серии экспериментов) с относительными параметрами лазерного излучения ( $\bar{V}$ ,  $\bar{P}$ ,  $\bar{W}$ ) – косвенными факторами снижения долговечности. Для чего, как уже отмечалось выше, необходимо большое количество трудоемких испытаний, требующих существенных затрат времени и средств.

Для поиска оптимальных параметров последствия лазерного излучения ( $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ\ opt}$ ,  $\bar{t}_{ЗТВ\ opt}$ ,  $\bar{Rz}_{opt}$ ), которые бы обеспечивали  $\bar{N}_{ц\ max}$ , была сформулирована, а затем решена задача оптимизации линейного математического программирования [10]

$$\bar{N}_{ц} = \alpha_0 + \alpha_1 \bar{H}_{\mu(20)ЗТВ} + \alpha_2 \bar{t}_{ЗТВ} + \alpha_3 \bar{Rz} \rightarrow \max \quad (7)$$

в интервалах изменения таких параметров:

$$\begin{aligned} \bar{H}_{\mu(20)ЗТВ\ min} \leq \bar{H}_{\mu(20)ЗТВ} \leq \bar{H}_{\mu(20)ЗТВ\ max}, \\ \bar{t}_{ЗТВ\ min} \leq \bar{t}_{ЗТВ} \leq \bar{t}_{ЗТВ\ max}, \\ \bar{Rz\ min} \leq \bar{Rz} \leq \bar{Rz\ max}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для регрессионных уравнений (5) – (6), полученных в результате испытаний на малоцикловую усталость партий образцов толщиной  $\delta=3$  мм и  $\delta=1$  мм после лазерного раскроя, интервалы изменения величин параметров были равны соответственно:

– для  $\delta=3$  мм

$$\begin{aligned} 1,3 \leq \bar{H}_{\mu(20)ЗТВ} \leq 2, \\ 0,08 \leq \bar{t}_{ЗТВ} \leq 0,133, \\ 3,6 \cdot 10^{-3} \leq \bar{Rz} \leq 19 \cdot 10^{-3}, \end{aligned} \quad (9)$$

– для  $\delta=1$  мм

$$\begin{aligned} 0,9 \leq \bar{H}_{\mu(20)ЗТВ} \leq 1,8, \\ 0,07 \leq \bar{t}_{ЗТВ} \leq 0,155, \\ 0,015 \leq \bar{Rz} \leq 0,05. \end{aligned} \quad (10)$$

Решение задач данного класса не носит принципиальных трудностей, а их алгоритмы изложены в литературе, например, в работе [10].

Проанализируем результаты нахождения решения задачи максимизации (7) для всех партий образцов (табл. 4 и 5) толщиной  $\delta=3$  мм и  $\delta=1$  мм при нахождении оптимальных параметров  $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ}$ ,  $\bar{t}_{ЗТВ}$ ,  $\bar{Rz}$  в заданных интервалах поиска (9) и (10) (табл. 6).

Как следует из табл. 6, для образцов алюминиевых сплавов толщиной  $\delta=3$  мм, вырезанных лазером, следует ориентироваться на  $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ\ opt}=2$ ;  $\bar{t}_{ЗТВ\ opt}=0,133$ ;  $\bar{Rz}_{opt}=3,667 \cdot 10^{-3}$ , а для образцов спла-

вов толщиной  $\delta=1$  мм соответственно –  $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ\ opt}=0,9$ ;  $\bar{t}_{ЗТВ\ opt}=0,155$ ;  $\bar{Rz}_{opt}=0,015$ .

Таблица 6 – Результаты нахождения оптимальных параметров последствия лазерного раскроя  $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ}$ ,  $\bar{t}_{ЗТВ}$ ,  $\bar{Rz}$  для партий алюминиевых образцов толщиной  $\delta=3$  мм и  $\delta=1$  мм

Толщина партий алюминиевых образцов	Оптимальные параметры режима лазерной резки			Значение целевой функции $\bar{N}_{ц\ max}$
	Относительная микротвердость $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ\ opt}$	Относительная ширина ЗТВ $\bar{t}_{ЗТВ\ opt}$	Относительная шероховатость $\bar{Rz}_{opt}$	
$\delta=3$ мм	2	0,133	$3,667 \cdot 10^{-3}$	0,798
$\delta=1$ мм	0,9	0,155	0,015	0,862

Проанализируем возможность нахождения параметров лазерного излучения  $\bar{V}$ ,  $\bar{P}$ ,  $\bar{W}$ , которые бы обеспечивали уровень максимальной относительной малоцикловой усталости  $\bar{N}_{ц\ max}$ , соответствующей оптимальным значениям последствия лазерного раскроя  $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ\ opt}$ ,  $\bar{t}_{ЗТВ\ opt}$ ,  $\bar{Rz}_{opt}$  или любым другим их значениям, полученным после лазерного раскроя.

Для этого сначала были получены аналогичные по структуре (1) множественные регрессионные модели, связывающие уровень максимальной относительной малоцикловой усталости  $\bar{N}_{ц\ max}$  с параметрами лазерного излучения  $\bar{V}$ ,  $\bar{P}$ ,  $\bar{W}$  (см. табл. 2 и 3). В результате реализации алгоритма пошагового регрессионного анализа получены следующие выражения:

$$\bar{N}_{ц(\delta=3)} = 0,134 + 0,262\bar{V} - 0,859\bar{P} + 1,232\bar{W}, \quad (11)$$

$$\bar{N}_{ц(\delta=1)} = 0,41 + 0,275\bar{V} + 0,17\bar{P} - 0,068\bar{W}. \quad (12)$$

Учитывая, что левые части (относительная малоцикловая усталость) регрессионных зависимостей (5) – (6) и (11) – (12) равны, то очевидно имеет место соответствие или бинарное отношение между множеством параметров последствия лазерного раскроя ( $\bar{N}_{ц}(\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ}$ ,  $\bar{t}_{ЗТВ}$ ,  $\bar{Rz}$ ) и множеством параметров непосредственно лазерного излучения  $\bar{N}_{ц}(\bar{V}$ ,  $\bar{P}$ ,  $\bar{W}$ ):

$$\bar{N}_c(\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ}, \bar{t}_{ЗТВ}, \bar{Rz}) \rightarrow \bar{N}_c(\bar{V}, \bar{P}, \bar{W}). \quad (13)$$

Так, для полученного максимального уровня относительной малоциклового усталости  $\bar{N}_{c_{max}}$  и соответствующих ему оптимальных параметров последствия лазерного раскроя  $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ_{opt}}$ ,  $\bar{t}_{ЗТВ_{opt}}$ ,  $\bar{Rz}_{opt}$  для всех партий алюминиевых образцов толщиной  $\delta=3$  мм и  $\delta=1$  мм могут быть получены комбинации соответствующих им режимов лазерного излучения  $\bar{V}$ ,  $\bar{P}$ ,  $\bar{W}$ . Проанализируем результаты нахождения этих комбинаций  $\bar{V}_{opt}$ ,  $\bar{P}_{opt}$ ,  $\bar{W}_{opt}$  для всех партий образцов в интервалах изменения параметров:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{min} &\leq \bar{V} \leq \bar{V}_{max}, \\ \bar{P}_{min} &\leq \bar{P} \leq \bar{P}_{max}, \\ \bar{W}_{min} &\leq \bar{W} \leq \bar{W}_{max}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для регрессионного уравнения (11) эти величины соответственно были равны:

– для  $\delta=3$  мм

$$\begin{aligned} 0,125 &\leq \bar{V} \leq 1, \\ 0,45 &\leq \bar{P} \leq 1, \\ 0,5 &\leq \bar{W} \leq 1. \end{aligned} \quad (15)$$

– для  $\delta=1$  мм

$$\begin{aligned} 0,4 &\leq \bar{V} \leq 1, \\ 0,45 &\leq \bar{P} \leq 1, \\ 0,3 &\leq \bar{W} \leq 1. \end{aligned} \quad (16)$$

Сужение возможных комбинаций для параметров режима лазерной резки было осуществлено путем исключения заведомо нерациональных режимов лазерной резки: предпочтения отдавались тем режимам, которые обеспечивали максимальную производительность  $\bar{V}_{opt} \rightarrow \bar{V}_{max}$  при минимальных энергозатратах  $\bar{W}_{opt} \rightarrow \bar{W}_{min}$ .

Например, в результате лазерного раскроя алюминиевых образцов толщиной  $\delta=3$  мм были получены следующие относительные параметры последствия:  $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ}=1,7$ ;  $\bar{t}_{ЗТВ}=0,1$ ;  $\bar{Rz}=6,667 \cdot 10^{-3}$ . Предложенная практическая реализация экспериментально-теоретического метода оптимизации параметров процесса лазерной резки образцов материалов из алюминиевых сплавов по критерию максимальной долговечности  $\bar{N}_c$  позволяет:

– по зависимости (5) сразу (не проводя трудоемких экспериментов) определить долговечность панели при относительной малоциклового усталости  $\bar{N}_{c_{max}}=0,626$ ;

– определить соответствующие этой долговечности такие параметры лазерного излучения:  $\bar{V}=0,677$ ;  $\bar{P}=1$ ;  $\bar{W}=0,953$  или  $\bar{V}=0,976$ ;  $\bar{P}=1$ ;  $\bar{W}=0,889$ .

#### Выводы

1. Проведены испытания на относительную долговечность семи партий образцов, изготовленных лазерным лучом из алюминиевого сплава Д16АТ толщиной  $\delta=1$  мм и  $\delta=3$  мм при различных режимах резания, для которых определены относительные параметры последствий режимов  $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ}$ ,  $\bar{t}_{ЗТВ}$  и  $\bar{R}_z$ , на основе которых с помощью множественных линейных моделей регрессионного анализа решена задача математического программирования.

2. В результате решения этой задачи впервые по критерию максимальной долговечности установлены диапазоны интервалов оптимальных параметров лазерного резания и соответствующих им факторов его последствия, уровни относительной малоциклового усталости при толщине образцов  $\delta=1$  мм и  $\delta=3$  мм.

3. С учетом предпочтительности оптимальных режимов лазерной резки, обеспечивающих выполнение критерия максимальной производительности процесса ( $\bar{V}_{opt} \rightarrow \bar{V}_{max}$ ) при минимальных энергозатратах ( $\bar{W}_{opt} \rightarrow \bar{W}_{min}$ ) получено сужение возможных комбинаций для этих параметров путем исключения не отвечающих данному критерию.

Полученный результат позволяет, не проводя трудоемких экспериментов, определить относительную долговечность панели по факторам последствия процесса и соответствующие ей параметры лазерной резки.

#### Список использованных источников

1. Гайдачук В.Е. Анализ эффективности технологии лазерной обрезаки 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». – Х.: ХАИ, 2010. – Вып. 2(62). – С. 85 – 97.

2. Опыт эксплуатации лазерных и плазменных установок для резки на американских заводах / [http://www.plasma.mk.ua/a\\_exp.php](http://www.plasma.mk.ua/a_exp.php).

3. Панченко В.Я. Лазерные технологии обработки материалов, создаваемые в ИПЛИТ РАН / В.Я. Панченко, В.В. Васильцов, В.С. Голубев // Физика и технология лазерной обработки материалов: сб. тр. ИПЛИТ РАН, 2005. – С. 191 – 197.

4. Костенко А.И. Микроструктурный анализ зоны термического влияния после лазерной резки образцов листовых материалов и их ме-

ханические характеристики / А.И. Костенко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. трудов Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 46.– Х.: ХАИ, 2010. – С. 114 –127.

5. Гайдачук В.Е. Экспериментально-теоретический метод оптимизации параметров процесса лазерной резки образцов материалов из алюминиевых сплавов по критерию максимальной долговечности / В.Е. Гайдачук, А.И. Костенко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 48. – Х.: ХАИ, 2010. – С. 53 – 61.

6. Костенко А.И. Многоуровневый алгоритм оптимизации режимов лазерного раскрытия заготовок силовых панелей планера самолета в серийном производстве / А.И. Костенко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4(64). – Х.: ХАИ, 2010. – С. 30 – 42.

7. Степанов М.Н. Усталость легких конструкционных сплавов / М.Н. Степанов, Е.В. Гиацинтов. – М.: Машиностроение, 1973. – 320 с.

8. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 34 с.

9. Белецкий В.М. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение): справ. / В.М. Белецкий, Г.А. Кривов; под общ. ред. акад РАН И.Н. Фридляндера. – К.: «КИМИНТЕХ», 2005. – 365 с.

10. Лесин В.В. Основы методов оптимизации / В.В. Лесин, Ю.П. Лисовец. – М. : МАИ, 1998. – 344 с.

*Поступила в редакцию 04.02.2011 г.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Г. Гребеников,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*