



МОСКОВСКИЙ
орденов Ленина, Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н. Э. Баумана

Кафедра МТ-12

Резка сталей волоконным лазером в импульсно-модулированным режиме

Студенты:

Выродова М.А.
Коека Ю.Д.

Группа:

МТ 12-101

Научный руководитель:

Богданов А.В.

Москва, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	2
Введение	3
Конкретные примеры лазерной резки.....	4
О появлении волоконных лазеров.....	4
Особенности волоконных лазеров.....	5
Характеристики применяемого оборудования.....	6
Особенности модуляции излучения	8
Предварительные расчеты	12
Полученные результаты	14
Литература	23

ВВЕДЕНИЕ.

Основной операцией заготовительного производства в условиях современного производства является резка.

В настоящее время широкое применение находят различные методы разделения металлов. В основном используют механическую обработку - резку ножовочными полотнами, ленточными пилами, фрезами и др. В производстве также используются разнообразные станки общего и специального назначения для раскроя листовых, профильных и других заготовок из различных металлов и сплавов. При многих достоинствах этого процесса следует отметить и недостатки, главным образом, связанные с низкой производительностью и малой стойкостью режущего инструмента, а также трудностью и невозможностью, в большинстве случаев, раскроя материалов по сложному криволинейному контуру.

В промышленности получили распространение и процессы разделения материалов, основанные на электрохимическом, электрофизическом и физико-механическом воздействиях. Ацетиленокислородная резка, плазменная резка проникающей дугой и другие физико-химические методы разделения обеспечивают повышение производительности по сравнению с механическими методами, но не дают высокой точности и чистоты поверхности реза и требуют в большинстве случаев последующей механической обработки. Электроэрозионная резка позволяет осуществлять процесс разделения материалов с малой шириной при высоком качестве реза, но характеризуется низкой производительностью.

Возникает производственная необходимость в разработке и промышленном освоении методов резки современных конструкционных материалов, которые сочетали бы высокие показатели как по производительности процесса, так и по точности и качеству поверхностей реза. К числу таких перспективных процессов следует отнести лазерную резку металлов.

Сфокусированное лазерное излучение, обеспечивая высокую концентрацию энергии, позволяет разделять практически любые металлы и сплавы независимо от их теплофизических свойств. При этом можно получать узкие разрезы с минимальной зоной термического влияния. При лазерной резке не требуется механическое воздействие на обрабатываемый металл, а возникающие деформации, как временные в процессе резки, так и остаточные после полного остывания, незначительны. Это позволяет осуществлять лазерную резку с высокой степенью точности, в том числе и легкодеформируемых и нежестких заготовок или деталей. Благодаря большой плотности мощности лазерного излучения обеспечивается высокая производительность, сочетающаяся с высоким качеством поверхности реза. Легкое и сравнительно простое управление лазерным лучом позволяет осуществлять лазерную резку по сложному контуру плоских и даже объемных деталей и заготовок с высокой степенью автоматизации процесса. Все представленные особенности лазерной резки наглядно демонстрируют ее несомненные преимущества по сравнению с традиционными методами обработки. В условиях снижения серийности производства и быстрого изменения требований к изделию, т.е. тогда, когда возникает реальная потребность ориентации на гибкие автоматизированные производства, преимущества лазерной резки становятся просто неоспоримыми. Именно гибкость в производстве делает лазерную резку чрезвычайно удобной и выгодной.

Для резки металлов в России и за рубежом применяются технологические установки на основе твердотельных и газовых СО₂-лазеров, работающих как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах излучения. Следует отметить, что в сопоставлении с другими, применяемым на производстве станками, стоимость лазерного оборудования для резки достаточно высока. Но благодаря высокой производительности, точности изготавливаемых деталей, лёгкости перенастройки параметров резки под ту или иную задачу, а также возможности использования в тех областях, где традиционные подходы вызывают определенные трудности, лазерная резка является одной из самых перспективных и конкурентоспособных технологических процессов.

Конкретные примеры лазерной резки

Лазерную резку используют для изготовления мозаичных декоративных покрытий из нержавеющей стали, применяемых для облицовки мебели, а также настенных панно - лазером вырезаются необходимые мозаичные контуры. Преимущество лазерной резки в локальности воздействия излучения, что исключает нарушение цвета мозаики.

Лазерная резка применяется при вырезании отверстий в промежуточных кольцах сопла паровой турбины (хромистая нержавеющая сталь толщиной 6 мм), в которые вставляются лопатки.

Достаточно широко используется лазерная резка в автомобилестроении.

Лазерная резка - технология, посредством которой получают отверстия на поверхности трубных заготовок - трубопроводы двигателей внутреннего сгорания.

Лазером изготавливают шаблоны и сепараторы из инструментальной стали.

Экономически выгодным оказывается применение лазерной резки при производстве опытных образцов автомобилей, когда требуется изготовление деталей малыми сериями и большой номенклатуры.

Эффективным оказалось использование лазера для изготовления дисковых пил. Ножевые полотна, вырезанные лазером, реже выходят из строя, имеют более длительный срок службы и больший период времени между заточками по сравнению с полотнами, полученными механическим способом. ЗТВ, образующаяся после лазерного воздействия на кромках реза, способствует повышению стойкости зубьев пилы.

Широко используется лазерная резка в судостроении, в химической промышленности (изготовление ножей грануляторов), в производстве самолётов, космических летательных аппаратов (изготовление деталей из титановых сплавов, алюминия).

О появлении волоконных лазеров.

В качестве промышленных источников для лазерной сварки и резки долгое время использовались два основных типа лазеров – газовые СО₂ и твердотельные YAG. Вокруг этих классов лазеров и была выстроена почти вся масштабная мировая лазерная отрасль.

Основной удар отрасли был нанесен не отсутствием инвестиций или государственной поддержки (которая имела и имеет место быть во всех развитых странах), а резким падением спроса на высокотехнологичное промышленное оборудование. Уже несколько лет такой спрос опять начинает становиться заметным и поэтому производственным менеджерам нужно знать состояние современного рынка лазерного оборудования. А на рынке тем временем происходит революция. Тихая, но весьма и весьма значительная. В её результате на рынок уверенно входит самый новейший тип лазеров – волоконный, и по всем признакам следует ожидать очень серьезных, даже революционных изменений на рынке лазерных технологий. Сама технология мощных волоконных лазеров была с нуля разработана частной российской фирмой НТО «ИРЭ-Полус», которую организовал талантливый физик и одновременно талантливый менеджер – Валентин Гапонцев.

В настоящее время фирма уже превратилась в международный концерн IPG с производствами компонентов в США и сборочным производством в Германии. Рост производства и линейки продуктов волоконных лазеров настолько впечатляет, что к новым возможностям стоит внимательно присмотреться.

Особенности волоконных лазеров.

Волоконный лазер конструктивно принципиально отличается от классических лазеров. Активным элементом этого лазера является кварцевое оптическое волокно, легированное иттербием, эрбием и реже другими элементами. Накачка волоконного активного элемента осуществляется специальными лазерными диодами. Мощные волоконные лазеры поэтому представляют собой стойку с накачивающими модулями по 200 или 350 Вт светового выхода, внутри которых содержится десятки таких первичных диодов. Классического резонатора в этом лазере нет, точнее он выполнен интегральной технологией на самом оптоволоконном резонаторе, излучение выводится из лазера по оптоволоконному кабелю и так доставляется прямо к технологической головке. Про все заботы с юстировкой оптической системы пользователь вообще может забыть.

Команда Валентина Гапонцева не только разработала принципиальные решения, но и создала инфраструктуру серийного производства всех компонентов таких лазеров – лазерных диодов, активных волокон, всех узлов оптической стыковки, и т.п. Именно поэтому сейчас догнать IPG почти невозможно – повторить-то через какое-то время, наверное, можно – но, «попробуй сделать по нашей цене». Кроме того, IPG затратила просто гигантские усилия в обеспечение длительного ресурса и надежности лазера.

Из конструктивных особенностей следуют основные новые свойства:

- Полное отсутствие малоресурсных элементов, ресурс диодов накачки не менее 50000 часов, а в ближайшее время фирма установит эту цифру на уровне 100000 часов.
- Такой же общий ресурс, связанный с тем, что в лазере нет локальных энергетически высоконагруженных мест, отсюда не критичность к качеству охлаждения.
- Низковольтная конструкция, в лазере нет напряжений более 24 В

- Нет оптического тракта передачи излучения к рабочей головке, излучение передается по оптическому кабелю длиной от 10 до 200 м. Естественно, кабель надежно защищен металлорукавом.
- Высокий КПД – 22-25%, что более чем в 2 раза выше КПД CO₂-систем и в 7-10 раз выше КПД твердотельных лазеров.
- Очень высокое качество излучения, для многомодовых мощных моделей лучшее или сравнимое с качеством лучших CO₂-систем, для одномодовых качество излучения еще на порядок выше.
- Удивительная компактность лазера, особенно в сравнении с CO₂-лазерами.
- Длина волны излучения 1.07 мкм близка к волне излучения YAG-лазеров и для фокусировки может быть использована классическая стеклянная и кварцевая оптика.

Модельный ряд лазеров в настоящее время включает излучатели непрерывного режима одномодовые от 50 до 750 Вт и многомодовые от 1000 до 20000 Вт, а также импульсные лазеры для маркировки мощностью от 5 до 25 Вт.

Внешне волоконный лазер малой мощности (100-500 Вт) выполнен в виде обычного прямоугольного корпуса для установки в стойки, более мощные модели сами представляют собой одиночную или двойную стойку. Для размещения лазера 2000 Вт мощности достаточно 1 кв.м. площади. [3]

Характеристики применяемого оборудования.

Для резки образцов использовался мощный промышленный волоконный лазер ЛС-3.5.

Характеристика оборудования:

Иттербиевый волоконный лазер YLS-3500.

Основные особенности:

- Волоконный выход с высоким качеством пучка
- Высокая мощность
- Надежность, большой ресурс работы
- Компактность, прочность корпуса
- Эффективность
- Внешний интерфейс управления лазера с компьютера
- Режим управления мощностью внешним аналоговым напряжением
- Возможность быстрой модуляции выходного излучения

Применения:

- Промышленные применения
- Научные исследования

(Высокоскоростная резка малых толщин металла, резка больших толщин с использованием кислорода высокого давления, микросварка, скоростная сварка и гибридная аргодуговая сварка больших толщин металла).

Табл. 1. Оптические характеристики.

N	Характеристики	Условия измерения	Обознач.	Мин.	Тип.	Макс.	Един, изм.
1	Режим работы			Непрерывный, модулируемый			
2	Номинальная выходная мощность				3500		Вт
3	Диапазон изменения выходной мощности			10		100	%
4	Поляризация			Случайная			
5	Длина волны излучения	$P_{\text{ном}}$	λ_c	1065	1070	1075	нм
6	Ширина линии	$P_{\text{ном}}$	$\Delta\lambda$		3	6	нм
7	Время включения выходной мощности	$P_{\text{ном}}$			80	100	мкс
8	Время выключения выходной мощности	$P_{\text{ном}}$				20	мкс
9	Частота модуляции выходной мощности		f			5	кГц
10	Нестабильность выходной мощности	При фиксированной температуре окружающей среды и охлаждающей жидкости в течении 4 часов			± 1.0	± 2.0	%

Итак, основные преимущества использования данной установки:

1. Излучение имеет высокое качество.
2. Длина волны излучения хорошо поглощается сталью, следовательно для обработки нужна меньшая выходная мощность, чем, например, при использовании газового лазера.
3. Возможность модуляции излучения для получения более качественного реза
4. Высокий КПД лазера
5. Компактность.

6. Большой ресурс работы.

Недостаток: высокая стоимость оборудования, не разработаны режимы обработки материалов (оборудование новое).

Особенности модуляции излучения.

При работе с волоконным лазером имеется возможность модуляции излучения. При этом режим модуляции имеет свои особенности. Так, например, у нашего оборудования номинальная средняя мощность равна 3500 Вт. При этом максимальная мощность импульсно-модулированного излучения также равна 3500 Вт. Таким образом, при применении режима модуляции средняя мощность лазерного излучения снижается.

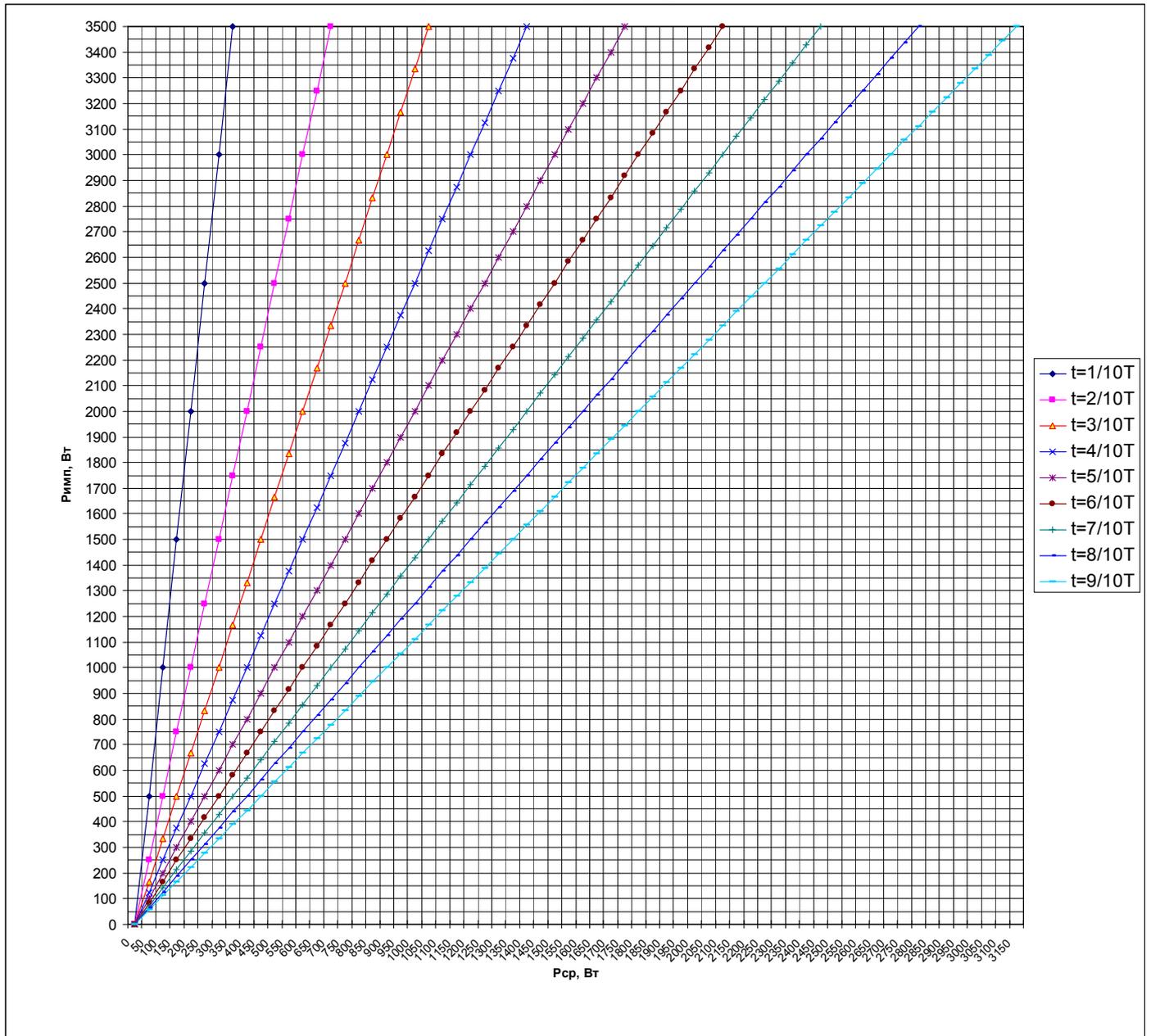
Возможны длительности импульса от одной десятой периода (1/10) до девяти десятых (9/10) периода с шагом, равным десятой периода. Частота модуляции – регулируемая, до 5 кГц, т.е. минимальный период – 0,0002 с.

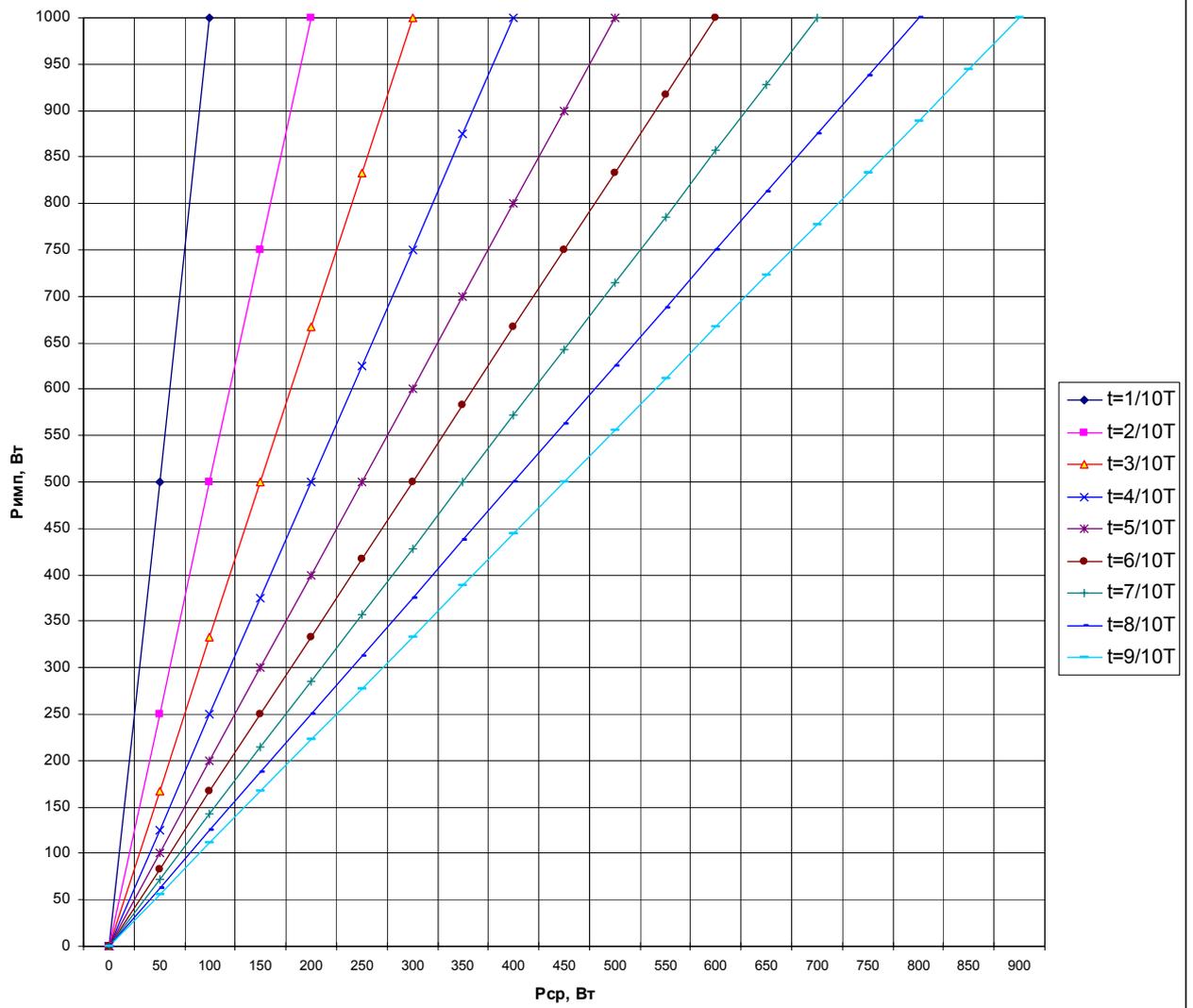
Табл. 2. Соотношение средней мощности излучения и мощности импульса при модуляции излучения.

Мощность непр., Вт	Мощность имп.-мод. излучения (Вт) при времени импульса, равном:								
	1/10T	2/10T	3/10T	4/10T	5/10T	6/10T	7/10T	8/10T	9/10T
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	500	250	167	125	100	83	71	63	56
100	1000	500	333	250	200	167	143	125	111
150	1500	750	500	375	300	250	214	188	167
200	2000	1000	667	500	400	333	286	250	222
250	2500	1250	833	625	500	417	357	313	278
300	3000	1500	1000	750	600	500	429	375	333
350	3500	1750	1167	875	700	583	500	438	389
400		2000	1333	1000	800	667	571	500	444
450		2250	1500	1125	900	750	643	563	500
500		2500	1667	1250	1000	833	714	625	556
550		2750	1833	1375	1100	917	786	688	611
600		3000	2000	1500	1200	1000	857	750	667
650		3250	2167	1625	1300	1083	929	813	722
700		3500	2333	1750	1400	1167	1000	875	778
750			2500	1875	1500	1250	1071	938	833
800			2667	2000	1600	1333	1143	1000	889
850			2833	2125	1700	1417	1214	1063	944
900			3000	2250	1800	1500	1286	1125	1000
950			3167	2375	1900	1583	1357	1188	1056
1000			3333	2500	2000	1667	1429	1250	1111
1050			3500	2625	2100	1750	1500	1313	1167
1100				2750	2200	1833	1571	1375	1222
1150				2875	2300	1917	1643	1438	1278
1200				3000	2400	2000	1714	1500	1333
1250				3125	2500	2083	1786	1563	1389
1300				3250	2600	2167	1857	1625	1444
1350				3375	2700	2250	1929	1688	1500
1400				3500	2800	2333	2000	1750	1556
1450					2900	2417	2071	1813	1611
1500					3000	2500	2143	1875	1667
1550					3100	2583	2214	1938	1722
1600					3200	2667	2286	2000	1778

1650						3300	2750	2357	2063	1833
1700						3400	2833	2429	2125	1889
1750						3500	2917	2500	2188	1944
1800							3000	2571	2250	2000
1850							3083	2643	2313	2056
1900							3167	2714	2375	2111
1950							3250	2786	2438	2167
2000							3333	2857	2500	2222
2050							3417	2929	2563	2278
2100							3500	3000	2625	2333
2150								3071	2688	2389
2200								3143	2750	2444
2250								3214	2813	2500
2300								3286	2875	2556
2350								3357	2938	2611
2400								3429	3000	2667
2450								3500	3063	2722
2500									3125	2778
2550									3188	2833
2600									3250	2889
2650									3313	2944
2700									3375	3000
2750									3438	3056
2800									3500	3111
2850										3167
2900										3222
2950										3278
3000										3333
3050										3389
3100										3444
3150										3500
3200										
3250										
3300										
3350										
3400										
3450										
3500										

Рис. 1. Соответствие мощности излучения в импульсе средней мощности.





Предварительные расчеты.

В листовом металле необходимо сделатьрезы криволинейной формы.

Так как отверстия фигурные, то для обеспечения качественного реза будем использовать импульсно-модулированное излучения.

Общий КПД процесса

$$\eta=0,3$$

Радиус и диаметр луча

$$rf=0.075 \text{ (см)}$$

$$df=0.150 \text{ (см)}$$

Теплота испарения стали 30ХГСА.

$$Li := 6070 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{г}} \right)$$

Примем теплоту процесса равной теплоте испарения

$$L_{pr} := Li$$

$$L_{pr} = 6.07 \times 10^3 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{г}} \right)$$

Коэффициент температуропроводности стали

$$a=0.07 \left(\frac{\text{см}^2}{\text{с}} \right)$$

Толщина стали

$$h=0.1 \text{ (см)}$$

Плотность стали

$$\rho := 7.85 \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$$

Частота процесса

$$f=1000 \text{ (Гц)}$$

Длительность импульса

$$\tau=3/10f$$

$$\tau=0.0003 \text{ (с)}$$

За один импульс испаряем сталь на глубину:

$$2\sqrt{a \cdot \tau} = 9.165 \times 10^{-3} \text{ (см)}$$

Количество импульсов, необходимое для резки стали данной толщины:

$$ni := \frac{h}{2\sqrt{a \cdot \tau}}$$

$$ni=11$$

Путь за один импульс:

$$s := \frac{df}{ni}$$

$$s=0.001375 \text{ (см)}$$

Получаем скорость резки

$$vr := s \cdot f$$

$$vr=1.375 \left(\frac{\text{см}}{\text{с}} \right)$$

Объем стали, испаряемый за 1 импульс

$$V_{isp} := \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r_f^2 \cdot 2 \sqrt{a \cdot \tau}$$

$$V_{isp} = 1.08 \times 10^{-6} \text{ (см}^3\text{)}$$

Масса, испаряемая за 1 импульс

$$M_{isp} := V_{isp} \cdot \rho$$

$$M_{isp} = 8.476 \times 10^{-6} \text{ (г)}$$

Энергия в импульсе

$$W_i := \frac{(L_{pr} \cdot M_{isp})}{\eta}$$

$$W_i = 0.051 \text{ (Дж)}$$

Мощность импульса

$$P_i := \frac{W_i}{\tau}$$

$$P_i = 572 \text{ (Вт)} \quad (\text{без учета КПД})$$

Средняя мощность

$$P := W_i \cdot f$$

$$P = 172 \text{ (Вт)}$$

Плотность мощности излучения

$$q := \frac{P \cdot \eta}{\pi r_f^2}$$

$$q = 9.7 \times 10^5 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \right)$$

Сравним с q_3 :

$$q_3 := \rho \cdot L_i \cdot \sqrt{\frac{a}{\tau}}$$

$$q_3 = 7.3 \times 10^5 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \right)$$

$$q > q_3$$

Коэффициент перекрытия

$$K_p := \frac{2r_f - s}{2r_f} \quad K_p = 0.905$$

Шероховатость

$$R_z := r_f \cdot \left[1 - \sqrt{1 - (1 - K_p)^2} \right] \quad R_z = 3 \times 10^{-5} \text{ (см)}$$

[1, 2]

Полученные результаты.

Испытания проводились с применением импульсно-модулированного излучения частотой 1000 Гц.

Рабочий газ – воздух

Давление рабочего газа – 6 атм.

Фокусное расстояние – 150 мм

Заглубление фокуса – 0,5 мм

Было получено 20 образцов. Результаты представлены в таблицах ниже.

Табл. 3. Полученные результаты.

№	Импульс / пауза	Мощность	Скорость, мм/с	Ширина реза (75=1мм)	ЗТВ (75=1мм)	Грат (75=1мм)
1	1 / 9	100%	34	24	19	7
2	1 / 9	100%	40	18	12	8
3	2 / 8	80%	34	24	20	10
4	2 / 8	80%	40	24	20	12
5	2 / 8	80%	51	25	17	5
6	2 / 8	70%	51	23	16	6
7	2 / 8	70%	40	20	20	9
8	2 / 8	60%	40	20	18	10
9	2 / 8	50%	40	19	17	6
10	2 / 8	55%	40	18	15	8
11	2 / 8	55%	34	22	20	15
12	2 / 8	50%	34	19	16	8
13	2 / 8	45%	34	18	15	7
14	3 / 7	40%	34	23	13	3
15	3 / 7	35%	34	19	10	2
16	3 / 7	33%	34	14	12	7
17	3 / 7	37%	34	19	18	16
18	5 / 5	30%	34	22	15	8
19	5 / 5	25%	34	20	16	4
20	5 / 5	23%	34	14	15	4

Табл. 4. Обработка результатов.

№	Мощность импульса	Средняя мощность	Скорость, м/мин	Ширина реза, мкм	ЗТВ, мкм	Грат, мкм
1	3500	350	2,04	320	253	93
2	3500	350	2,4	240	160	107
3	2800	560	2,04	320	267	133
4	2800	560	2,4	320	267	160
5	2800	560	3,06	333	227	67
6	2450	490	3,06	307	213	80

7	2450	490	2,4	267	267	120
8	2100	420	2,4	267	240	133
9	1750	350	2,4	253	227	80
10	1925	385	2,4	240	200	107
11	1925	385	2,04	293	267	200
12	1750	350	2,04	253	213	107
13	1575	315	2,04	240	200	93
14	1400	420	2,04	307	173	40
15	1225	367,5	2,04	253	133	27
16	1155	346,5	2,04	187	160	93
17	1295	388,5	2,04	253	240	213
18	1050	525	2,04	293	200	107
19	875	437,5	2,04	267	213	53
20	805	402,5	2,04	187	200	53

Таким образом, наилучшие результаты были получены:

- 1) При уровне мощности 35% и длительности импульса $t_{имп}=3/10T$ ($R_{имп}=1225$ Вт, $R_{ср}=367,5$ Вт)
- 2) При уровне мощности 33% и длительности импульса $t_{имп}=3/10T$ ($R_{имп}=1155$ Вт, $R_{ср}=346,5$ Вт)
- 3) При уровне мощности 23% и длительности импульса $t_{имп}=5/10T$ ($R_{имп}=805$ Вт, $R_{ср}=402,5$ Вт)

Полученные зависимости от мощности модулированного излучения и скорости резки.

Рис. 2. Зависимость ширины реза от мощности импульса и скорости резки.

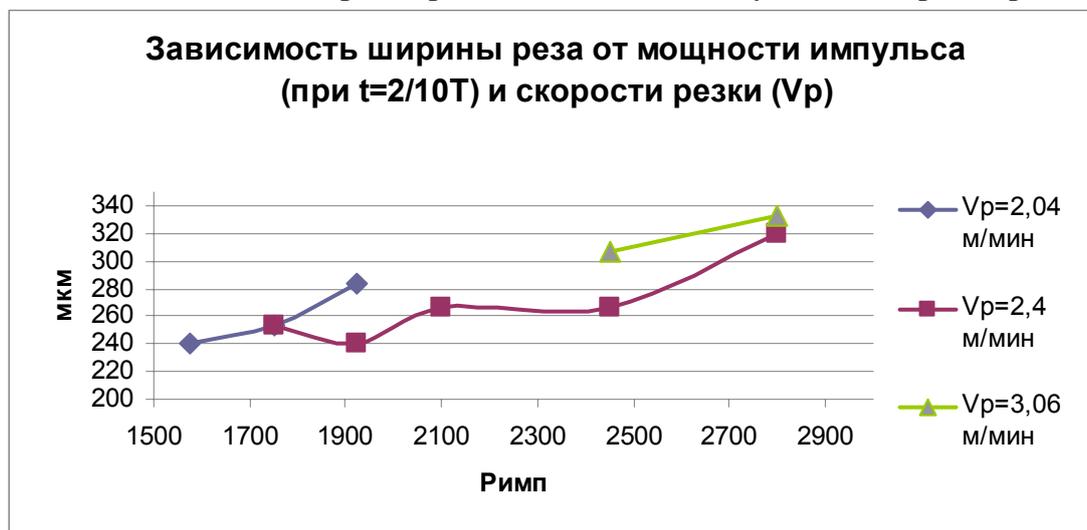


Рис. 3. Зависимость ЗТВ от мощности импульса и скорости резки.

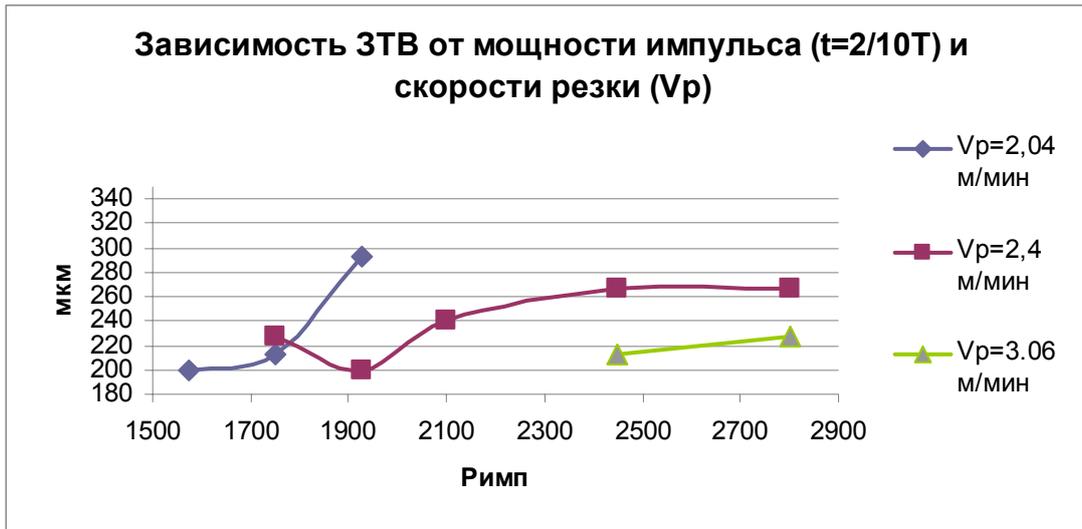
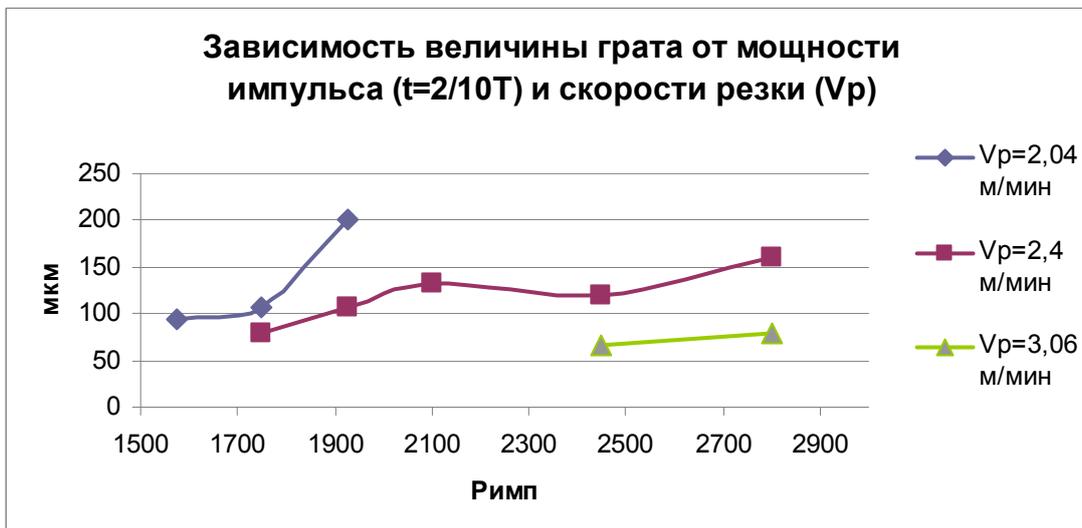


Рис. 4. Зависимость грата от мощности импульса и скорости резки.



Полученные зависимости от мощности модулированного излучения и длительности импульса.

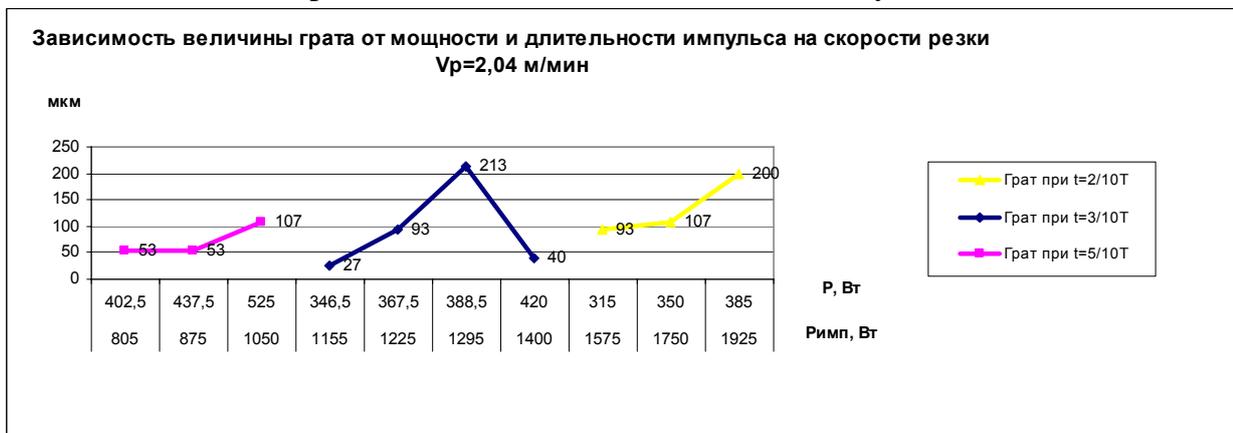
Рис. 5. Зависимость ширины реза от мощности и длительности импульса



Рис. 6. Зависимость ЗТВ от мощности и длительности импульса.



Рис. 7. Зависимость грата от мощности и длительности импульса.



Внешний вид образцов.

В результате испытаний были получены образцы и разным качеством реза.

Рис. 8. Внешний вид образцов.



Рис.10. Внешний вид образцов (2).



Рис. 11. Образец с наилучшим качеством реза (№15). Вид с внешней стороны.



Рис. 12. Образец с наилучшим качеством реза (№15). Вид с обратной стороны.



Рис. 13. Внешний вид реза с обратной стороны. Образец №15 (увеличение в 20 раз)



Рис. 14. Внешний вид реза с обратной стороны. Образец №18 (увеличение в 20 раз)



Рис. 15. Внешний вид реза (заметна бороздчатая структура реза).

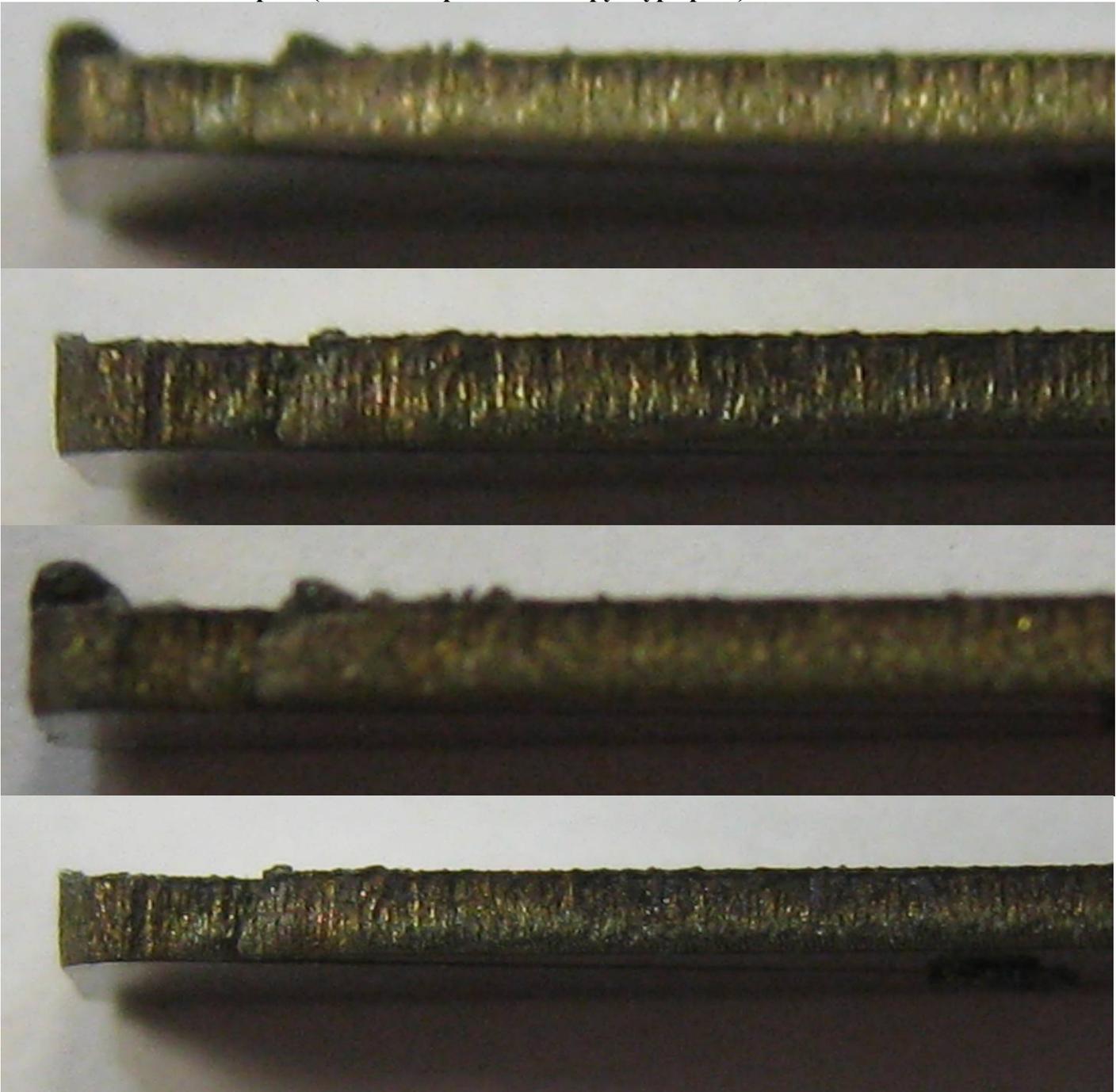


Рис. 16. Большой грат. Образец №18.

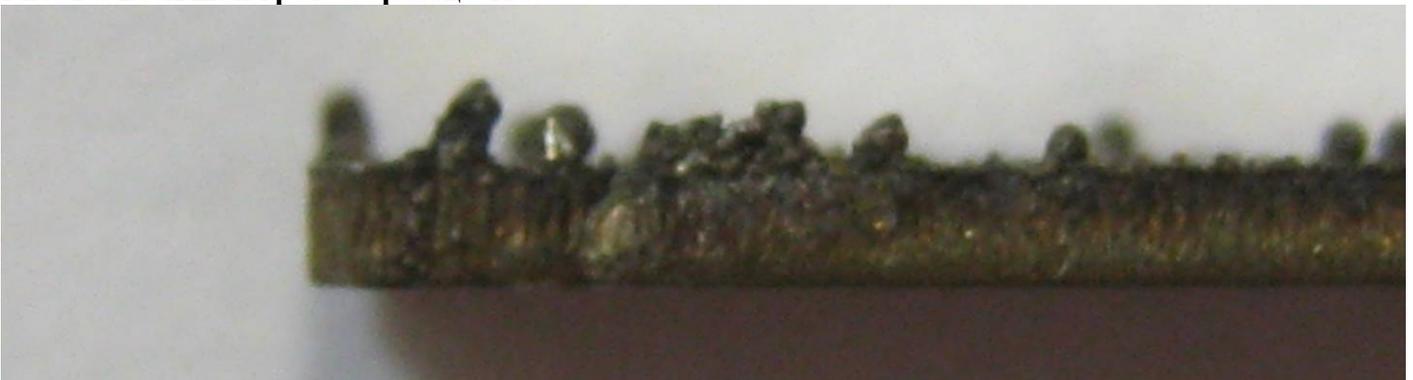


Рис. 17. Большой грат. Образец № 11



ЛИТЕРАТУРА.

1. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 7.
Лазерная резка металлов: Учеб. пособие для вузов/ А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов; Под ред. А. Г. Григорьянца. — М.: Высш. шк., 1988. — 127 с
2. Федоров Б.М. Лекции по курсу «Технология лазерной обработки».
3. К.т.н. Скрипченко А. И., К.т.н. Смирнов Н.В. Новая «лазерная» революция и её перспективы