

УДК 621.373.826

Исследование режимов лазерной абляции в ультракоротком диапазоне длительностей импульсов

Родимкин Никита Игоревич rodimkinni@student.bmstu.ru

Александров Андрей Романович aleksandrovar@bmstu.ru

Шупенев Александр Евгеньевич ash@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрено влияние длительности импульса лазера на общее качество обработки материалов. Представлены риски, связанные с использованием импульсов большей длительности, приводящие к термическому повреждению и ухудшению функциональных свойств обрабатываемых поверхностей. Показаны преимущества и потенциальные возможности применения импульсов в фемтосекундном и пикосекундном диапазонах, нацеленные на достижение высокого качества реза и минимальной зоны термического влияния. С учетом специфики взаимодействия лазерного излучения различной длительности с материалом сделан вывод о необходимости тщательного выбора данного параметра для обеспечения прецизионности обработки и снижения нежелательных эффектов.

Ключевые слова: лазерное излучение, абляция, фемтосекундное излучение, пикосекундное излучение

Investigation of laser ablation modes in an ultrashort pulse duration range

Rodimkin Nikita Igorevich

rodimkinni@student.bmstu.ru

Alexandrov Andrey Romanovich

aleksandrovar@bmstu.ru

Shupenev Alexander Evgenievich

ash@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The influence of the laser pulse duration on the overall quality of material processing is considered. The risks associated with the use of pulses of longer duration, leading to thermal damage and deterioration of the functional properties of the treated surfaces, are presented. The advantages and potential possibilities of using pulses in the femtosecond and picosecond ranges are shown, aimed at achieving high cutting quality and a minimum zone of thermal influence. Taking into account the specifics of the interaction of laser radiation of various durations with the material, it is concluded that careful selection of this parameter is necessary to ensure precision processing and reduce undesirable effects.

Keywords: laser radiation, ablation, femtosecond radiation, picosecond radiation

Введение. Развитие современных технологий лазерной обработки материалов напрямую связано с совершенствованием источников излучения и возможностью гибко управлять параметрами импульсов. Среди них одним из

наиболее значимых факторов, определяющих механизм взаимодействия лазерного излучения с веществом, является длительность импульса. При переходе от микросекундного к пикосекундному и фемтосекундному диапазонам изменяются как характер абляции, так и степень термического воздействия на материал. В условиях импульсов сверхкороткой длительности доминируют адиабатические процессы, когда энергия успевает локализоваться в электронных подсистемах до релаксации на фононные колебания, что открывает возможности для «холодной» абляции с минимизацией зоны термического влияния (ЗТВ) [1, 2].

Использование импульсов микросекундного диапазона сопровождается выраженными тепловыми эффектами, приводящими к плавлению, образованию оксидных пленок, повышенной шероховатости и развитию термически индуцированных дефектов. В противоположность этому, фемтосекундные импульсы обеспечивают высокую пространственную селективность, минимизируют перегрев и позволяют достигать субмикронного качества обработки, что критически важно для медицины, микроэлектроники и аэрокосмической техники [3]. Пикосекундный диапазон рассматривается как компромиссное решение: он сочетает относительно высокую производительность обработки с допустимым уровнем теплового влияния, что делает его перспективным для промышленного внедрения.

Несмотря на значительный объем работ в области ультракороткоимпульсной лазерной обработки, открытым остается вопрос о границах перехода между «чистой» абляцией и термически обусловленными процессами. Особый интерес представляет сравнение воздействия импульсов длительностью порядка 250 фс и 10 пс, при которых изменяется не только механизм взаимодействия, но и итоговые показатели качества реза, шероховатости и величины ЗТВ.

Целью работы является сравнительный анализ влияния длительности импульса в диапазоне 250 фс – 10 пс на качество обработки металлических материалов. В качестве ключевых параметров оценки рассматривались: ширина реза, величина зоны термического влияния и параметры микрорельефа поверхности. Полученные результаты позволят уточнить закономерности перехода от «холодной» абляции к термозависимым процессам, а также сформировать рекомендации по выбору оптимальных режимов обработки для различных классов конструкционных и функциональных материалов.

Материалы и методы. В качестве основного материала для исследования процессов сверхкороткоимпульсной лазерной обработки была выбрана нержавеющая сталь марки AISI 304 с химическим составом (мас. %): Fe — основа, C — 0,08, Cr — 18, Ni — 10, Si — 0,8, Ti — 0,5, Cu — 0,5, прочие примеси — 1,12. Данный материал является одним из наиболее распространенных в машиностроении и медицине благодаря сочетанию высокой коррозионной стойкости, прочности, пластичности и стабильности физико-механических свойств. Эти характеристики делают AISI 304 репрезентативным объектом для изучения фундаментальных закономерностей взаимодействия лазерного излучения с металлическими материалами.

Выбор AISI 304 также обусловлен возможностью переноса полученных закономерностей на другие технологически значимые материалы — в частности, сплавы на основе никелида титана (нитинол), используемые в медицинской имплантологии, и кобальт-хромовые сплавы, востребованные в стоматологии и аэрокосмической отрасли. Такой подход обеспечивает универсальность методологии и адаптируемость результатов для материалов с различными термофизическими свойствами и чувствительностью к лазерному воздействию.

Эксперименты проводились на фемтосекундной лазерной установке Avesta TETA-10 (максимальная мощность 10 Вт, длина волны 1064 нм) с возможностью изменения длительности импульсов от 250 фс до 10 пс (рис. 1, а). Фокусировка излучения осуществлялась линзой с фокусным расстоянием 60 мм. Подача образцов выполнялась прецизионным позиционером с осью вращения и линейным приводом, что обеспечивало высокую повторяемость результатов без использования сканатора (рис. 1, б).

В ходе экспериментов варьировались следующие ключевые параметры лазерной обработки: длительность импульса (250 фс – 10 пс), энергия импульса (40–80 мкДж). Остальные параметры, включая фокусное расстояние, геометрию экспозиции и траекторию перемещения образца, оставались неизменными. Такой подход обеспечил сопоставимость результатов и позволил выделить именно влияние длительности импульса на характеристики обработки.

Качество обработки оценивалось по двум основным критериям:

- ширина реза с учетом дефектов, определяемая оптической микроскопией (h);
- визуальная оценка зоны реза на наличие видимых в микроскоп дефектов;

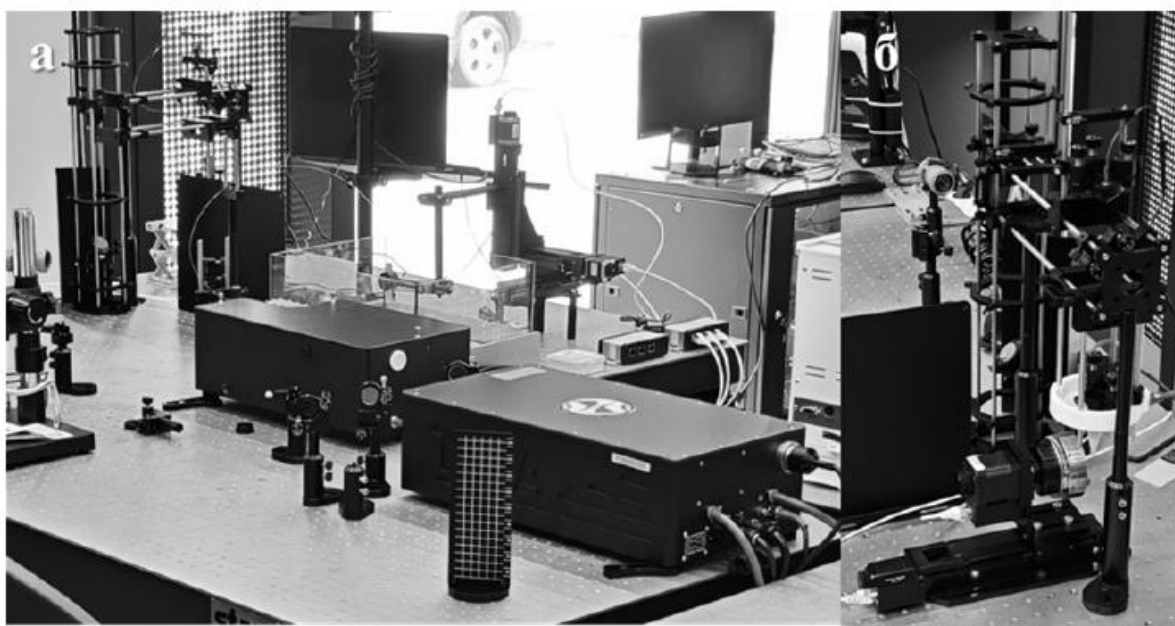


Рис. 1. Лазерный комплекс:

а — фемтосекундный усилитель TETA-10, б — прецизионный позиционер

Результаты. В рамках исследования был реализован план эксперимента с варьированием двух ключевых параметров лазерной обработки: длительности импульса (250 фс – 10 пс) и энергии импульса (40–80 мкДж). Остальные условия (фокусное расстояние 60 мм, частота следования импульсов 50 кГц, скорость 2,5 мм/с и 1 проход) оставались постоянными, что обеспечивало сопоставимость полученных данных. Полный перечень режимов представлен в таблице.

План эксперимента

№	Е, мкДж	t, фс	P, Вт	F, кГц	I, ТВт/см ²	h, мкм
1	40	254	2	50	8,02	83
2	80	254	4	50	16,04	126
3	40	404	2	50	5,04	91
4	80	404	4	50	10,08	133
5	40	554	2	50	3,68	102
6	80	554	4	50	7,39	148
7	40	834	2	50	2,44	108
8	80	834	4	50	4,88	154
9	40	4654	2	50	0,438	137
10	80	4654	4	50	0,876	162
11	40	7254	2	50	0,281	–160
12	80	7254	4	50	0,562	177
13	40	10054	2	50	0,203	174
14	80	10054	4	50	0,406	197

Результаты эксперимента показали ряд устойчивых закономерностей:

Экспериментально установлено, что минимальная зона термического влияния (ЗТВ) наблюдается при длительностях импульса 250–400 фс. Для импульсов 250 фс и энергии 40 мкДж ширина ЗТВ составляла ~83 мкм. Увеличение энергии до 80 мкДж вызывало умеренный рост ЗТВ до 126 мкм.

В диапазоне 800–1000 фс ширина ЗТВ возрастала в 1,5 раза (108–154 мкм) с появлением признаков оплавления и микротрещин. При дальнейшем увеличении длительности до 4–10 пс наблюдался значительный рост ЗТВ (174–197 мкм) с ухудшением однородности реза.

Повышение энергии импульса во всех режимах приводило к расширению ЗТВ, причем наиболее выраженный эффект наблюдался при длительностях свыше 1 пс.

Обсуждение. В ходе эксперимента исследовали влияние длительности и энергии лазерного импульса на процесс абляции. Основной акцент сделан на изучение зависимости характеристик обработки от длительности импульса, а варьирование энергии позволило нагляднее оценить изменение ширины реза и эффективности удаления материала.

Теоретические расчеты плотности мощности (1), выполненные для фиксированного диаметра пятна (50 мкм), подтвердили ожидаемую обратную зависимость между длительностью импульса и пиковой интенсивностью излучения. С увеличением длительности импульса от фемтосекундного до пикосекундного диапазона наблюдалось закономерное снижение плотности мощности, что, согласно классическим представлениям, должно было привести к уменьшению эффективности абляции и росту теплового воздействия на материал:

$$I = \frac{E}{t \cdot S}. \quad (1)$$

Однако на практике была выявлена нелинейная зависимость скорости удаления материала от длительности импульса. Несмотря на более низкую пиковую плотность мощности, пикосекундные импульсы демонстрировали более высокую производительность абляции по сравнению с фемтосекундными. Это проявлялось в увеличении скорости обработки и более интенсивном удалении материала с поверхности заготовки.

Анализ микрофотографий (рис. 2, 3) выявил четкую закономерность: с ростом длительности импульса закономерно увеличиваются ширина реза и зона термического влияния (ЗТВ). Это наблюдение справедливо для обеих исследуемых энергий — 40 и 80 мкДж.

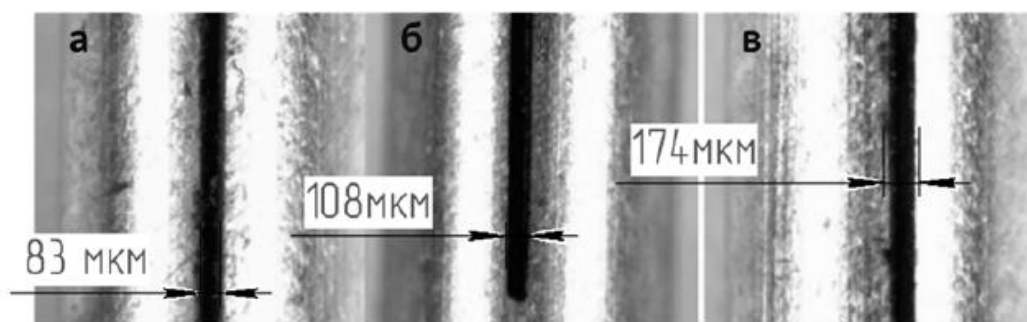


Рис. 2. Влияние длительности импульса на ширину реза при энергии импульса 40 мкДж:
а — 254 фс, б — 834 фс, в — 10 пс

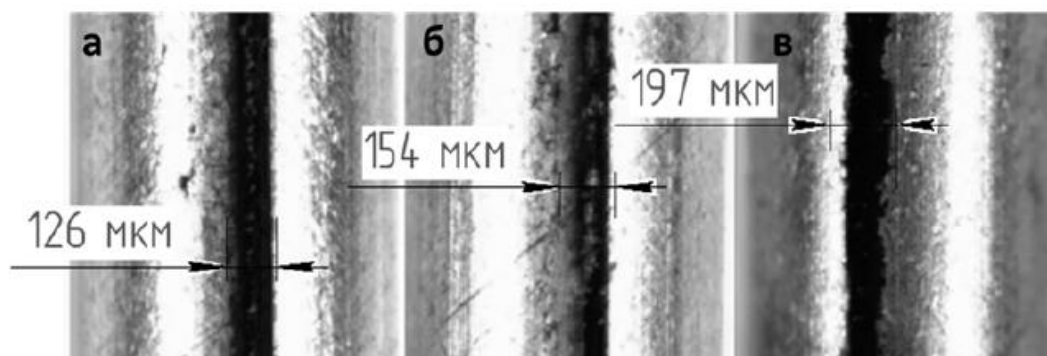


Рис. 3. Влияние длительности импульса на ширину реза при энергии импульса 80 мкДж:
а — 254 фс, б — 834 фс, в — 10 пс

Заключение. Исследования показали, что увеличение длительности импульса снижает пиковую мощность и переводит процесс абляции из «холодного» в термический режим. Наблюдались нечеткие края, оплавление и грат. Рост энергии до 80 мкДж расширял зоны термического влияния. Минимальная длительность импульса обеспечивает высокое качество обработки с точной геометрией. Результаты применимы для оптимизации режимов лазерной микрообработки.

Список источников

- [1] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. *Технологические процессы лазерной обработки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 663 с.
- [2] Chichkov B.N., Momma C., Nolte S., von Alvensleben F., Tünnermann A. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 1996, vol. 63 (2), pp. 109–115.
- [3] Gattass R.R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials. *Nature Photonics*, 2008, vol. 2 (4), pp. 219–225.