

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РОТОТАБЕЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ШИРИНЫ ЛАЗЕРНОГО РЕЗА

### 1. Тепловая модель процесса лазерной резки листовых материалов

Основные количественные соотношения для лазерной резки можно получить из анализа следующей тепловой модели процесса. Тепловой источник мощностью  $q$ , равной поглощенной материалом доли лазерного излучения  $P$ , движется прямолинейно по поверхности бесконечной пластины толщиной  $S$  со скоростью  $v$  [4].

В соответствии с существующей теорией [1, 4] после воспламенения металла через некоторый промежуток времени устанавливается квазистационарный режим разрушения, при котором его скорость  $V_p$  определяется только температурой границы разрушения  $T_p$  в зоне обработки. Последнее выполняется, если струя кислорода полностью удаляет расплавленный окисел из зоны резки. Однако на механизм формирования реза существенно влияют и те явления, которые происходят на верхней кромке металла до момента установления квазистационарного разрушения.

В этот переходный период происходит нагревание верхней кромки металла от исходной температуры до  $T_p$  и ускорение границы разрушения до скорости  $V_p$ . При этом переходный процесс сопровождается перераспределением поглощенной и перешедшей в тепло энергии лазерного излучения [4].

В начальный момент граница разрушения неподвижна, все тепло отводится внутрь металла механизмом теплопроводности, а также расходуется (при достижении на верхней кромке детали температуры плавления металла  $T_{пл}$ ) на образование прослойки жидкого металла, его окислов и нагрев этой прослойки до температуры  $T_p$ . Толщина нагретого слоя вблизи неподвижного фронта разрушения возрастает с течением времени  $t$  пропорционально  $\sqrt{t}$  [4].

Скорость границы разрушения в переходный период остается незначительной по сравнению с квазистационарной. При достижении же температуры  $T_p$  скорость границы разрушения резко возрастает до значения  $V_p$  [4]. Следовательно, будем считать, что изменение скорости

границы разрушения носит ступенчатый характер: после некоторого запаздывания она достигает стационарной скорости движения  $V_p$ , определяемой только температурой поверхности металла  $T_p$ .

Время  $t_0$  установления квазистационарного разрушения для малых скоростей обработки можно определить [4], учитывая, что нагревание металла происходит движущимся с постоянной скоростью  $v$  лазерным лучом, сфокусированным в круговое пятно радиусом  $r_l$ :

$$t_0 = \frac{2a}{v^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{kv(T_{кип} - T_H)}{W_p a}} \right], \quad (1)$$

где  $T_H$  – начальная температура металла, град;  $T_{кип}$  – температура кипения металла, град;  $W_p$  – плотность лазерной мощности:  $W_p = \frac{4P}{\pi \cdot d_l^2}$ , Вт/см<sup>2</sup>;  $P$  – мощность лазерного излучения, Вт;  $d_l = 2r_l$ .

В течение времени  $t_0$  лазерный источник переместится по верхней кромке металла на расстояние

$$x_0 = \frac{2a}{v} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{kv(T_{кип} - T_H)}{W_p a}} \right]. \quad (2)$$

Кроме того, за это же время  $t_0$  на верхней кромке вследствие механизма теплопроводности образуется зона жидкого металла и его окислов шириной (рис. 1, а)

$$x_S = \sqrt{a(t_0 - t_{пл})}, \quad (3)$$

где  $t_{пл}$  – время, необходимое для достижения температуры плавления металла  $T_{пл}$ .

При этом

$$t_{пл} = \frac{2a}{v^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{kv(T_{пл} - T_H)}{W_p a}} \right]. \quad (4)$$

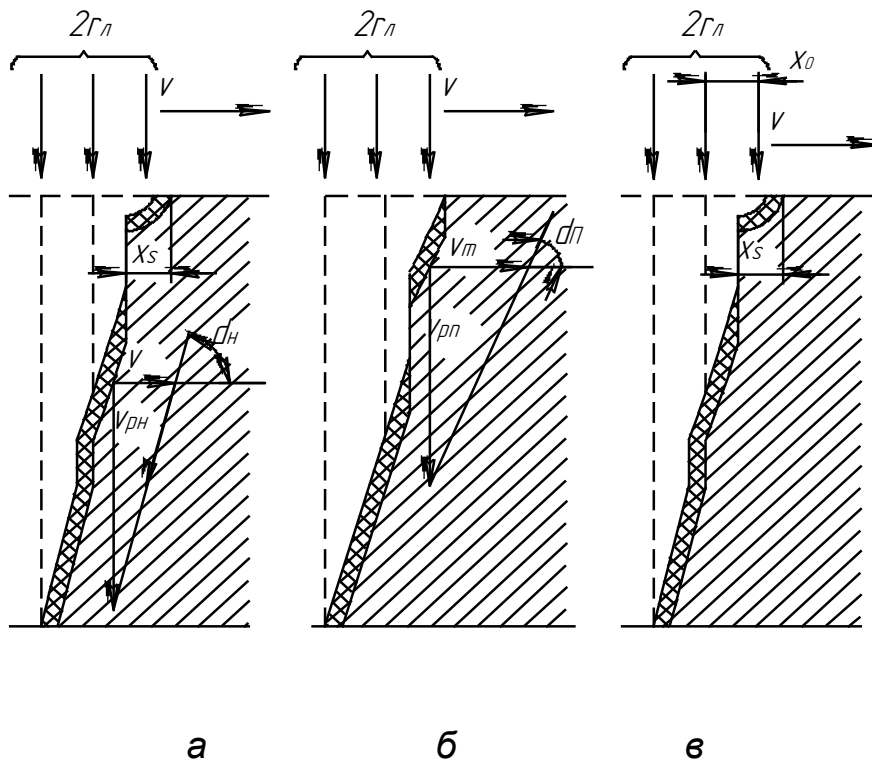


Рисунок 1 – Механизм разрушения при резке металлов непрерывным лазерным излучением на низких скоростях

Следовательно, если за время  $t_0$  зона жидкого металла распространится в направлении резки на большее расстояние, чем переместится лазерный луч (что характерно для низких скоростей резки), т. е.  $X_S = X_0$ , то в течение этого времени перед движущимся лазерным лучом на верхней кромке образуется расплавленный участок. При дальнейшем движении лазерного пучка обработка на этом участке происходит только в глубину металла до тех пор, пока луч лазера вновь не достигнет верхней кромки металла (рис. 1, б).

Затем снова в течение времени  $t_0$  происходит нагревание верхней кромки металла до температуры  $T_0$  передней частью движущегося лазерного луча при неподвижной границе разрушения, тогда как за счет оставшейся части лазерного луча продолжается резание в глубину металла (рис. 1, в). Процесс периодически повторяется.

Таким образом, при малых скоростях резки разрушение в глубину металла происходит двояко. Вблизи переднего края лазерного луча протяженностью  $X_0$  оно протекает периодически (со скоростью  $V_P^{\Pi}$ ) в течение времени прохождения лучом расстояния  $X_S$  и заключается в нагреве и разрушении детали периодически перемещающимся от поверхности в глубину металла источником тепла. В результате воздействия на металл

остальной части сфокусированного луча, равной  $(d_{\text{л}} - x_0)$ , разрушение происходит непрерывно (со скоростью  $V_{\text{Р}}^{\text{H}}$ ). При этом поверхность фронта периодически протекающего разрушения наклонена по отношению к направлению резки под углом  $\alpha_{\text{л}}$ , образованным скоростью  $V_{\text{Р}}^{\text{П}}$  и скоростью распространения в металле тепловой волны  $V_{\text{Т}}$ , а поверхность фронта непрерывного разрушения – под углом  $\alpha_{\text{н}}$ , образованным скоростями  $V_{\text{Р}}^{\text{H}}$  и  $v$  (см. ри. 1, а и б).

Качество лазерного реза оценивают показателями: ширина реза, шероховатость поверхности, наличие грата, неперпендикулярность кромок реза, ширина ЗТВ.

Максимальную толщину разрезаемого металла  $S$  для низких и высоких скоростей резки можно определить соответственно по зависимостям [1, 4]

$$S = \frac{x_{\text{С}} V_{\text{Р}}^{\text{П}} + (2r_{\text{л}} - x_0) V_{\text{Р}}^{\text{H}}}{v}; \quad (5)$$

$$S = \frac{(2r_{\text{л}} - x_0) V_{\text{Р}}^{\text{H}}}{v}. \quad (6)$$

Учитывая, что рез в поперечном сечении на верхней кромке детали формируется при неподвижной границе разрушения, его ширину можно оценить из выражения

$$b_{\text{Р}}^{\text{е}} = 2 \left[ r_{\text{л}} \sqrt{1 - \left( \frac{x_0}{2r_{\text{л}}} \right)^2} + x_{\text{С}} \right] \quad (7)$$

При высоких скоростях обработки, когда теплоотводом в поперечном направлении можно пренебречь, ширина реза на верхней кромке

$$b_{\text{Р}}^{\text{е}} = 2 \left[ r_{\text{л}} \sqrt{1 - \left( \frac{x_0}{2r_{\text{л}}} \right)^2} \right], \quad (8)$$

где

$$x_0 = \frac{\pi \cdot k}{4a} \cdot v \cdot \left[ \frac{T_{\text{кип}} - T_{\text{н}}}{W_{\text{Р}}} \right]^2 \quad (9)$$

В глубинных слоях металла рез формируется при движущейся со скоростью  $V_{\text{Р}}^{\text{H}}$  границе разрушения. Следовательно, его ширина в нижних слоях реза должна быть меньше, чем на верхней кромке. Эту величину можно уточнить из зависимости



Таблица 3 – План эксперимента типа  $2^3$  для стали ВНС-5

номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$y(b_p)$ , МКМ
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,274
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,223
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,252
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,217
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,548
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,432
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,505
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,433

Таблица 4 – План эксперимента типа  $2^3$  для стали 45

номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$y(b_p)$ , МКМ
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,232
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,21
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,223
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,207
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,465
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,42
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,446
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,415

Таблица 5 – План эксперимента типа  $2^3$  для стали Х18Н10Т

номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$y(b_p)$ , МКМ
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,218
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,206
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,213
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,204
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,436
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,411
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,425
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,408

План типа  $2^3$  позволяет получить отдельные оценки для коэффициентов уравнения регрессии вида

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (11)$$

Коэффициенты уравнения регрессии (7) определяют по формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N}; \quad b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij}y_j}{N}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij}x_{lj}y_j}{N}, \quad (12)$$

где  $i, l$  – номера факторов;  $x_{ij}, x_{lj}$  – кодированные значения факторов  $i$  и  $l$  в  $j$ -м опыте.

В результате расчетов получены следующие значения коэффициентов:

– для титанового сплава ВТ-5 –  $b_0 = 0,3846$ ;  $b_1 = -0,045$ ;  $b_2 = -0,01413$ ;  $b_3 = 0,1278$ ;  $b_{12} = 0,00815$ ;  $b_{13} = -0,0154$ ;  $b_{23} = -0,00437$ ;  $b_{123} = -0,0527$ .

– для стали ВНС-5 –  $b_0 = 0,3605$ ;  $b_1 = -0,0034$ ;  $b_2 = -0,00875$ ;  $b_3 = 0,119$ ;  $b_{12} = 0,0075$ ;  $b_{13} = -0,01275$ ;  $b_{23} = -0,00175$ ;  $b_{123} = -0,0035$ .

– для стали 45 –  $b_0 = 0,32725$ ;  $b_1 = -0,01425$ ;  $b_2 = -0,0045$ ;  $b_3 = 0,10925$ ;  $b_{12} = 0,0025$ ;  $b_{13} = -0,00475$ ;  $b_{23} = -0,0015$ ;  $b_{123} = -0,001$ .

– для стали Х18Н10Т –  $b_0 = 0,3151$ ;  $b_1 = -0,00788$ ;  $b_2 = -0,00263$ ;  $b_3 = 0,10488$ ;  $b_{12} = 0,0014$ ;  $b_{13} = -0,0026$ ;  $b_{23} = -0,00087$ ;  $b_{123} = -0,0006$ .

После подстановки коэффициентов в уравнение (7) оно принимает вид:

– для титанового сплава ВТ-5:

$$Y = 0,3846 - 0,045x_1 - 0,01413x_2 + 0,1278x_3 + 0,00815x_1x_2 - 0,0154x_1x_3 - 0,0043x_2x_3 - 0,0527x_1x_2x_3;$$

– для стали ВНС-5:

$$Y = 0,3605 - 0,0034x_1 - 0,00875x_2 + 0,119x_3 + 0,0075x_1x_2 - 0,01275x_1x_3 - 0,00175x_2x_3 - 0,0035x_1x_2x_3;$$

– для стали 45:

$$Y = 0,32725 - 0,01425x_1 - 0,0045x_2 + 0,10925x_3 + 0,0025x_1x_2 - 0,00475x_1x_3 - 0,0015x_2x_3 - 0,001x_1x_2x_3;$$

– для стали X18H10T:

$$Y = 0,3151 - 0,00788x_1 - 0,00263x_2 + 0,10488x_3 + 0,0014x_1x_2 - 0,0026x_1x_3 - 0,00087x_2x_3 - 0,0006x_1x_2x_3.$$

Кодирование независимых переменных осуществляется по формуле

$$x_j = \tilde{X}_j - \frac{\tilde{X}_{j0}}{\Delta\tilde{X}_j}. \quad (13)$$

### Вывод

Из полученных уравнений видно, что наибольшее влияние на ширину реза  $b_p$  для представленных материалов оказывает диаметр фокусировки луча, затем скорость резки и, наконец, мощность лазерного излучения.

При скорости лазерной резки меньше 0,5 м/мин качество лазерной резки значительно снижается. На поверхности реза появляются рытвины, бесформенные наросты, процесс переходит в так называемый автогенный режим.

Анализ газолазерной резки для рассмотренных групп авиационных листовых металлов позволяет сделать следующие общие выводы.

Титановые сплавы обладают лучшей способностью к резке лазерным излучением, несмотря на повышенные в сравнении с конструкционными сталями прочностные характеристики.

Высокопрочные стали при прочих равных параметрах (мощность излучения, скорость резки) по сравнению с титановыми сплавами при газолазерной резке имеют ограничения по толщине листа. Эти ограничения связаны с различными механизмами изменения теплопроводности данных материалов при нагревании до температуры кипения.

Моделирование распределения температурных полей при газолазерной резке различных групп материалов при варьировании скоростей реза и толщины листов показало различие в ширине реза на входе и выходе луча, которое зависит от скорости реза. Моделирование распределения температурных полей при ГЛР различной толщины показало, что наиболее эффективным технологическим параметром для получения качественного реза является скорость движения лазерного луча.

### Список использованной литературы

1. Технологические лазеры: справочник: в 2 т. Т. 1. Расчет, проектирование и эксплуатация [Текст] / Г.А. Абельсиитов, В.С. Голубев, В.Г. Гонтарь [и др.] ; под ред. Г.А. Абельсиитова. – М. : Машиностроение,



1991. – 432 с.

2. Андрияхин, В.М. Процессы лазерной сварки и термообработки [Текст] / В.М. Андрияхин. – М.: Наука, 1988. – 176 с.

3. Краткий справочник физико-химических величин [Текст] : справочник / К.П. Мищенко, А.А. Равделяю. – М.: Высшая школа, 1969. – 268 с.

4. Действие излучения большой мощности на металлы: монография [Текст] / С. И. Анисимов [и др.]. – М.: Наука, 1970. – 192 с.

5. Справочник по технологии лазерной обработки: справочник [Текст] / В.С. Коваленко [и др.]. – Київ: Техніка, 1985. – 167 с.

6. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст] / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

7. Дьяченко, Ю.В. Численное моделирование процессов лазерной резки листовых авиационных материалов [Текст] / Ю.В. Дьяченко, А.В. Маковецкий, Е.Е. Хитрых // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», – 2014. – Вып. 63. – С. 104–114.

*Поступила в редакцию 30.11.2017.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.И. Планковский,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*