

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ В СЕРИЙНОМ АВИАЦИОННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Авиастроение относится к одной из важнейших для экономики страны сложных и динамичных отраслей промышленности. Развитие авиастроения тесно связано с многочисленными областями науки, техники и технологии. В этой отрасли наиболее быстро находят применение последние достижения науки и техники. Уровень развития авиационной техники является показателем научного и промышленного потенциала страны [1].

В настоящее время глобального мирового экономического кризиса возрождение в Украине мощной авиастроительной промышленности, существовавшей до развала СССР, явилось бы одной из радикальных возможностей вывода государства на уровень десятка стран мира с замкнутым циклом авиационного производства.\*)

Эта возможность сопряжена с решением многочисленных сложных проблем, выходящих за рамки технических. Однако можно с определенностью констатировать, что немаловажное место в этих проблемах занимают задачи переоснащения производственных мощностей в соответствии с современным мировым уровнем, обеспечивающим радикальное снижение трудоемкости продукции и сроков ее производства.

В решении этих задач существенное место по трудоемкости занимают технологии заготовительно-штамповочного производства (рис. 1) [3]. В заготовительно-штамповочном производстве (ЗШП) важное место принадлежит процессам и операциям раскроя и обрезки листовых заготовок (рис. 2) [3]. Трудоемкость изготовления обшивок составляет около 15...20% от всей трудоемкости заготовительно-штамповочных работ, хотя непосредственно раскройные работы не превышают в среднем 12% от общей трудоемкости заготовительно-штамповочных работ [4, 5].

Однако с учетом того, что трудоемкость изготовления планера нового современного регионального самолета транспортной категории со-

---

\*) Авиационная промышленность в бывшем СССР была одной из наиболее динамично развивающихся отраслей, которая включала в себя практически замкнутый цикл разработки и производства самых совершенных авиационных изделий. Авиационная промышленность отличается чрезвычайно высокой наукоемкостью. Множество работ научно-исследовательского сектора авиационной промышленности были направлены на поиски путей совершенствования авиационной техники за счет разработки новых технологических и материаловедческих решений.

Доля Украины в момент развала СССР составляла около 25% от всего объема производственных мощностей авиационной промышленности Союза [2].

ставляет в серийном производстве в период его освоения порядка 500000 нормо-часов и более, трудоемкость раскройных работ для него составит

$$T_{\text{раскр}} = T_{\text{план}} \cdot \bar{T}_{\text{ЗШП}} \cdot \bar{T}_{\text{раскр}}$$

Здесь  $T_{\text{план}}$  – трудоемкость изготовления планера самолета;  $\bar{T}_{\text{ЗШП}}$  – относительная трудоемкость ЗШП (к  $T_{\text{план}}$ );  $\bar{T}_{\text{раскр}}$  – относительная трудоемкость раскройных операций (к  $\bar{T}_{\text{ЗШП}}$ ).

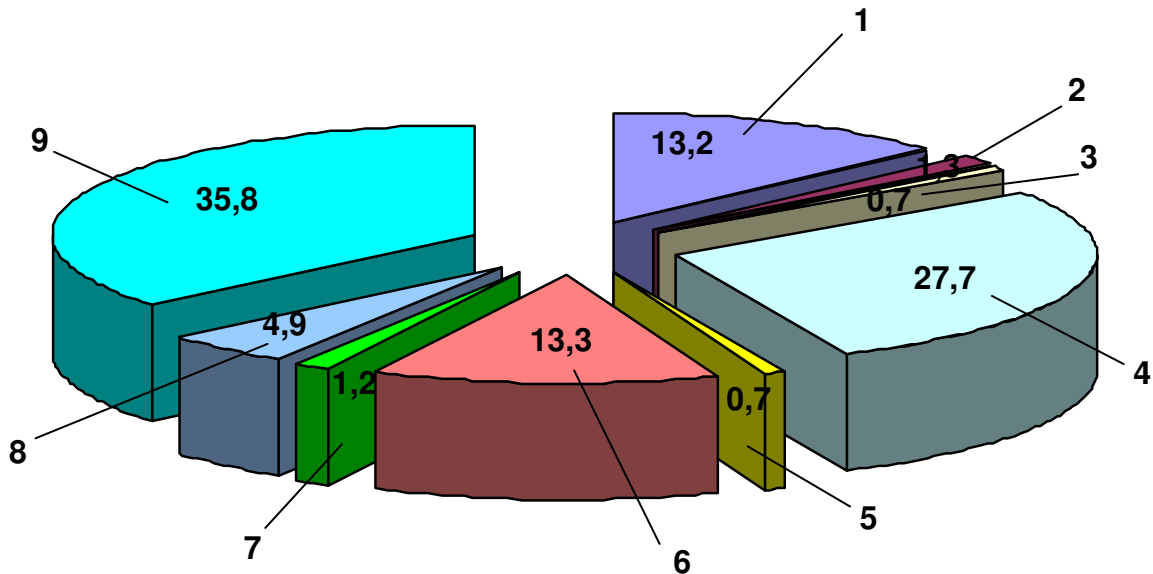


Рисунок 1 – Распределение трудоемкости изготовления самолета тяжелого класса по видам производства (в процентах):

1 – ЗШП; 2 – литье; 3 – горячая штамповка; 4 – механообработка и механосборка; 5 – слесарно-сварочное; 6 – производство деталей из КМ; 7 – термообработка; 8 – гальваническая обработка; 9 – агрегатная и окончательная сборка

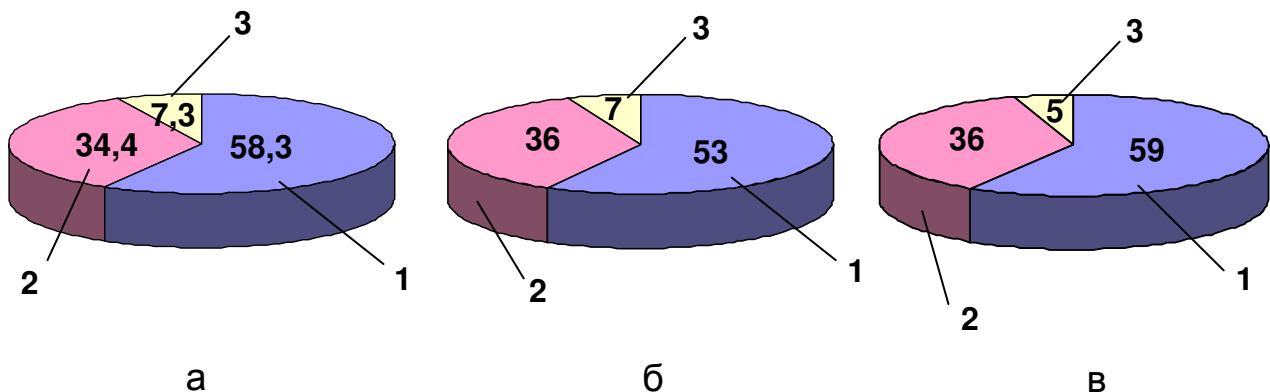


Рисунок 2 – Распределение деталей по исходных профильной (1), листовой (2) и трубчатой (3) заготовках в зависимости от класса самолета:

а – легкий; б – средний; в – тяжелый

Снижение этой трудоемкости даст ощутимый эффект, даже если потенциально реализуемый новый процесс раскроя листовых заготовок не будет содержать других важных составляющих, в особенности связанных с увеличением ресурса изготавливаемых листовых деталей.

Если расчетный срок службы планера без замены его частей составляет 30000...40000 летных часов, то, очевидно, важной задачей является обеспечение соответствующего ресурса конкретных деталей конструкции планера. Это прежде всего обеспечивается выбором конструктивных параметров деталей, позволяющих снизить уровень локальных напряжений материала заготовок [4, 5].

Процессы формообразования деталей также существенно влияют на выносливость в результате возникновения локальных остаточных напряжений [6].

В заготовительно-штамповочных цехах самолетостроительного предприятия изготавливается до 60% основных деталей каркаса планера, оформления наружного контура и внутреннего набора самолета, таких, как панели, обшивки, рамы, шпангоуты, стрингеры, обтекатели, двери, люки, перегородки [5, 6].

При этом количество деталей только из листов, профилей и труб, необходимых для современного широкофюзеляжного пассажирского самолета, составляет более 120 тыс. штук на одно изделие.

Особенностью обработки большинства указанных деталей является значительное количество операций по подгонке и доводке деталей как при формообразовании, так и при сборке узлов и элементов конструкции [3, 6].

В связи с этим основными задачами развития и совершенствования ЗШП является сокращение объема ручных доводочных работ и комплексная автоматизация технологических процессов. Для решения этих задач, начиная с 60 - 70-х гг., разрабатывались и непрерывно совершенствовались процессы обрезки, раскроя листа и других операций [3, 6].

Внедрение раскроя листовых заготовок на разработанных в НИАТе раскройных фрезерных порталных станках с ЧПУ позволило разрезать заготовки размерами 11000x2000 мм и 6000x2000 мм соответственно и дало возможность существенно повысить технический уровень криволинейного раскроя листов из алюминиевых сплавов. По сравнению с резкой на копировально-фрезерных станках КСФ-1 и КСФ-1М новая технология позволила увеличить коэффициент использования материала и снизить трудоемкость процесса раскроя [3].

Одним из направлений, существенно расширяющих технологические возможности процессов обработки высокопрочных материалов, является использование концентрированных потоков энергии и, в частности, энергии электронных и лазерных лучей [7, 8]. Благодаря созданию надежного и достаточно экономичного лазерного оборудования уже

в 70 – 80-х гг. возникла новая промышленная технология - лазерная технология обработки материалов.\*)

ЛАЗЕР\*\*) (оптический квантовый генератор) – устройство, генерирующее когерентные и монохроматические электромагнитные волны видимого диапазона за счет вынужденного испускания или рассеяния света атомами (ионами, молекулами) активной среды.

Всемерное развитие лазерной техники и технологии является сейчас одним из приоритетных направлений ускорения научно-технического процесса, важным фактором интенсификации различных областей промышленности. До настоящего времени выполнен большой объем исследований по применению лазеров в обработке материалов, сформированы основные научные направления, получен большой материал по работе лазерной техники в промышленности [8, 9].

Лазерный луч как источник нагрева при термической обработке материалов имеет как общие особенности, свойственные всем другим высококонцентрированным источникам, так и свои специфические преимущества, среди которых можно выделить две большие группы [9, 10].

1. Высокая концентрация подводимой энергии и локальность. Это позволяет произвести обработку только локального участка материала без нагрева остального объема и нарушения его структуры и свойств, что приводит к минимальному короблению деталей. В результате достигаются экономические и технологические преимущества. Кроме того, высокая концентрация подводимой энергии позволяет провести нагрев и охлаждение обрабатываемого объема материала с большими скоростями при очень малом времени воздействия. В результате открывается возможность получения уникальной структуры и свойств обработанной поверхности.

2. Высокая технологичность лазерного луча, что подразумевает возможность регулирования параметров обработки в очень широком интервале режимов, легкость автоматизации процесса, возможность обработки на воздухе, исключение механического воздействия на обрабатываемый материал, отсутствие вредных отходов, возможность транспортировки излучения и др.

В результате удается реализовать такой широкий круг технологических процессов и методов обработки материалов (сварка, наплавка, маркировка, закалка, резка и др.), который недоступен другим видам ин-

---

\*) Первый работающий лазер был изготовлен Теодором Майманом в 1960 году в исследовательской лаборатории компании Хьюза (Hughes Aircraft) [7]. Однако историю создания лазера следует начинать с 1917 г., когда Альберт Эйнштейн впервые ввел представление о вынужденном испускании [8 - 10]. Это был первый шаг на пути к лазеру. Следующий шаг сделал советский физик В.А. Фабрикант, указавший в 1939 г. на возможность использования вынужденного испускания для усиления электромагнитного излучения при его прохождении через вещество.

\*\*) Слово «лазер» - аббревиатура слов английской фразы «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» - усиление света вынужденным излучением.

струмента. В режиме лазерной резки реализуется фасонная контурная обработка деталей, изготавливаемых из листовых конструкционных металлических и неметаллических материалов.

Выполнение такой обработки механическими методами характеризуется низкой производительностью, большим объемом ручного труда, необходимостью использования сложной оснастки, последующей правки деталей, зачистки заусенцев, потерями материала, связанными с большой шириной реза (например, при фрезеровании концевыми фрезами) и использованием технологических подложек, накладок и пр.

Лазерная резка лишена этих недостатков [13]. Кроме того, при ее выполнении отсутствуют факторы, искажающие конструктивные параметры, так как обработка ведется при малых погонных энергиях и ничтожных силовых воздействиях, с минимальными тепловыми деформациями. Высокая производительность процесса лазерной обработки гарантируется достаточно большой скоростью резки, в 3 - 5 раз превосходящей скорости фрезерования.

К достоинствам метода относится также возможность автоматизации и оптимизации процессов раскроя и резки листовых материалов – наиболее массовых процессов авиационного производства, повышения коэффициента использования материала, сокращения цикла подготовки производства изделий.

Существующее отечественное лазерное оборудование, используемое для резки, представляет собой СО<sub>2</sub>-лазерные установки, выпускаемые промышленностью и поставляемые, как правило, только в виде излучателей с соответствующими блоками жизнеобеспечения, питания, управления (табл. 1) [3].

Исключением являются лазерные технологические установки, выпускаемые приборостроительным научно-производственным объединением «Ротор» на базе СО<sub>2</sub>-лазера «Лантан-3» мощностью 2 кВт, оснащенные системой позиционирования и координатными столами с ЧПУ.

Объединение освоило выпуск еще в 1989 г. установки модели: ЛТ2-400/500 с ходом координатного стола 400х500 мм и в 1990 г. - ЛТ2-1,6/2,5 с ходом стола 1600х2500 мм. Это позволило обеспечить обработку достаточно большой номенклатуры деталей авиастроения. В табл. 2 представлена техническая характеристика лазерной резки материалов.

Одной из ведущих компаний на рынке лазерной техники и технологии является фирма ЗАО «Лазерные комплексы» (г. Шатура, Россия), которая создана в 1990 г. на базе Научно-исследовательского центра технологических лазеров АН СССР [17, 18]. Фирма «Лазерные комплексы» осуществляет разработку и создание современного лазерного оборудования для резки, сварки и термообработки. Достижения фирмы демонстрировались на различных выставках, в том числе на международной специализированной выставке «Фотоника-2006».

Таблица 1 – Техническая характеристика лазерных установок, используемых для резки конструкционных материалов

Установка (разработчик)	Тип установки	Габаритные размеры, м	Параметр	
			Мощность ла- зерного излу- чения, Вт	Потребляемая мощность, кВт
«Разряд-6» (НИАТ)	С медленной прокачкой	8,0x0,65x2,7	800	25,0
«Катунь-1» (ПО «Полюс»)	С медленной прокачкой	6,0x0,7x1,4	800	20,0
«Кардамон» (ОКБ «Исток»)	С медленной прокачкой	6,0x0,7x1,2	1000	25,0
«Сириус» (ИПМ АН России)	С медленной прокачкой	8,0x0,6x2,5	1000	22,0
ЛТ-1 (ФИАЭ)	С быстрой по- перечной про- качкой	4,0x2,0x2,5	до 5000	100,0
ЭУЗК (СУЗК) (МПБ)	С быстрой по- перечной про- качкой	-	до 7000	150,0

Таблица 2 – Техническая характеристика лазерной резки некоторых материалов

Материал	Параметр					
	Потребляемая мощность ла- зерного излу- чения, Вт	Толщина листа $\delta$ , мм	Скорость резания, м/мин	Ширина реза $t$ , мм	Ширина зоны тер- мического влияния $h$ , мм	Шерохо- ватость $R_z$ , мкм
Алюминиевый сплав	900	0,5...5	5...0,5	0,15...0,5	0,2...0,4	-
Конструкционная углеродистая сталь	350	0,5...5	5...0,5	0,2...1	0,2...0,23	14,5...80
Нержавеющая сталь 1X18H10T	350	0,5...5	3...0,3	0,2...0,6	0,1...0,2	-
Титановый сплав	350	0,5...5	5...0,5	0,5...1	0,3...0,5	16,4
Нержавеющая жаропрочная сталь (сплав):						-
ВНС-2	800	1,5	3,4	0,25	0,15	
СН-3	800	2,5	1,6	0,4	0,25	
ЖС-6	800	3,0	1,1	0,3	0,15	
ЭИ-602	800	1,0	2,3	0,3	0,15	

Для лазерной резки различных материалов компания предлагает технологические комплексы (лазерные станки) на базе современных СО<sub>2</sub>-лазеров мощностью 1,5, 2,0, 3,0 и 5,0 кВт. Комплексы оснащены высокоточными двухкоординатными (раскройными) столами с компьютерным управлением и размерами рабочей зоны от 1,2×0,8 м до 6,0×2,0 м. Компания представила новые высокопроизводительные лазерные раскройные станки серии ЛК-ПРОМ с системой управления на базе ЧПУ фирмы V&R (Австрия). Это универсальное оборудование для раскроя различных материалов применяется, в частности, для прецизионной резки листового проката по сложному контуру. Фирма производит лазерные станки этой серии – ЛК-2015, ЛК-2515 и ЛК-3015 (ПРО); их технические характеристики приведены в табл. 3. В данном оборудовании могут быть использованы лазеры различного типа.

Таблица 3 – Технические характеристики лазерных установок

Показатели	ЛК-3015	ЛК-2515
Рабочая скорость резки (м/мин)	0,06...20	0,06...20
Скорость холостого хода (м/мин)	до 80	до 80
Точность контурной обработки (мм/м)	(±) 0,1	(±) 0,1
Точность позиционирования (мм)	(±) 0,01	(±) 0,01
Рабочая зона обработки (м)	3,0×1,5	2,5×1,5
Максимальная масса обрабатываемого материала (кг)	400	350
Скорость перемещения паллеты (м/мин)	16	16

В зависимости от вида обрабатываемого материала различается и толщина резки. В табл. 4 приведена максимальная толщина разрезаемого материала (мм) в зависимости от его вида и типа применяемого лазера.

Известная компания ЗАО «ТехноЛазер» также производит лазерные станки для резки листовых материалов на основе технологических СО<sub>2</sub>-лазеров мощностью от 700 до 7500 Вт.

Фирма «ТехноЛазер» представляет лазерные станки различных моделей: LMC-1200-XX, LMC-2500-XX, LMC-3000-XX, LMC-6000-XX с координатными столами; размеры рабочей зоны (в поперечном и продольном направлениях X, Y) составляют: 1200×840 мм, 2000×1500, 3000×1500 и 6000×1500 мм. Позиционирование в вертикальном (Z) направлении - 100 мм для всех моделей. Скорость резки в направлениях X и Y достигает 10 м/мин, точность обработки - 0,1 мм.

Лазерные станки оснащены мощными технологическими лазерами. Это быстропроточный, электроразрядный СО<sub>2</sub>-лазер непрерывного и импульсно-периодического действия с поперечной прокачкой рабочей

смеси в газовом контуре. Фирма производит следующие типы лазеров: ТЛ-1,5, ТЛ-3,0, ТЛ-4,0, ТЛ-5,0, «Тандем» и ТЛ-7,5, мощность которых соответственно равна: 1.5, 2.5, 4.0, 5.0, 6.0 и 7.5 кВт.

Таблица 4 – Толщина резки материала в зависимости от типа лазеров

Материалы	Модель лазера				
	ТЛ-1,5	ТЛ-2,0	С2200	С3000	С4000
Низкоуглеродистая сталь	8	10	15	18	22
Легированная сталь	3	5	8	10	15
Алюминий	-	2	4	6	8

Кроме того, на отечественном рынке представлена машина лазерной резки металла «Харьков-Л» (ЗАО «Институт УКРОРГСТАНКИНПРОМ», Украина). В машине использован промышленный CO<sub>2</sub>-лазер Fanuc C4000E или Rofin Sinar мощностью 4 кВт, с помощью которого производится резка листов из конструкционной стали толщиной до 20 мм, нержавеющей стали - 12 мм, алюминия - до 8 мм. Размеры разрезаемого листа составляют 1500х3 000 мм.

Широко известно лазерное оборудование итальянской компании PRIMA INDUSTRIE S.p.A., которая является одной из ведущих и стабильных компаний в мире в области пятикоординатной лазерной обработки конструкций.

Во всех своих технологических лазерных обрабатывающих комплексах PRIMA INDUSTRIE использует газовые CO<sub>2</sub>-лазеры компаний PRC, Rofin Sinar и твердотельные лазеры дочерних компаний Prima Convergent и Prima Laserdyne (Lumonies).

При этом лазерные комплексы имеют в основном монолитную конструкцию, в которую встроены все узлы, приводы, система управления, резонатор. На рынке представлена новая версия HIGH SPEED лазерного станка PLATINO: скорость перемещения - 140 м/мин, станок многоцелевого применения, в том числе для раскроя листовой стали; предлагаемый фирмой режим резки Fly («летающая оптика» - во время обработки заготовка остается на месте) автоматически обеспечивает качественную кромку реза при острых углах обрабатываемой детали: программным обеспечением предусмотрена оптимизация режима резки в зависимости от толщины и типа обрабатываемого материала.

На рынке представлены две модели станка PLATINO - 1530 и 2040, с рабочими зонами соответственно 3000х1500 мм и 4000х2000 мм. На базе станка PLATINO компанией создана лазерная установка MAXIMO под девизом «Лазерная резка без границ». На данной установке воз-



можно обработка листовых заготовок размером до 48 м. Предлагаются установки в исполнении с тремя или пятью осями. Кроме того, PRIMA INDUSTRIE производит комбинированную лазерную установку DOMINO («лазерная фантазия»), которая может быть использована как для обработки плоского листа, так и объемных деталей.

Популярная отечественная фирма НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» в течение многих лет успешно осуществляет разработки и серийное производство широкой номенклатуры нового поколения лазерного технологического оборудования серий МЛ для резки и раскроя (МЛ3 и МЛ4).

Лазерная машина МЛ3 (базовая модель) предназначена для резки и сложноконтурного раскроя листовых материалов толщиной до 3 – 4 мм для алюминия с высокой точностью и качеством обработки по контуру.

Фирма «Вебер КоМеханикс» предлагает машины лазерного раскроя листа серии AXEL, Impuls 6020, комплекс модели ORION компании LVD STRIPPIT и др.

Таким образом, на отечественном рынке широко представлено лазерное оборудование для резки различных металлов и сплавов, способствующее развитию и совершенствованию технологии этого процесса [18].

На рис. 3 приведены зависимости шероховатости поверхности реза листов толщиной 1,2 мм из алюминиевого сплава 1163 от скорости резки при применении кислорода (а) или азота (б) давлением 1,1 МПа, а также от давления кислорода при  $V_p=1,87$  м/мин и мощности излучения  $W=800$  Вт (в) [3].

На рис. 4 показаны зависимости ширины реза, листов этого же сплава толщиной 1,2 мм от скорости резки при применении кислорода (а) и азота (б) давлением 1,1 МПа, а также от мощности лазерного излучения (в) при  $V=1,87$  м/мин и использовании азота давлением 1,1 МПа.

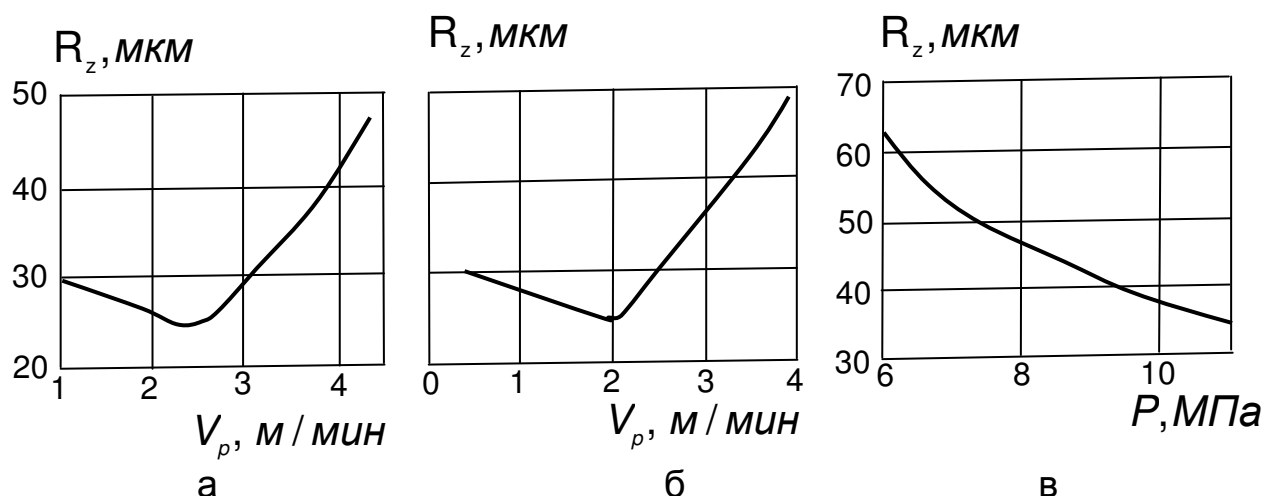


Рисунок 3 – Зависимость шероховатости поверхности реза деталей из алюминиевого сплава 1163 толщиной 1,2 мм от технологических параметров лазерной резки

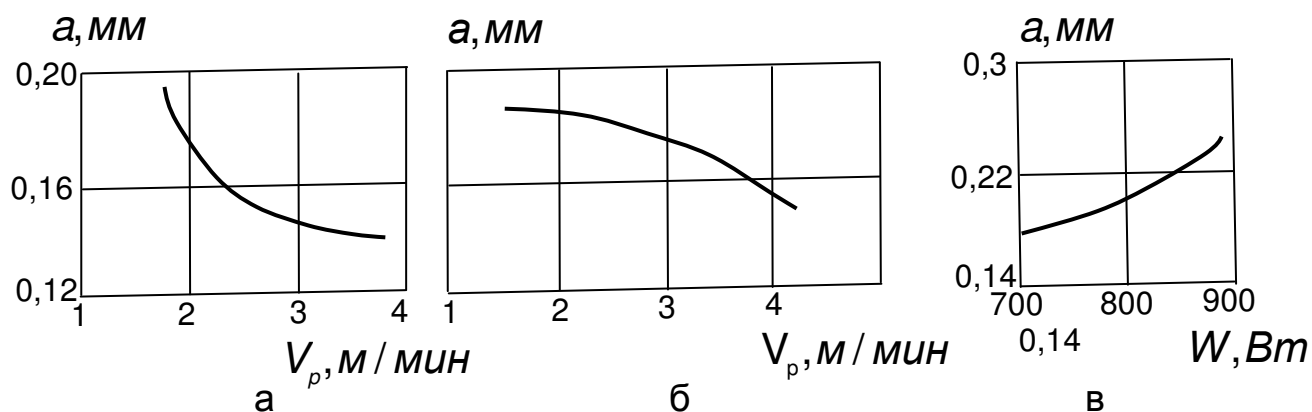


Рисунок 4 – Зависимость ширины реза деталей из алюминиевого сплава 1163 толщиной 1,2 мм от технологических параметров лазерной резки

Анализ указанных источников [7 - 12] и многочисленных других, изданных в последние 15 лет [13 - 20], свидетельствуют о том, что лазерная резка – это современный способ раскроя различных материалов. Она открывает неограниченные возможности для изготовления изделий сложных форм, не требует высоких денежных затрат: независимо от количества деталей цена на них будет практически одинаковая.

По сравнению с традиционными методами лазерная резка обладает рядом неоспоримых преимуществ:

- при лазерной резке отсутствует механическое воздействие на обрабатываемый материал;
- сфокусированное лазерное излучение регулируемой мощности - идеальный инструмент, обеспечивающий качественную гладкую поверхность кромки реза любого материала независимо от его теплофизических свойств;
- точность позиционирования лазерной головки составляет 0,08 мм, за счет чего достигается высокая точность взаимного расположения элементов заготовки;
- применение лазерной резки возможно на легкодеформируемых и нежестких деталях;
- лазерный луч имеет диаметр около 0,25 мм, что позволяет создать отверстие диаметром от 0,50 мм;
- за счет большой мощности лазерного излучения обеспечивается высокая производительность процесса лазерной резки;
- возможность получить качественный рез, не требующий дополнительной обработки;
- возможность изготовить изделия любой сложности, в любом количестве и практически из любого материала.

В основном для обработки материалов используются два класса лазеров: так называемые твердотельные и газовые. Наиболее распространенные твердотельные лазеры на неодимовом стекле и иттрий-алюминиевом гранате с длиной волны около 1 микрона, что немного

длиннее видимого красного излучения, и газовые лазеры на углекислом газе с длиной волны около 10 микрон (дальняя инфракрасная область, невидимая глазом).

Отмечается возможность резки листов из алюминиевых сплавов (Д16, АМг) толщиной до 5 мм. Тонкие алюминиевые сплавы режутся в импульсном, а толстые – в микроплазменном режимах. Торцевая поверхность реза пористая, шероховатая, на нижней кромке имеется легкоудаляемый облой. Чем толще материал, тем хуже качество боковой поверхности.

В обширной литературе по лазерной резке металлов [13 – 20 и др.] наиболее полно описаны механизмы и закономерности процесса для различных сталей. Влияние энергетических параметров, оптимизация режимов резки, а также вопросы ее качества для титана и в особенности для алюминиевых сплавов освещены в значительно меньшей степени.

Так, в [13] приведены зависимости влияния скорости резки  $V_p$  м/мин на ширину реза  $b$  для сталей, титановых и алюминиевых сплавов (рис. 5), верхнего предела соотношения плотности мощности  $E_f$  и скорости реза (рис. 6), а также глубины реза  $h$  от скорости качественного реза титанового листа при различных условиях фокусировки (диаметра пятна фокусировки  $d_f$ ) (рис. 7).

Наряду с плотностью мощности важным технологическим фактором, во многом определяющим размерные параметры обработки, является скорость резки. Однако варьирование скорости обработки имеет ограничения.

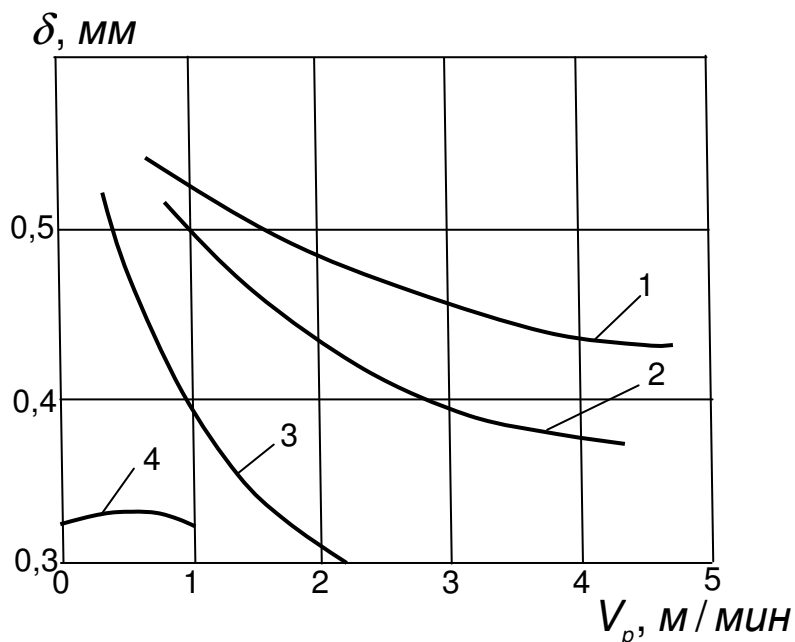


Рисунок 5 – Влияние скорости резки на ширину реза в различных металлах:

- 1 – углеродистая сталь; 2 – нержавеющая сталь;  
3 – титановый сплав; 4 – алюминиевый сплав

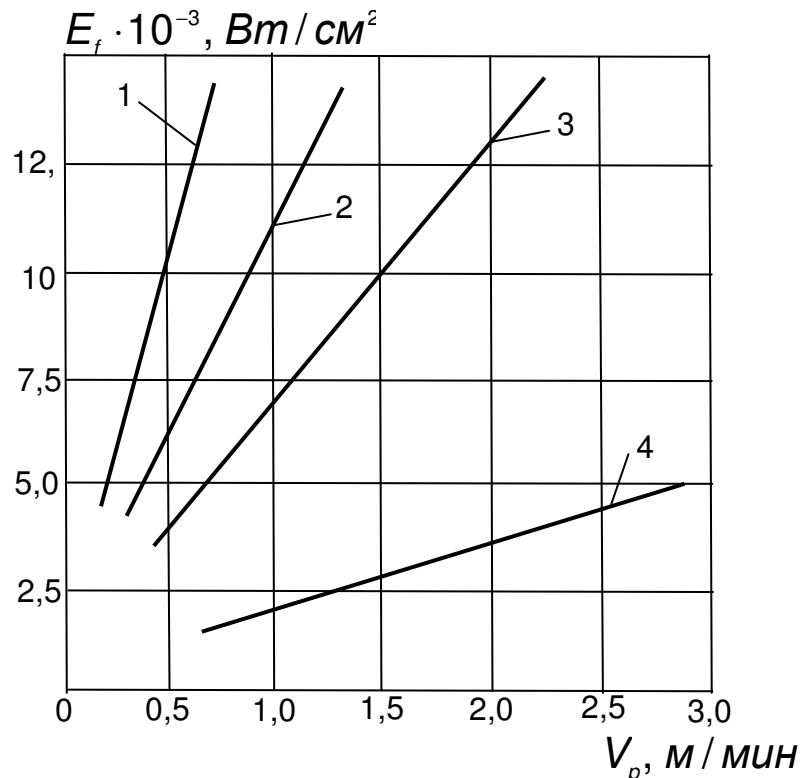


Рисунок 6 – Зависимость верхнего предела соотношения плотности мощности и скорости резки, обеспечивающего качественную резку различных материалов ( $P=0,9кВт$ ;  $d_f=0,2$  мм):

1, 3 и 4 – соответственно углеродистые, нержавеющие стали и титановые сплавы в среде кислорода; 2 – титановые сплавы в среде инертных газов

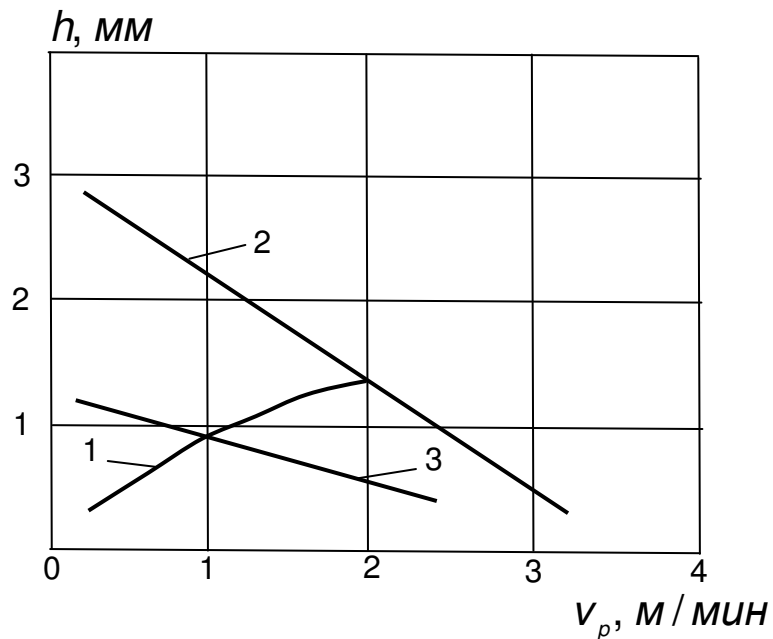


Рисунок 7 – Зависимость глубины реза в титане от скорости резки при различных углах фокусировки:

1 -  $h_k$  ( $d_f=0,4$  мм); 2 -  $h$  ( $d_f=0,4$  мм); 3 -  $h_k$  ( $d_f=0,65$  мм)

При резке нержавеющей сталей на низких скоростях глубина качественно выполненного реза  $h_k$  первоначально возрастает при снижении плотности мощности до  $E_f = 3 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, а затем понижается при дальнейшем уменьшении  $E_f$ .

Для высоких скоростей резки, когда разрезаются детали толщиной 1...2 мм, характерно возрастание параметра  $h_k$  при повышении плотности мощности за счет увеличения мощности излучения, и, следовательно, ограничений на мощность лазерного оборудования не имеется [13].

Для титановых сплавов характерны те же закономерности, однако при снижении плотности мощности за счет изменения условий фокусировки наблюдается более резкое снижение глубины прорезания металла. Максимальная глубина качественно выполненного реза в этом случае соответствует скоростям резки, лежащим в пределах 1,5...2 м/мин. При указанных оптимальных скоростях обработки ограничений по мощности лазерных установок для резки титановых сплавов не имеется.

В результате одинаковую глубину качественного реза для титана можно получить как при высокой плотности мощности и более высокой скорости резки, так и при низких значениях  $E_f$  и  $V_p$ . Очевидно, что первый режим технологически более предпочтителен.

Повышение микротвердости в зоне термического влияния (ЗТВ) при обработке титановых сплавов во многом зависит от режимов резки. Для высоких скоростей характерно незначительное повышение параметра  $H_\mu$  в ЗТВ при малой глубине самой зоны нагрева, тогда как при низких скоростях резки возрастает как глубина этой зоны, так и микротвердость в ней (рис. 8).

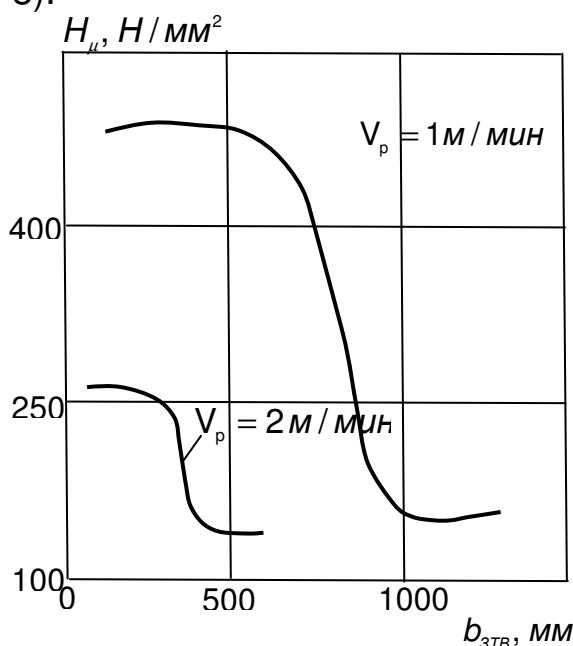


Рисунок 8 – Изменение микротвердости в зоне нагрева титанового сплава при различных скоростях резки

Рассматриваемый титановый сплав в исходном состоянии имеет полиэдрическую структуру  $\alpha$ -твердого раствора и относится к  $\alpha$ -сплавам. В ЗТВ в результате быстрого охлаждения образуется игольчатая мартенситная структура.

Наблюдаемые изменения структуры металла в ЗТВ не оказывают влияния на механические свойства вырезанных лазерным лучом деталей. Это подтвердили сравнительные механические и усталостные испытания, а также испытания на общую коррозию для деталей, отрезаемых лазерным лучом и на гильотинных ножницах. Оценка механических свойств образцов по углу изгиба до появления первой трещины и усилию на растяжение показала, что угол изгиба и усилие разрыва образцов не зависят от способа обрезки их кромок.

В настоящее время лазерные технологии нашли широкое применение в различных отраслях техники для различных процессов (рис. 9).

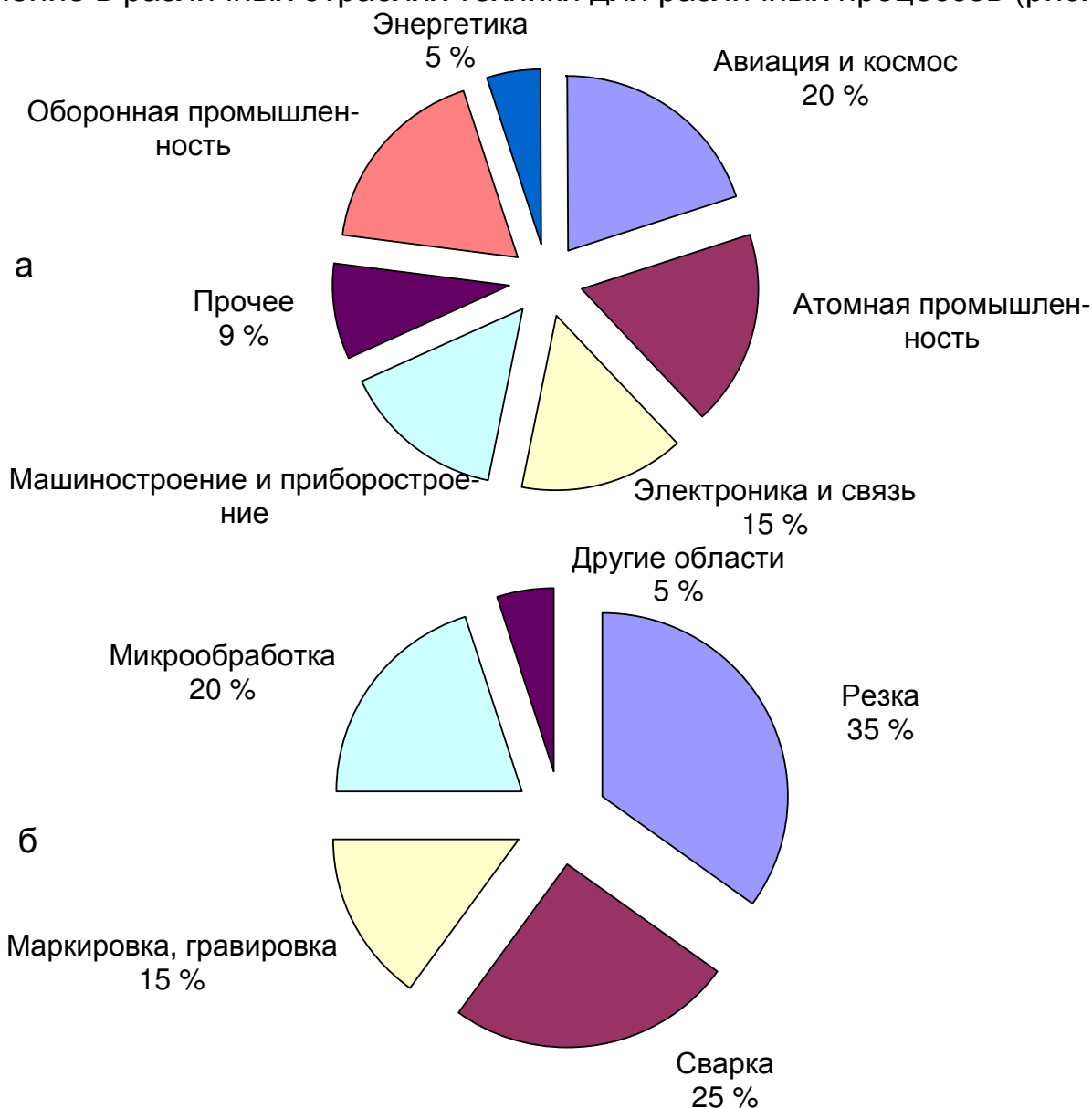


Рисунок 9 - Примерное распределение лазерных технологий по отраслям промышленности (а) и процессам (б)

Современный лазерный технологический комплекс (ЛТК) представляет собой сложную автоматизированную систему. ЛТК включает в себя:

- устройства внешней оптики - обеспечивают формирование пятна лазерного излучения, визуальный и параметрический контроль процесса;
- системы технологической привязки процесса и соединения ЛТК с прочим оборудованием в единую технологическую линейку;
- блоки питания, системы управления и контроля, охлаждения, пневматические блоки.

Основными же частями являются лазер и кинематические блоки (координатные столы и приводы, сканирующие системы, системы слежения за профилем детали и др.), необходимые для организации перемещений детали и пятна и обработки по заданному контуру (чертежу). Кроме того, современный ЛТК немыслим без средств цифровой обработки информации и специального ПО, позволяющего автоматически управлять технологическим процессом, осуществлять контроль и диагностику составных частей и системы в целом.

В ряде применений ЛТК должен не только обеспечивать автоматическую обработку, управление и контроль качества процесса и изделия, но и уметь самостоятельно принимать решения и осуществлять меры по удержанию необходимого качества в случае отклонения технологических параметров. Таким образом, в современных ЛТК используются достижения многих направлений высокотехнологичного производства, и в то же время развитие лазерных технологий во многом определяет развитие практически всех отраслей современной промышленности. Поэтому степень развития и темпы роста лазерных технологий непрерывно возрастают [18].

Резюмируя проведенный выше анализ эффективности внедрения лазерных технологий резки цветных листовых металлов в авиастроительное производство, необходимо отметить ряд существенных аспектов. Прежде всего, интегральная эффективность реализации любого технологического процесса, в том числе анализируемого выше, состоит из производственной эффективности, предопределяющей превышение дохода в денежном выражении над всеми расходами, связанными с освоением данной технологии, и эксплуатационной эффективности последствия технологии, отражающей качество получаемых деталей.

При всей многочисленности квалиметрических характеристик качества изделия превалирующей является несущая способность в среде эксплуатации – статическая прочность и длительная прочность (усталость), обеспечивающая регламентированный ресурс.

Любой технологический процесс резки листовых материалов, будь то вырубка, фрезерование, опиловка или лазерная резка, вносит определенное, но различное, негативное влияние на физико-механические характеристики материала в ЗТВ. Несмотря на различие природы этого влияния (заусенцы, шероховатость, микротрещины, оплавление и т.д.),

все факторы ЗТВ могут отразиться на несущей способности детали или потребовать дополнительных технологических операций, снижающих эти факторы (зачистка, полирование торцов и т.д.). Это повлечет за собой дополнительные затраты как на теоретические и экспериментальные исследования этих негативных факторов ЗТВ, так и на реализацию соответствующих технологических операций, корректирующих свойства материала в ЗТВ.

На рис. 10 представлена упрощенная блок-схема функциональной взаимосвязи факторов, предопределяющих интегральную эффективность внедрения лазерных технологий резки цветных листовых металлов в авиастроительное производство.

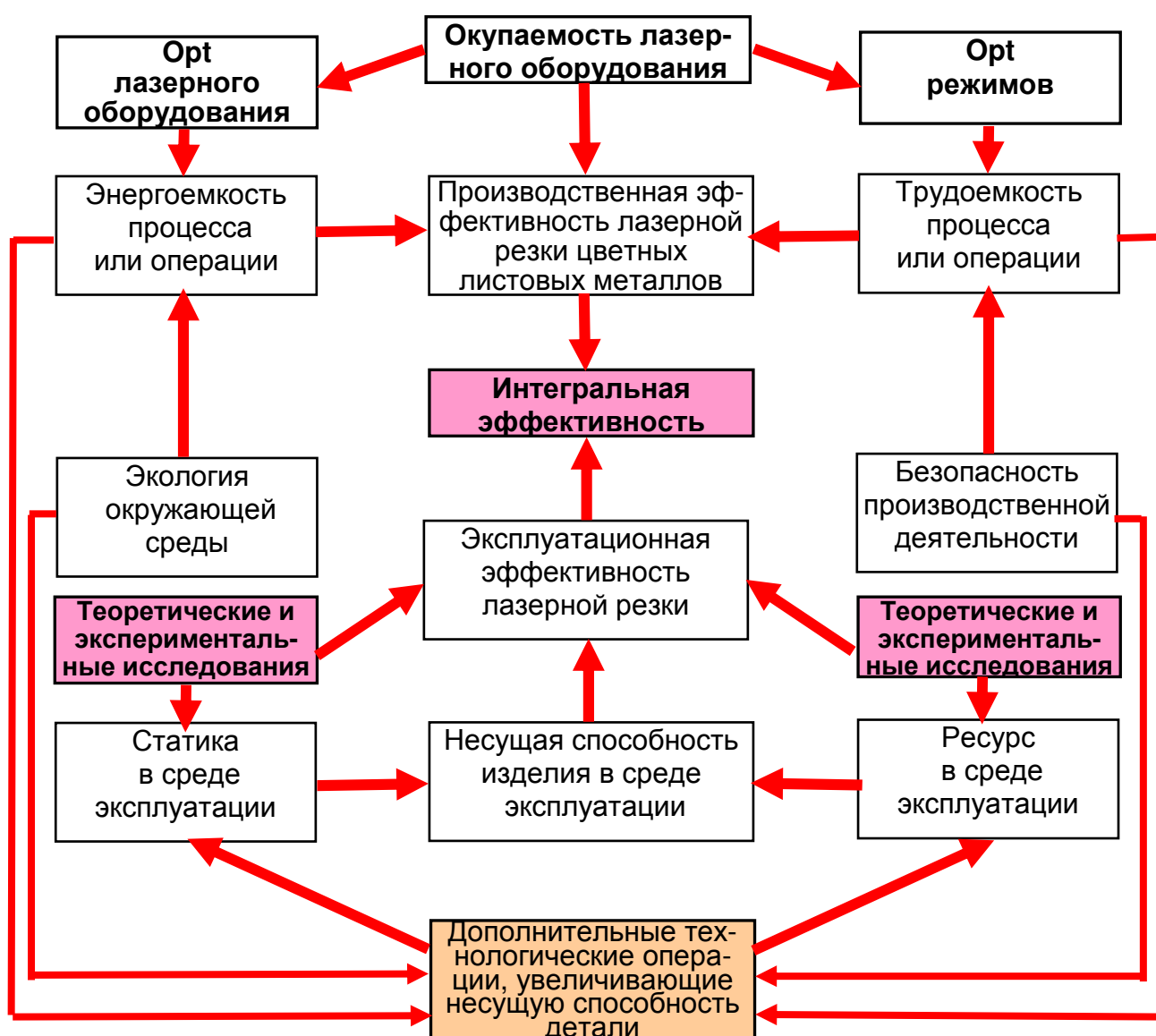


Рисунок 10 – Блок-схема функциональной взаимосвязи факторов, предопределяющих интегральную эффективность внедрения лазерных технологий резки цветных листовых металлов в авиастроительное производство



Несмотря на значительное число монографий и публикаций, касающихся лазерной резки, отмеченные выше аспекты данной технологии практически не освещены и настоятельно требуют их исследований, которым будут посвящены исследования авторов.

#### Список использованных источников

1. Итоги науки и техники. Сер. Авиастроение. – Т. 9. Самолетостроение за рубежом // под ред. С.М. Егера и С.В. Румянцева. – М.: ВИНТИ, 1986. – 266 с.
2. Кривов Г.А. Технология самолетостроительного производства / Г.А. Кривов. – К.: КВЦ, 1997. – 460 с.
3. Сухов В.В. Оптимизация конструктивно-технологического облика деталей заготовительно-штамповочного производства в авиастроении / В.В. Сухов. – К.: Техніка, 1997. – 159 с.
4. Громова В.Н. Изготовление деталей из листов и профилей при серийном производстве/ В.Н. Громова, В.И. Завьялова, В.К. Коробов. – М.: Оборонгиз, 1960. – 340 с.
5. Грощиков А.И. Заготовительно-штамповочные работы в самолетостроении / А.И. Грощиков, В.А. Малофеев. – М.: Машиностроение, 1970. – 440 с.
6. Горбунов М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
7. Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов/ Г.Г. Гладуш. – М.: Машиностроение, 1985. – 208 с.
8. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1989. – 301 с.
9. Григорьянц А.Г. Лазерная техника и технология / А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов. – М.: Машиностроение, 1988. – 191 с.
10. Рыкалин Н.Н. Лазерная обработка материалов / Н.Н. Рыкалин. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
11. Руководство по технологичности самолетных конструкций / – под ред. П.Н. Белянкина. – М.: НИАТ, 1983. – 720 с.
12. Разработка и исследование технологического процесса лазерной резки для изготовления деталей из алюминиевых сплавов / В.В. Блишков, М.Р. Грязнов, А.М. Логинов и др. // Авиационная промышленность. – 1989. - № 11. – С. 40-43.
13. Лазерная техника и технология: в 7 кн. – Кн. 7. Григорьянц А.Г. Лазерная резка металлов: учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов/ под ред. А.Г. Григорьянца. - М.: Высш. шк., 1988. – 127 с.
14. Промышленное применение лазеров / под ред. Г. Кебнера. – М.: Машиностроение, 1988. – 279 с.
15. Баранов И.Я. Технология лазерной сварки, закалки и резки: учеб. пособие / И.Я. Баранов. – СПб., 1999. – 75 с.

16. Исследование газолазерной резки металлов с целью получения деталей с высокими характеристиками точности и воспроизведения контура / А.Г. Валиухин, С.Г. Горный, А.М. Григорьев и др. – СПб.: Изд-во С. – Петерб. гос.ун-та, 1999. – 35 с.
17. Прогрессивная лазерная резка металлов / ecraft.ru.
18. Лазерное оборудование для обработки материалов: компоненты, технологии, системы. – Ч. 1. Металлообработка и станкостроение. – Октябрь 2008 / [http:// www,metstank.ru](http://www.metstank.ru) / 09.12.2008.
19. Лазерная микрообработка: Эффективные и надежные решения для производства / Металлообработка и станкостроение. – Февраль 2009 / [http:// www,metstank.ru](http://www.metstank.ru) / 25.02.2009.
20. Остаточные деформации и дефекты при лазерной резке // В.С. Майоров, С.В. Майоров, М.Д. Хоменко, Р.В. Гришов / [http:// www.laser.ru](http://www.laser.ru)

*Поступила в редакцию 05.03.2010 г.  
Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Е. Тараненко,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*