

## **Комплексное исследование технологии лазерного раскроя обшивок панелей планера самолета из алюминиевых сплавов по критерию долговечности**

*ПО «Харьковское государственное авиационное  
производственное предприятие»*

Рассмотрена проблема повышения эффективности современного серийного авиастроительного производства путем внедрения лазерной резки обшивок панелей планера из алюминиевых сплавов при обеспечении их высокого качества и долговечности. Изложены теоретические и практические результаты, включающие в себя разработку экспериментально-теоретического метода, основанного на синтезированных регрессионных математических моделях взаимосвязи факторов технологического процесса лазерной резки тонколистовых материалов из алюминиевых сплавов и параметров его последствия, характеризующих изменение их эксплуатационных свойств, экспериментальные исследования долговечности образцов панелей на разных режимах, а также многоуровневый алгоритм оптимизации режимов процесса по критерию максимальной долговечности, модифицированные критерии экономической эффективности технологии лазерного раскроя заготовок силовых панелей самолета.

**Ключевые слова:** лазерный раскрой, обшивки панелей планера самолета, алюминиевые сплавы, долговечность, регрессионный анализ, оптимизация режимов, критерии экономической эффективности, серийное производство.

Украина входит в десятку государств мира, имеющих полный цикл создания современных воздушных судов (ВС) транспортной категории, не уступающих по своим эксплуатационным характеристикам зарубежным аналогам. Однако жесткая конкуренция на мировом рынке авиационных услуг требует не только высокого функционального качества поставляемых ВС, но и привлекательной для покупателя цены, так как критерий минимального отношения «цена – качество» определяет успех в современном авиационном бизнесе. Приемлемая цена ВС определяется 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.

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

В связи с этим проведенные нами комплексные исследования в течение 2009 – 2011 годов позволили установить критерии экономической эффективности лазерной резки обшивок панелей планера ВС из алюминиевых сплавов при обеспечении их высокого качества и ресурса изделия, конкурентоспособного на рынке авиаперевозок. Ниже кратко изложены основные результаты данного исследования.

В работе [1] изложены предпосылки исследования, проведен обзор и анализ состояния технологии лазерной резки листовых деталей из цветных металлов в серийном авиастроительном производстве, указаны возможности лазерных технологий в заготовительном производстве. Рассмотрено влияние технологических режимов лазерного раскроя на эксплуатационные свойства материалов, а также проанализированы основные аспекты экономической эффективности процесса для производства обшивок панелей планера самолета в серийном производстве. На основе критического анализа данной проблемы сформулированы цель и задачи комплексного исследования.

В работе [2] были вскрыты и проанализированы факторы последствия лазерного раскроя: граты, заусенцы и микронеровности, увеличивающие шероховатость поверхности зоны реза, а также охрупчивание материала в ЗТВ  $R_z$ , проявляющееся в увеличении микротвердости  $H_{\mu(20)ЗТВ}$  в этой зоне на всей ее протяженности  $t_{ЗТВ}$ . Установлено, что эти факторы, порождая возникновение и развитие микротрещин в материале образца, снижают его долговечность при многоцикловом (усталостном) нагружении.

Экспериментальные исследования образцов листовых материалов из алюминиевых сплавов после лазерного раскроя и фрезерования (АМцМ, АМг-2М, АМг-6М, Д16АТ различной толщины и АК4-1, УТ1ВК) на разрыв показали, что статический предел прочности этих материалов в пределах рассеивания не отличается от характеристик фрезерованных образцов. Такой же вывод относится к характеристике  $\sigma_{02}$ . Для примера в табл. 1 даны сравнительные характеристики образцов из Д16АТ после лазерной резки и фрезерования.

В то же время предельные относительные деформации этих материалов  $\delta_{np}$  в образцах, вырезанных лазерным раскроем, и в образцах, полученных путем фрезерования, отличаются в 0,75...0,94 раза или на 2...4 %. Принимая, что при фрезеровании эта характеристика соответствует состоянию поставки, можно считать гипотезу об охрупчивании материала в ЗТВ при лазерной резке подтвержденной.

Проведенный микроструктурный анализ ЗТВ образцов материалов, полученных лазерным раскроем (рис. 1), позволил экспериментально определить ширину ЗТВ ( $t_{ЗТВ}$ ) и микротвердость в этой зоне  $H_{\mu(20)ЗТВ}$ . Для образцов из Д16АТ эти характеристики приведены в табл. 2.

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

В связи с этим в работе [3] были предложены математические модели снижения относительной долговечности образцов материалов в виде регрессионных зависимостей второго порядка, связывающие относительную долговечность с относительными факторами последствия лазерного раскроя, и структурно-аналогичные регрессионные зависимости соответствия долговечности факторам режимов лазерной резки:

$$\bar{N}_{\partial n} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^3 \alpha_i \bar{X}_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \alpha_{ij} \bar{X}_i \bar{X}_j ; \quad (1)$$

$$\bar{N}_{\partial n} = \beta_0 + \sum_{j=1}^3 \beta_j \bar{y}_j + \sum_{j=1}^3 \sum_{\xi=1}^3 \beta_{j\xi} \bar{y}_j \bar{y}_\xi , \quad (2)$$

где

$$\bar{X}_1 = \bar{H}_{\mu(20)3TB} = \frac{H_{\mu(20)3TB}}{H_{\mu(20)0}} , \quad \bar{X}_2 = \bar{t}_{3TB} = \frac{t_{3TB}}{\delta_0} , \quad \bar{X}_3 = \bar{h}_2 = \frac{h_2}{\delta_0} ; \quad (3)$$

$$\bar{y}_1 = \frac{V_n}{V_{nmax}} ; \quad \bar{y}_2 = \frac{p}{p_{max}} ; \quad \bar{y}_3 = \frac{W}{W_{max}} ; \quad (4)$$

$\bar{N}_{\partial} = \frac{N_{\partial i}}{N_{\partial \phi}}$  - относительная долговечность образца при лазерном раскрое на  $n$ -м

режиме, отнесенная к долговечности фрезерованного (базового) образца;  $\alpha_0, \alpha_i, \alpha_{ij}, \beta_0, \beta_j, \beta_{j\xi}$  - коэффициенты регрессионных моделей, подлежащие экспериментальному определению из системы уравнений (1) и (2) после испытаний  $n$  серий образцов на выносливость ( $n > 9$ ).

Таблица 1

Сравнительные характеристики образцов листовых материалов из алюминиевых сплавов после лазерной резки и фрезерования

Марка материала	Толщина листа, мм	Номер образца	Механические свойства						$\Delta\delta = (\delta_\phi - \delta_\lambda) \%$
			Лазерная резка			Фрезерование			
			$\sigma_{вр}$ , МПа	$\sigma_{02}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{вр}$ , МПа	$\sigma_{02}$ , МПа	$\delta$ , %	
Д16АТ	1,5	1	435	323	15,2	439	328	20,2	2,0
		2	428	325	18,0	432	325	19,5	
		3	428	324	17,7	436	328	18,7	
		4	428	323	18,0	439	329	20,2	
		5	428	322	18,5	436	327	19,2	
		6	432	327	18,2	446	330	19,5	
		средн.	430	324	17,6	438	328	19,6	
	2,0	1	444	311	19,4	454	318	17,6	2,8
		2	449	314	16,0	452	316	20,0	
		3	116	312	17,0	451	315	20,2	
		4	444	310	16,0	452	314	19,6	
		5	449	313	16,0	451	313	18,8	
		6	449	312	14,0	451	312	18,8	
		средн.	446,8	312	16,4	451,8	314,7	19,2	
	3,0	1	445	329	12,5	449	329	12,7	0,3
		2	440	325	12,3	449	328	11,8	
		3	115	327	12,3	452	330	12,3	
		4	440	324	12,3	449	329	12,3	
5		447	326	12,3	442	326	12,8		
6		444	327	11,3	449	328	13,3		
средн.		443,5	326,3	12,2	448,3	328,3	12,5		

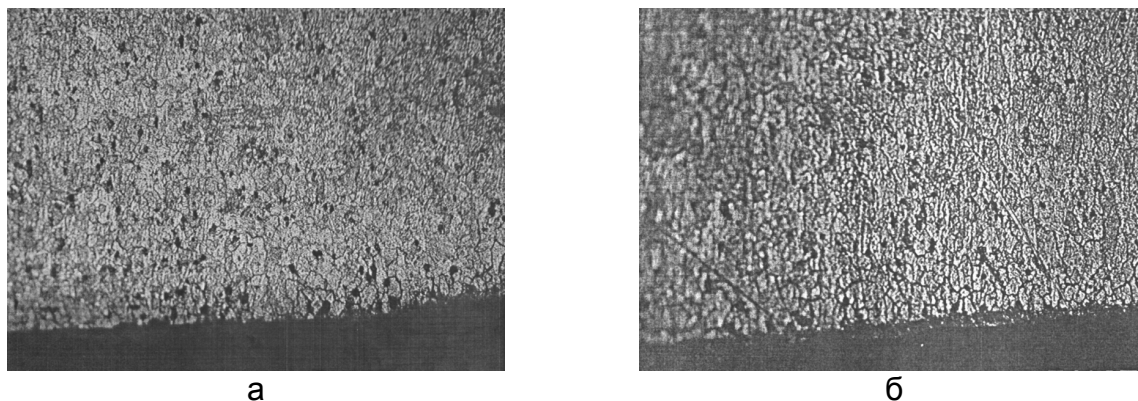


Рис. 1. Микроструктура в зоне лазерной резки образцов:  
а – Д16АТ л. 1,2 мм; б – Д16АТ л. 2,0 мм ( $\times 170$  раз)

Таблица 2

Ширина ЗТВ и микротвердость в образцах из Д16АТ

Номер образца	Марка материала	Толщина листа, мм	Ширина зоны с измененной структурой, мм	Микротвердость $H_{\mu(20)}$	
				ЗТВ	Сердцевина
1	Д16АТ	1,5	0,098	1144	1028
2			0,12	1144	1028
3				701	766
4			0,205	1028	1284
5			0,09	644	548
6			0,114	473	473
средн.			0,125	856	854
1		3	0,39	701	701
2			0,27	928	701
3			0,22	701	701
4			0,39	701	766
5			0,24	701	701
6			0,225	701	701
средн.			0,289	739	712

Эти математические модели впервые позволили реализовать новый экспериментально-теоретический метод прогнозирования снижения долговечности образцов материалов в зависимости от их свойств и режимов лазерной резки относительно аналогов, полученных фрезерованием на ранних стадиях освоения лазерной технологии для изготовления панелей планера самолета.

Для последующих этапов освоения лазерного раскроя в [4] был предложен эффективный многоуровневый алгоритм оптимизации режимов лазерной резки и синтеза близких к оптимальным факторов причин и последствий исследуемого процесса. Число уровней равно трем относительным факторам последствия лазерной резки  $\bar{R}_z$ ,  $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ}$  и  $\bar{t}_{ЗТВ}$ . Каждый из этих факторов определяется экспериментально для трех партий образцов материала, вырезанных на различных режимах работы лазера, соответствующих трем относительным факторам снижения долговечности  $\bar{V}_л$ ,  $\bar{p}_л$  и  $\bar{W}_л$ . Абсолютные значения этих факторов соответствуют

максимальному, среднему и нижнему значениям располагаемых диапазонов лазерной установки  $\{y_{i\max}, y_{i\text{mid}}, y_{i\min}\}$ ,  $i = V, p, W$ .

В алгоритме последовательно реализуются все три цикла каждого уровня. Исходная реализуемая матрица факторов причины содержит варьируемый столбец одного параметра, например скорости реза  $\bar{V}$ , и два столбца остальных параметров  $\bar{p}$  и  $\bar{W}$ , не варьируемых на первом уровне (например,  $\bar{p}_{\max}, \bar{W}_{\max}$ ). В результате анализа значений одного из факторов следствия (например,  $\bar{R}_z$ ) выбирается его минимальное значение при данном сочетании параметров причины.

Реализация этого алгоритма позволяет получать результаты различной степени точности в зависимости от располагаемых ресурсов времени и средств путем расширения активно используемых измерений факторов последствий процесса и других средств и способов модификации предложенного алгоритма.

В работе [5] изложены результаты испытаний на относительную долговечность семи партий образцов, изготовленных лазерным лучом из алюминиевого сплава Д16АТ толщиной 1 и 3 мм при различных режимах резания. В таблице 3 приведены соответственно режимы резания и средние значения малоциклового усталости образцов алюминиевого сплава Д16АТ при  $\delta = 3$  мм.

Испытания проводились на гидравлической машине ЦДМ-10Пу при отнулевых циклах нагружения  $\sigma_{\min} = 0 \dots 130$  МПа до разрушения. В целях сокращения

сроков испытаний образцы, изготовленные по ГОСТ 25.502-79, имели в центре отверстие-концентратор  $\varnothing 4$  мм. Типичный характер разрушения образцов различных партий показан на рис. 2.

Для экспериментальных данных (см. табл. 3) на основе линейных регрессионных моделей, полученных из уравнений (1) и (2) исключением нелинейных членов, решена задача математического программирования.

Таблица 3

Относительные режимы лазерной резки и факторы ее последствий образцов из алюминиевого сплава Д16АТ

$\delta$ , мм	Номер партии	$\bar{V}$	$\bar{p}$	$\bar{W}$	$\bar{H}_{3ТВ}$	$\bar{t}_{3ТВ}$	$\bar{R}_z \cdot 10^{-3}$	$N_{ucp} \cdot 10^3$	$\bar{N}_{ucp}$
3	1	1	1	1	2	0,08	3,67	184,76	0,795
	2	0,61	0,77	0,75	1,8	0,1	10	135,95	0,585
	3	0,225	0,46	0,5	1,38	0,133	13,33	108,07	0,465
	4	1	0,77	0,75	1,78	0,091	6,67	146,41	0,63
	5	0,61	0,46	0,5	1,8	0,1	18,33	101,09	0,435
	6	1	0,46	0,5	1,94	0,085	5	149,9	0,645
	7	0,225	1	1	1,6	0,133	11,66	125,5	0,54

В результате решения этой задачи впервые по критерию максимальной долговечности установлены диапазоны интервалов оптимальных параметров лазерного резания и соответствующих им факторов его последствия для уровней относительной малоциклового усталости при толщинах образцов  $\delta = 3$  мм:

$$\bar{N}_{ucp}^{(\delta=3)opt} = 0,202 + 0,257 \bar{H}_{M(20)3ТВ} + 1,121 \bar{t}_{3ТВ} - 18,863 \bar{R}_z \rightarrow \max \quad (5)$$

при

$$\begin{aligned}
 0,125 \leq \bar{V} \leq 1 & & 1,3 \leq \bar{H}_{M(20)3TB} \leq 2 \\
 0,45 \leq \bar{P} \leq 1 & \in & 0,08 \leq \bar{t}_{3TB} \leq 0,133 \\
 0,5 \leq \bar{W} \leq 1 & & 3,6 \cdot 10^{-3} \leq \bar{R}_z \leq 19 \cdot 10^{-3}.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$



Рис. 2. Типичный характер разрушения образцов различных партий

Сужение возможных комбинаций для параметров режима лазерной резки осуществляется путем предпочтения заведомо рациональным ее режимам, которые обеспечивают максимальную производительность процесса:  $\bar{V}_{opt} \rightarrow \bar{V}_{max}$  при  $\bar{W}_{opt} \rightarrow \bar{W}_{min}$ . Так, при параметрах последствия  $\bar{H}_{M(20)3TB opt} = 2$ ;  $\bar{t}_{3TB} = 0,133$ ;  $\bar{R}_z = 3,67 \cdot 10^{-3}$  по (5), не проводя испытаний на долговечность, находим  $\bar{N}_{ц max} = 0,8$ , для которого  $\bar{V} = 1$ ;  $\bar{P} = 0,45$ ;  $\bar{W} = 0,64$ .

Анализ результатов экспериментальных исследований других авторов, полученных по критерию максимальной производительности процесса, позволил установить область взаимозависимости скорости лазерного резания и толщины листа для всего класса алюминиевых сплавов, удовлетворительно согласующуюся с установленной нами областью оптимальных параметров по критерию максимальной долговечности раскраиваемых материалов (рис. 3). Тем самым обоснована допустимость в первом приближении распространить полученные результаты на весь класс алюминиевых сплавов для ориентации лазерного оборудования в условиях начальных стадий освоения лазерной резки на серийном авиационном предприятии с последующей их корректировкой в процессе накопления опыта.

Для анализа влияния на относительную долговечность панелей из алюминиевых сплавов, вырезанных лазерным лучом, при котором отсутствует корреляция между пределом малоциклового усталости и статическим пределом их прочности, впервые предложено использовать вместо эффективного коэффициента концентрации напряжений  $K_{эфф}^л$  коэффициент увеличения долговечности  $K_l^0$ , устанавливающий отношение числа циклов до разрушения образца без отверстия-концентратора  $N_l^{\otimes}$  к этому числу циклов образца с отверстием-концентратором  $N_l^0$ .

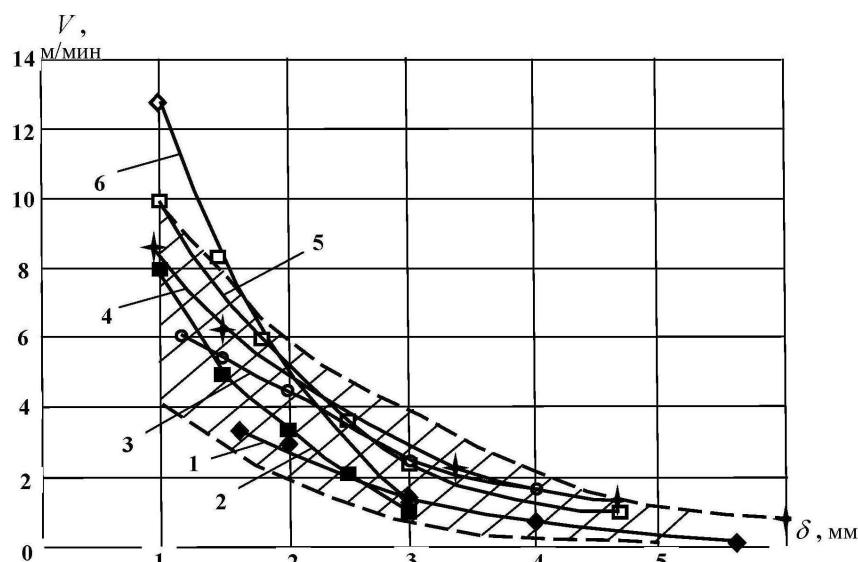


Рис. 3. Зависимость скорости лазерного раскроя от толщины разрезаемого листа из алюминиевого сплава и диапазон скоростей, обеспечивающих их максимальную относительную долговечность при малоцикловой усталости:

- ◆—◆— - 1 – АМг-6 ( $1,6 \leq \delta \leq 6$  мм;  $1,2 \leq W \leq 1,5$  кВт;  $0,5 \leq P \leq 0,8$  МПа);
- - 2 – АМг ( $CO_2, N_2$ ;  $0,8 \leq P \leq 1,2$  МПа  $W = 1,6$  кВт);
- - 3 – цветные металлы ( $N_2$ );
- ★—★— - 4 – алюминий;
- - 5 – АМг ( $CO_2, N_2$ ;  $0,8 \leq P \leq 1,2$  МПа  $W = 2,75$  кВт);
- ◇—◇— - 6 – Д16 ( $0,5 \leq W \leq 1,5$  кВт)

В работе [6] нами теоретически установлены и экспериментально подтверждены соотношения этих коэффициентов с эффективными коэффициентами концентрации напряжений и между их значениями для образцов, полученных лазерным лучом и фрезерованием (рис. 4):

$$K_l^0 = \frac{N_l^\otimes}{N_l^0} = K_{эфф} \frac{tg\beta_1}{tg\beta_2} = \frac{\sigma^\otimes tg\beta_1}{\sigma^0 tg\beta_2}; \quad (7)$$

$$K_\phi^0 = \frac{N_\phi^\otimes}{N_\phi^0} = K_{эфф} \frac{tg\alpha_1}{tg\alpha_2}; \quad (8)$$

$tg\beta_2 > tg\alpha_2, tg\beta_1 > tg\alpha_1$ , следовательно  $K_l^0 > K_\phi^0$ .

Проведенные эксперименты [6] показали, что для средних значений

$$\frac{K_{л ср}^0}{K_{фрез}^0} = \frac{2,05}{1,16} = 1,77.$$

В нашей работе [6] были вскрыты и проанализированы предпосылки разработки критериев эффективности авиакосмической техники (АКТ). На основе анализа критерия экономической эффективности создания АКТ Д.Л. Томашевича [8], развитого в монографии И.Т. Белякова и Ю.Д. Борисова [9], разработаны четыре модификации критериев эффективности реализации технологии лазерного рас-

кроя обшивок панелей планера ВС из алюминиевых сплавов, отличающиеся от базового критерия учетом конкретных особенностей влияния параметров исследуемого технологического процесса на характеристики раскраиваемых материалов в аспекте долговечности панелей.

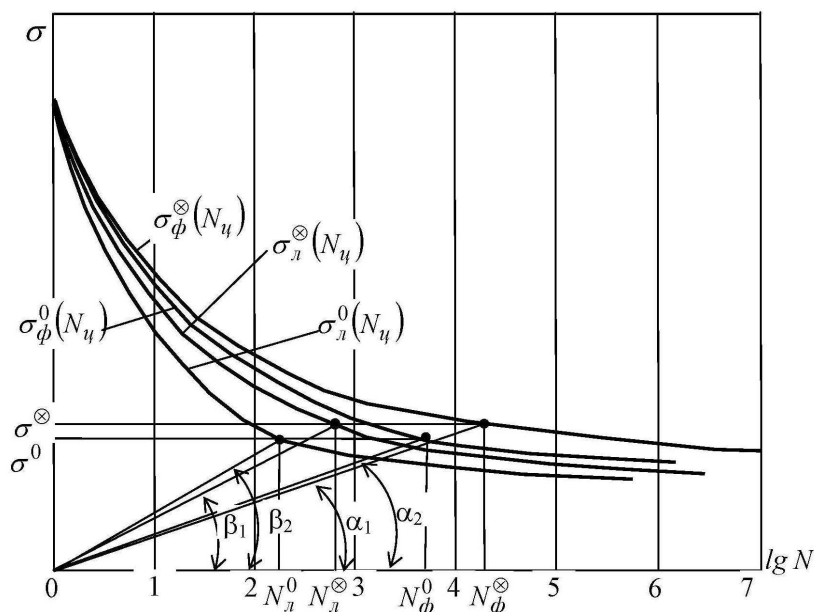


Рис. 4. Диаграммы Велера для фрезерованных и вырезанных лазерным лучом образцов с отверстиями (0) и без отверстий (⊗) :

$\sigma^0$ ,  $\sigma^\otimes$  – фиксированный уровень напряжений в образцах с отверстием и без отверстия соответственно;  $N_\phi^0$ ,  $N_\phi^\otimes$ ,  $N_\lambda^0$ ,  $N_\lambda^\otimes$  – число циклов до разрушения при уровнях напряжения  $\sigma^0$  и  $\sigma^\otimes$  для фрезерованных и вырезанных лазерным лучом образцов с отверстием и без отверстия

Первые три модификации критериев эффективности  $\mathcal{E}_\lambda$  имеют каноническую форму записи, отличающуюся только знаками первого и второго членов и их количественными значениями для каждого варианта технологии лазерного раскроя:

$$\mathcal{E}_{\lambda i} = A_{N_{пан i}} + \frac{\Delta B_{пан i}}{\Delta N_p}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (9)$$

где  $A_{N_{пан i}}$  - сумма предельно целесообразных затрат в  $i$ -м варианте технологии лазерного раскроя;  $\frac{\Delta B_{пан i}}{\Delta N_p}$  - действительные затраты на увеличение долговечности планера (панелей) при реализации  $i$ -го варианта технологии.

В данной работе приведены методики вычисления параметров  $A_{N_{пан i}}$  и  $\Delta B_{пан i}$  для всех вариантов. Полученные критерии позволяют проводить обоснованную оценку эффективности внедрения лазерной технологии раскроя на начальных этапах планирования переоснащения современного серийного авиационного производства в условиях рыночной экономики.



Для раскроя панелей из алюминиевых сплавов, для которых лазерная технология совместно с дополнительным финишным процессом приводит к снижению долговечности панелей при одновременном увеличении производственных затрат, предложена модификация временного критерия эффективности С.А. Саркисяна и Э.С. Минаева [10]. Эта модификация временного критерия эффективности принципиально позволяет учесть и оценить резервы, имеющие место при реализации серийного производства ВС, которые не могут быть вскрыты и учтены модифицированными критериями, индифферентными к длительности производственного цикла, соответствующей интенсивности выполняемых работ, периоду освоения производства и другим факторам, непосредственно или опосредствованно связанным со временем создания ВС и поступления его в эксплуатацию.

На базе проведенных комплексных исследований на ХГАПП был создан и введен в эксплуатацию производственный участок лазерного раскроя, оснащенный установкой PLATINO 2040HS производства фирмы PRIMA INDUSTRIA, Италия (рис. 5).



Рис. 5. Производственный участок лазерного раскроя на ХГАПП

### Выводы

В соответствии с поставленной целью и вытекающими из нее задачами после выполнения изложенного выше комплекса исследований получены следующие научные и практические результаты:

1. На основе проведенных испытаний на разрыв образцов листовых материалов из алюминиевых сплавов (АМцМ, АМг-2М, АМг-6М, Д16АТ, АК4-1 и УТ1ВК), полученных лазерным раскроем и фрезерованием, установлен при практически одинаковой статической прочности существенный уровень их охрупчивания в ЗТВ при лазерной резке, причина которого – интегральное влияние факторов последствия параметров лазерного раскроя (микротвердости  $H_{\mu(20)ЗТВ}$ , протяженности ЗТВ  $t_{ЗТВ}$  и микронеровностей  $R_z$ ), вызывающих снижение долговечности материала.

2. Впервые предложены регрессионные математические модели, связывающие относительную долговечность образцов, раскроенных лазерным лучом и фрезерованием, с факторами режимов лазерного раскроя и его последствия.

Эти математические модели позволяют реализовать новый экспериментально-теоретический метод прогнозирования снижения долговечности образцов из алюминиевых сплавов в зависимости от параметров качества резки и ее режимов.

3. Для последующих этапов освоения лазерной технологии впервые предложен эффективный многоуровневый алгоритм оптимизации режимов лазерной резки и синтеза близких к оптимальным факторов причин и последствий исследуемого процесса.

4. На основе проведенных испытаний на относительную долговечность семи партий образцов при различных режимах  $(\bar{V}_p, \bar{p}_z, \bar{W}_l)$ , для которых были определены относительные параметры их последствия  $(\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ}, \bar{t}_{ЗТВ}, \bar{R}_z)$ , с помощью множественных линейных моделей регрессионного анализа решена задача математического программирования. В результате этого решения впервые по критерию максимальной долговечности установлены диапазоны интервалов оптимальных параметров лазерного резания и соответствующих им факторов его последствия для уровней относительной малоцикловой усталости при толщинах образцов 1 и 3 мм.

С учетом предпочтительности оптимальных режимов лазерной резки, обеспечивающих выполнение критерия максимальной производительности процесса при минимальных энергозатратах, получена область комбинаций этих параметров, из которой исключены не отвечающие данному критерию.

Этот результат позволяет, не проводя трудоемких экспериментов, определять относительную долговечность панели по факторам последствия процесса соответствующие этой долговечности его параметры  $(\bar{V}_p, \bar{p}_z, \bar{W}_l)$ .

5. Впервые предложено использовать вместо эффективного коэффициента концентрации напряжений  $K_{эфф}$  коэффициент увеличения долговечности, равный отношению числа циклов до разрушения образца без отверстия-концентратора к этому числу циклов образца с концентратором. Теоретически установлены и экспериментально подтверждены соотношения этих коэффициентов с  $K_{эфф}$  и между их значениями для образцов, полученных лазерным лучом и фрезерованием.

6. На основе критерия экономической эффективности Д.Л. Томашевича, развитого И.Т. Беляковым и Ю.Д. Борисовым, а также временного критерия С.А. Саркисяна и Э.С. Минаева разработаны их модификации применительно к оценке эффективности реализации лазерного раскроя обшивок панелей планера самолета из алюминиевых сплавов на начальных этапах планирования переоснащения современного серийного авиационного производства.

7. На базе проведенных исследований, явившихся основой научно-технического обеспечения внедрения технологии лазерного раскроя обшивок панелей, на Харьковском Государственном авиационном производственном предприятии разработана и реализована комплексная программа, подтвердившая эффективность внедрения лазерного раскроя в серийное производство, создан и запущен в эксплуатацию производственный участок, оснащенный установкой PLATINO 2040HS производства фирмы PRIMA INDUSTRIA, Италия.

Создание этого участка явилось одним из существенных факторов переоснащения предприятия, отвечающих современным требованиям применения наукоемких информационных технологий.

### Список литературы

1. 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 – 97.
2. 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.
3. 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. 47. – Х., 2010. – С. 53 – 61.
4. Костенко А.И. Многоуровневый алгоритм оптимизации режимов лазерного раскроя 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., 2010. – С. 30 – 42.
5. Костенко А.И. Экспериментальное исследование долговечности образцов панелей планера самолета из алюминиевых сплавов, полученных лазерным раскроем / А.И. Костенко, В.Е. Гайдачук, И.П. Змиевской // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2(66). – Х., 2011. – С. 7 – 19.
6. Костенко А.И. Анализ результатов реализации экспериментально-теоретического метода оптимизации лазерного раскроя панелей самолета из алюминиевых сплавов / А.И. Костенко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 49. – Х., 2011. – С. 104-115.
7. 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.
8. Томашевич Д.Л. Конструкция и экономика самолета / Д.Л. Томашевич. – М.: Оборонгиз, 1960. – 202 с.
9. Беляков И.Т. Технологические проблемы проектирования летательных аппаратов / И.Т. Беляков, Ю.Д. Борисов. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
10. Саркисян С.А. Экономическая оценка летательного аппарата / С.А. Саркисян, Э.С. Минаев. – М.: Машиностроение, 1972. – 180 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 19.05.2011

## **Комплексне дослідження технології лазерного розкрою обшивок панелей планера літака з алюмінієвих сплавів за критерієм довговічності**

Розглянуто проблему підвищення ефективності сучасного серійного авіабудівного виробництва шляхом упровадження лазерного різання обшивок панелей планера з алюмінієвих сплавів при забезпеченні їхньої високої якості й довговічності. Викладено теоретичні й практичні результати, що містять розробку експериментально-теоретичного методу, оснований на синтезованих регресійних математичних моделях взаємозв'язку чинників технологічного процесу лазерного різання тонколистових матеріалів з алюмінієвих сплавів і параметрів його результату, що характеризують зміну їхніх експлуатаційних властивостей, експериментальні дослідження довговічності зразків панелей на різних режимах, а також багаторівневий алгоритм оптимізації режимів процесу за критерієм максимальної довговічності, модифіковані критерії економічної ефективності технології лазерного розкрою заготовок обшивок панелей літака.

**Ключові слова:** лазерний розкрій, обшивки панелей планера літака, алюмінієві сплави, довговічність, регресійний аналіз, оптимізація режимів, критерії економічної ефективності, серійне виробництво.

## **Comprehensive study of the laser cutting technology of power airframe panels made of aluminum alloys in mass production by the criterion of longevity**

The article is devoted to increase of the efficiency of modern mass aircraft production through the introduction of laser cutting of aluminum alloy power airframe panels, ensuring their quality and durability. The article comprises theoretical and practical results, including the development of experimental and theoretical methods based on synthesized regression mathematical models of relationship between the factors of the technological process of laser cutting of thin-sheet materials made of aluminum alloys and the parameters of its implications which characterize the change in their performance characteristics; experimental studies of durability of the panels' samples on different modes; multi-level algorithm for optimization of the process according to the criterion of maximal longevity, and modified criteria of economic effectiveness of laser cutting technology for power airframe panels.

**Keywords:** laser cutting, power airframe panels, aluminum alloys, durability, regression analysis, mode optimization, economic efficiency criterion, mass production.