

УДК 53.096

Исследование влияния параметров лазерного излучения СО₂-лазера на резку и гравировку полимеров

Евгений Васильевич Грошев, Артем Владимирович Кришталь

*Студенты 5 курса,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Голубенко Ю.В.
кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в
машиностроении».*

Введение

Лазерная резка и гравировка полимеров (оргстекла, полистирола, поликарбоната и т.п.) неотъемлемый процесс в производстве наружной рекламы, POS материалов, сувенирной продукции, художественно-прикладном искусстве (создание макетов). С приходом лазерных технологий стали доступны технологии совмещения и компоновки материалов, требующие высокой точности раскроя.

Неармированные полимерные материалы - это высокомолекулярные вещества, молекулы которых (микромолекулы) состоят из большого числа повторяющихся группировок, или молярных звеньев, соединенных между собой химическими связями. Число звеньев характеризует степень полимеризации. Полимеры могут иметь как естественное (целлюлоза, натуральный каучук), так и искусственное (полиэтилен, полистирол, полиамиды и др.) происхождение.

Добавки, которые вводят в смеси при изготовлении полимеров, служат для придания им свойств, которыми должны обладать готовые изделия, или для облегчения их переработки. Они могут выполнять роль наполнителей, вспенивающих агентов, пластификаторов, стабилизаторов, красителей, смазок и т.д. В качестве добавок используют вещества, имеющие полимерную или мономерную природу и находящиеся в твердом, жидком или газообразном состоянии. Свойства полимеров – прочность, теплостойкость, твердость, теплопроводность и т.д. – зависят от химического строения элементарных звеньев, величины структуры и формы макромолекул, а также от молекулярной организации. На процесс разрушения полимерных материалов теплофизические свойства оказывают большое влияние.

Свойства полимеров в значительной степени определяются и составом основной полимерной цепи, которая может быть построена только из углеродных атомов (карбоцепные полимеры) или может содержать помимо углерода атомы кислорода, серы, азота (гетероцепные полимеры), атомы кремния, титана, алюминия, никеля, бора (элементоорганические полимеры). Одним из представителей полимеров являются акриловые пластики (полиметилакрилат и т.п.).

Наряду с традиционными методами обработки полимеров и неметаллических композиционных материалов используется лазерная обработка – лазерная резка и гравировка. В основе лазерной обработки лежит термическое воздействие на материал поглощенного лазерного излучения. При падении лазерного излучения на материал

Эффективность использования энергии лазерного пучка зависит от свойств поверхности материала, в частности от коэффициента отражения. Коэффициент отражения представляет собой отношение интенсивности отраженной световой волны к интенсивности падающего лазерного пучка и определяется оптическими характеристиками материала и состоянием поверхности. На практике часто пользуются термином коэффициент поглощения, который характеризует поглощение материалом излучения с определенной длиной волны. Коэффициент поглощения полимеров для ИК – излучения (5-15 мкм) лежит в пределах 0,98 – 0,86, а для видимого и ближнего ИК диапазона (~ 1 мкм) эти значения ниже. В отличие от металлов, в которых поглощение излучения происходит у поверхности в слое толщиной порядка 10^{-9} м, толщина поглощающего слоя у полимерных материалов гораздо больше, т.е. во многих случаях лазерный нагрев можно считать объемным. Механизмы поглощения излучения в полимерах достаточно сложны и могут существенно отличаться в разных спектральных диапазонах. Процессы разрушения полимеров под лазерным излучением имеют отличительные особенности, по сравнению с металлами. Кинетика и механизм лазерного разрушения полимерных материалов зависят от их строения и сильно различаются, что создает определенные сложности в обобщении фактов процесса разрушения полимеров. Это обстоятельство затрудняет определить параметры лазерной резки полимера расчетным путем. Только накопленные экспериментальные данные позволяют с некоторой точностью выбирать параметры лазерной резки для получения качественного реза и гравировки [1].

Резка полимеров.

"Классическим" материалом для лазерной резки является акрил. Пожалуй, лучше всех остальных материалов отвечает требованиям лазерной обработки. Связано это в основном с тем, что при лазерном воздействии практически отсутствует плавление материала, в основном идет испарение и удаление паров сжатым воздухом, который подается в зону обработки. Заметное оплавление поверхности реза происходит только при небольшой скорости резки и минимальной подаче воздуха - главное не допустить возгорания материала. Поверхность реза имеет характерную шероховатость в виде волнистой линии (рис.1), это обуславливается физикой процесса лазерной резки в данном режиме.

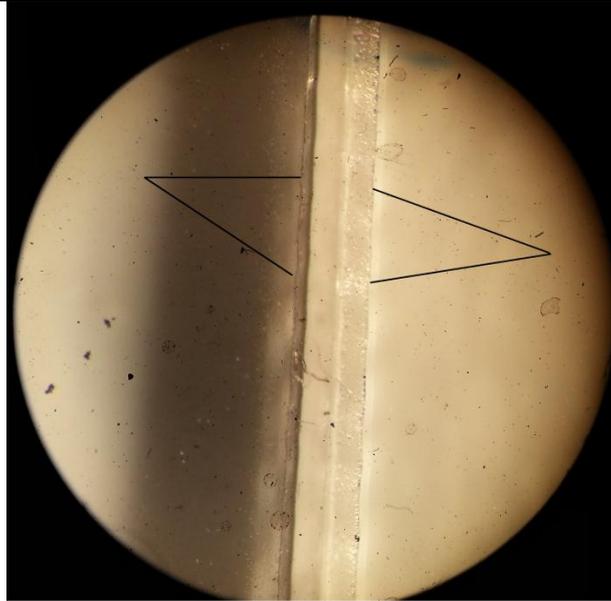


Рис. 1 Рез акрила (увеличение 8х)

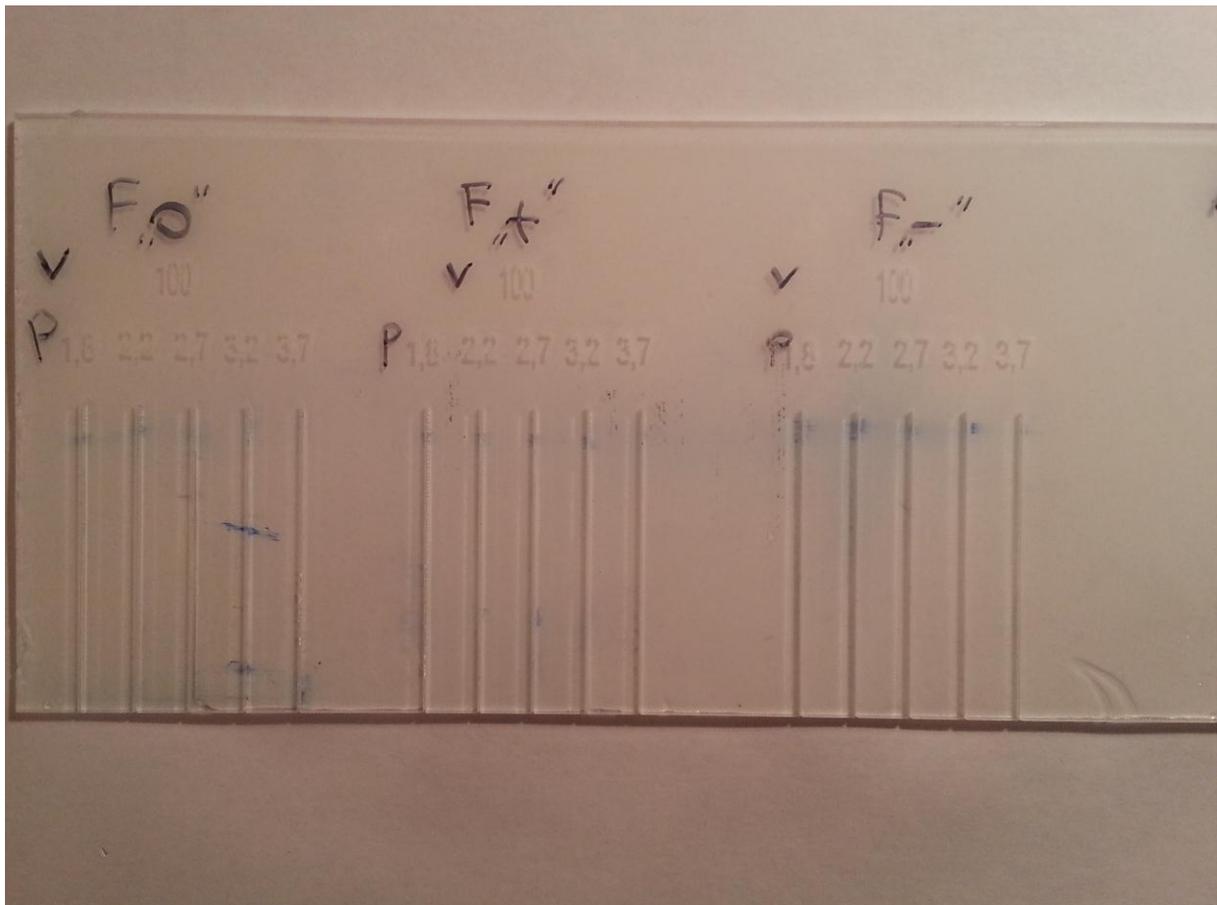


Рис.2 Резка акрила



Рис.3 Рез пластика Satins с обратной стороны (увеличение 8х)

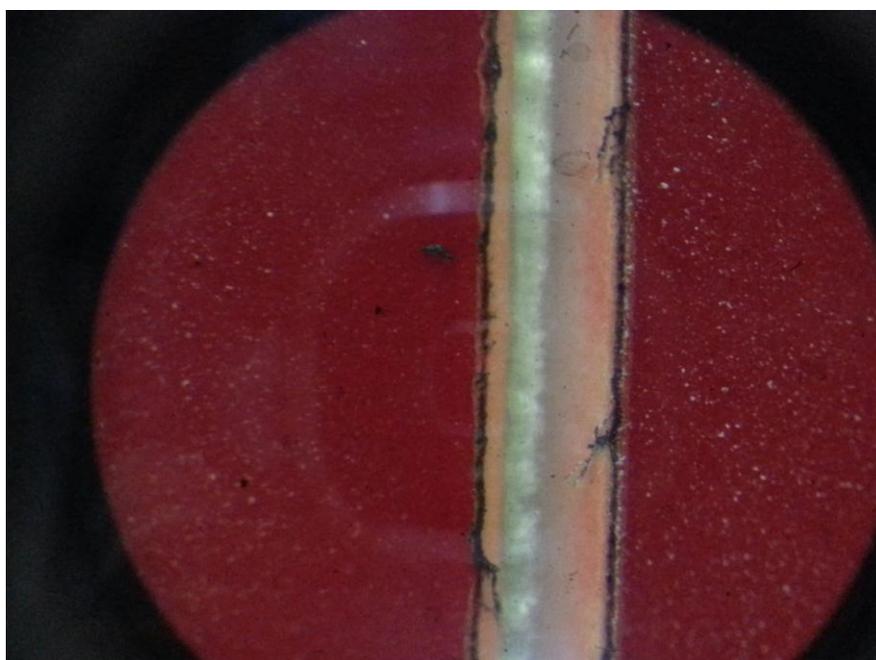


Рис.4 Рез пластика Textures (увеличение 8х)

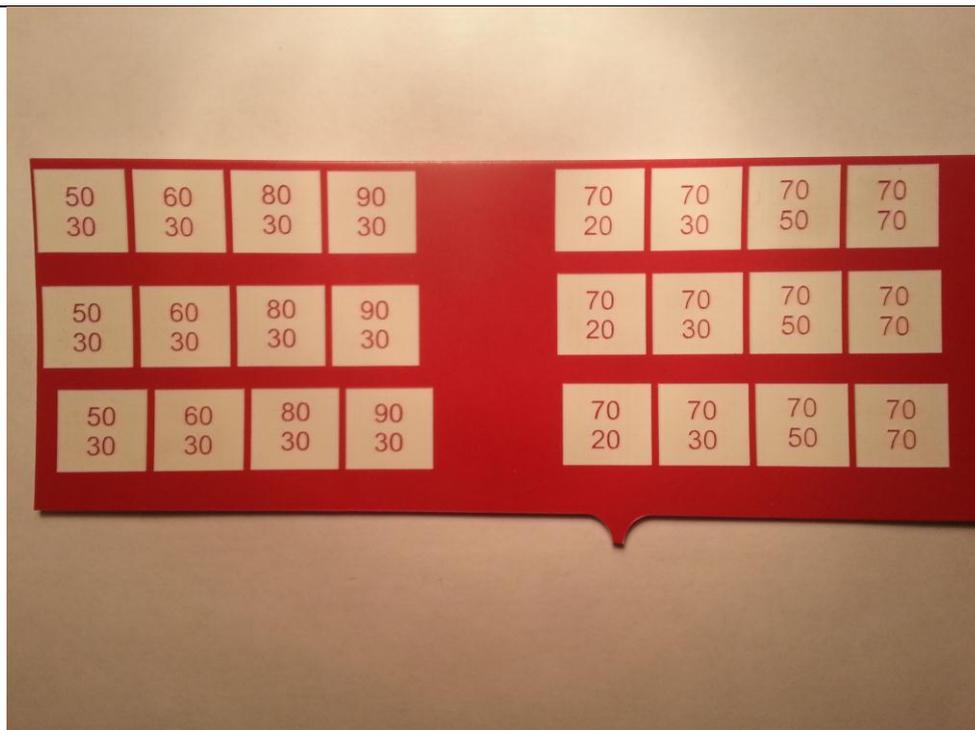


Рис.5 Гравировка пластика LaserMax

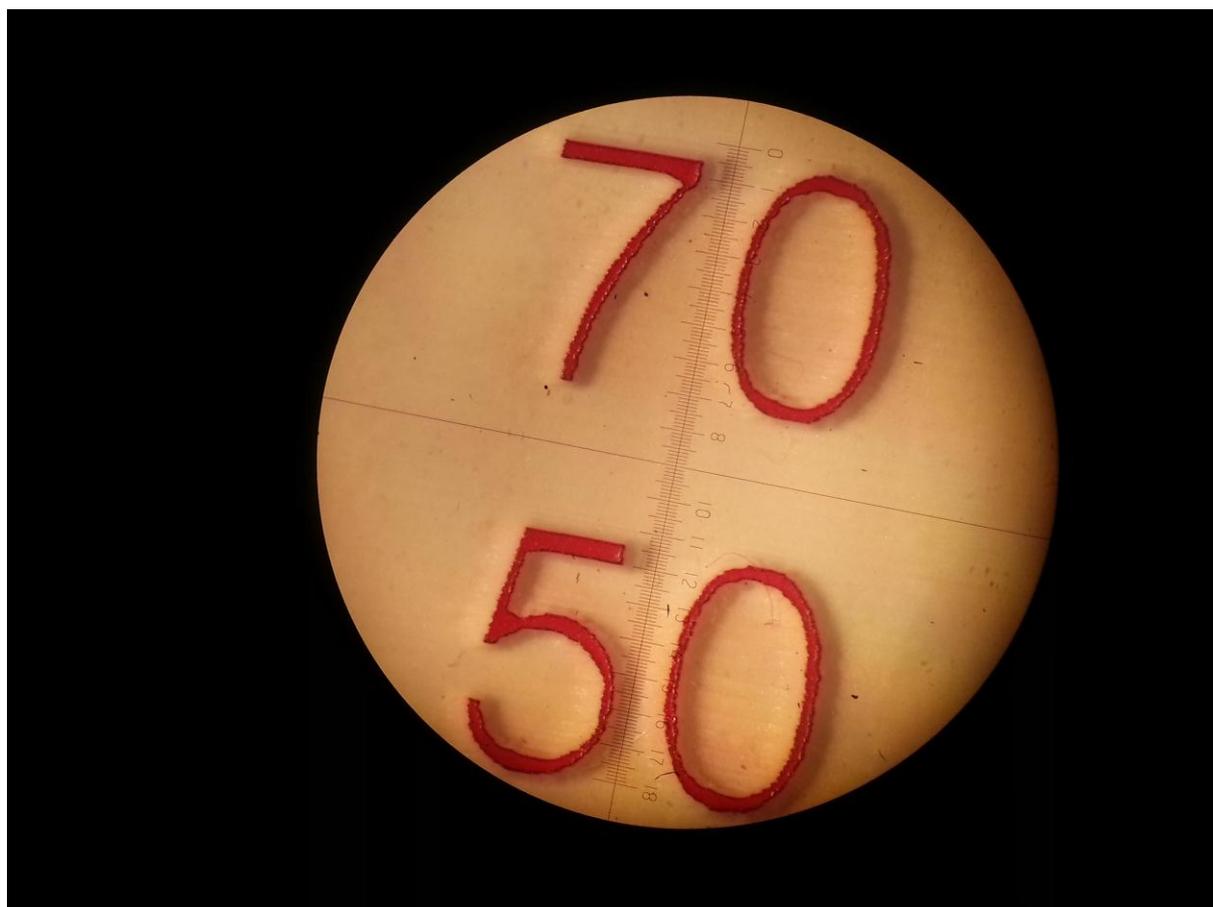


Рис.6 Гравировка пластика LaserMax (увеличение 8х)

Таблица 1. Химический состав используемых полимеров

Акрил	Textures	Outdoor	LaserMax	Satins
Полиметилметакрилат (ПММА) – 100 %	Полиэтилакрилат + полиметилметакрилат (ПММА) – 50-54 %	Полиэтилакрилат + полиметилметакрилат (ПММА) – 50-54 %	Полиэтилакрилат + полиметилметакрилат (ПММА) – 50-54 %	АБС (Акрилонитрил-бутадиенстирол) – 90-95%
-	Сополимер акрил – стирол – 35 – 50 %	Сополимер акрил – стирол – 35 – 50 %	Сополимер акрил – стирол – 35 – 50 %	Диоксид титана – 0-4 %
-	Этилакрилат <0.1	Этилакрилат <0.1	Этилакрилат <0.1	Сульфат Бария – 0-2 %
-	Метилметакрилат <0.5	Метилметакрилат <0.5	Метилметакрилат <0.5	
-	-	-	Алюминиевые хлопья (1-5 %) Технический углерод (1-5 %) Бронза (1-5 %)	Минеральное масло 0-2 % Воск 0-2 %

Верхний слой – это добавки от 0-10 % (бронза, диоксид титана, сульфат бария и т.д.). Основа – в зависимости от вида пластика, это может быть: акрил, АБС, сополимер акрил – стирол, полиэтилакрилат и т.д. (смотри табл. 1).

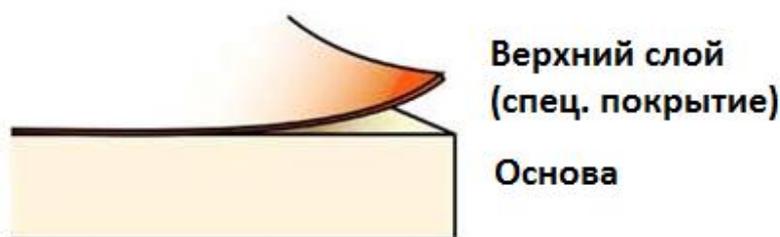


Рис. 7 Структура пластика

При исследовании влияния лазерной обработки, необходимо учесть такой параметр как теплопроводность. Под теплопроводностью понимают способность тел переносить тепло от более нагретых элементов к менее нагретым. Количественно теплопроводность характеризуется коэффициентом теплопроводности, являющимся коэффициентом пропорциональности в выражении, связывающим тепловой поток (q) с градиентом температуры: $q = -\tau \cdot \text{grad } T$.

Обычно теплопроводность полимеров невысока. Величина τ в среднем составляет 0,1 - 0,5 Вт/м·К и зависит от температуры, химического строения и физического состояния материала. Это обусловлено тем, что передача тепла в полимерах происходит по фонному механизму. Фононы в образце возникают при

тепловых колебаниях частиц и рассеиваются при взаимодействии друг с другом или с дефектами структуры. Процессы возникновения, распространения и рассеивания фононов в полимерах осложняются кооперативным характером движений атомов и групп атомов в макромолекулах и в общем случае существенно дефектами структуры полимерных материалов. Низкая же теплопроводность может привести к сильным локальным перегревам в материале в экстремальных условиях эксплуатации и к разрушению образцов.

Часто бывает необходимо повысить теплопроводность полимерного материала, сохранив его высокие электроизоляционные характеристики. В этом случае в качестве наполнителей выбирают диэлектрики с высоким коэффициентом теплопроводности - соединения типа оксидов, нитридов, карбидов металлов и т. д. Теплопроводность этих соединений обусловлена, как и в полимерах, фононным взаимодействием, однако ограничения, присущие полимерным материалам, в них отсутствуют [2].

Таблица 2. Коэффициент теплопроводности некоторых полимеров [3]

Полимер	Теплопроводность, Вт/м·К
Акрил (ПММА)	0.19
АБС	0.12
ММА	0.2
Полиэтилакрилат	0.213

Экспериментальная часть.

Резка пластика

I. Резка производилась при изменении следующих параметров:

- Скорость
- Фокус

1. $F=0$ мм – фокус, $P=25$ Вт = const – мощность, V – скорость резки м/с, изменяемый параметр. Толщина материала 1.6 мм.

Диапазон изменения скорости – [0.027..0.054] м/с.

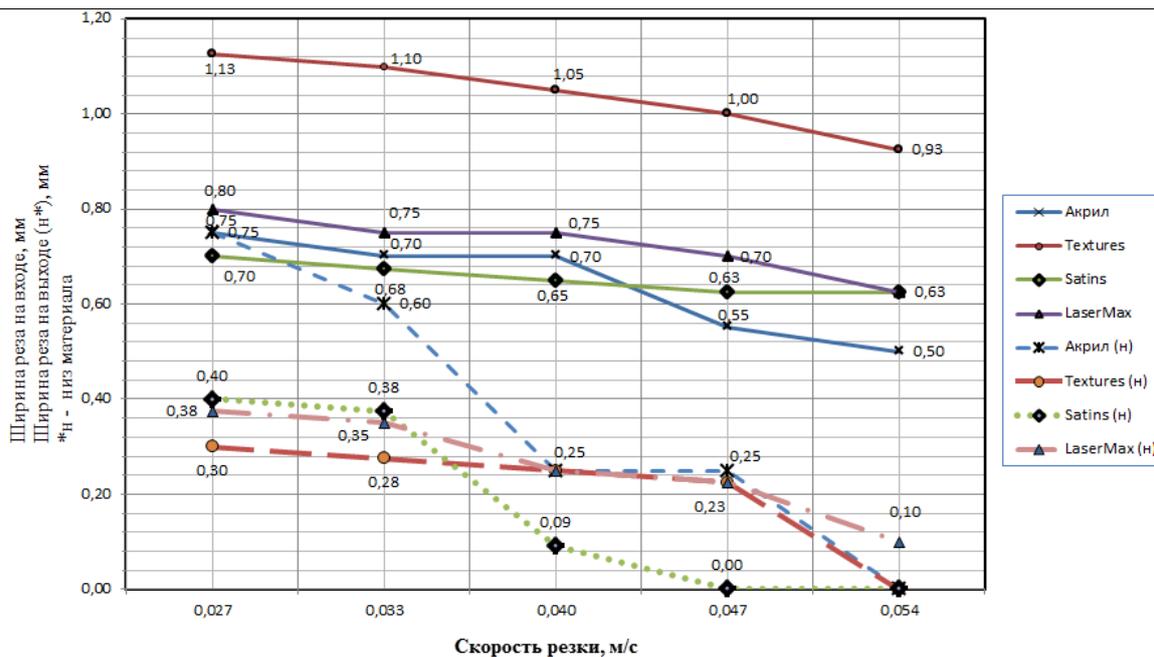


График 1. Изменение ширины реза пластиков в зависимости от скорости резки

2. $F = +0.5$ мм – фокус, $P = 7.5$ Вт = const – мощность, V – скорость резки м/с, изменяемый параметр

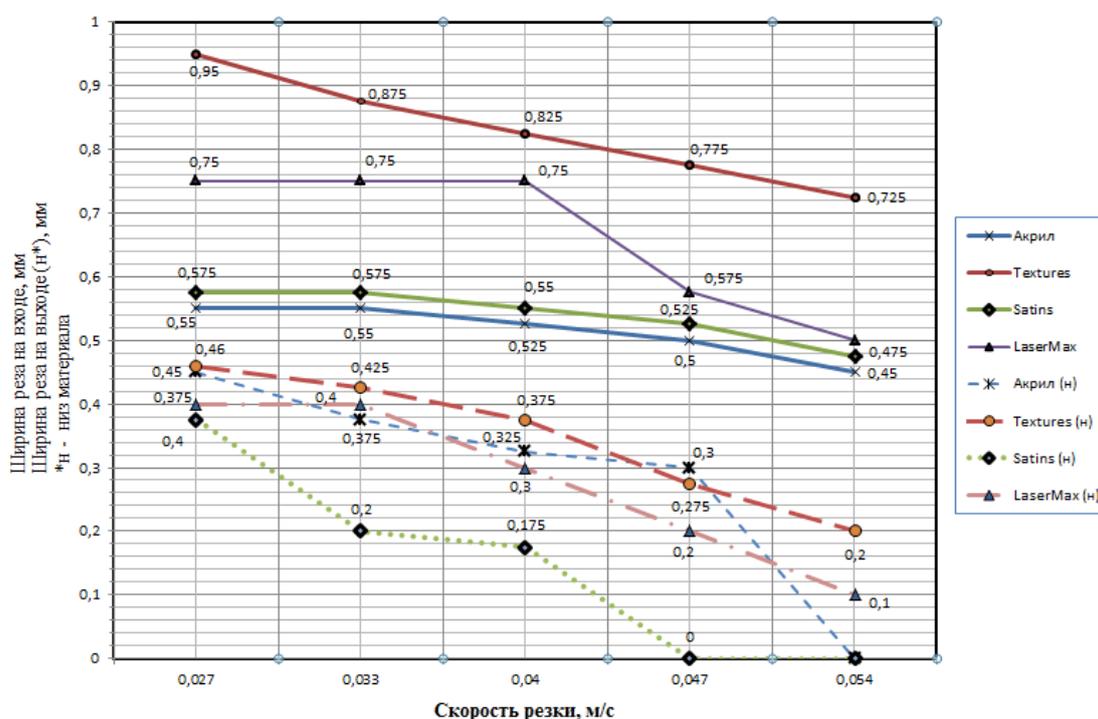


График 2. Изменение ширины реза пластиков в зависимости от скорости резки

3. $F = -0.5$ мм – фокус, $P = 7.5$ Вт = const – мощность, V – скорость резки м/с, изменяемый параметр

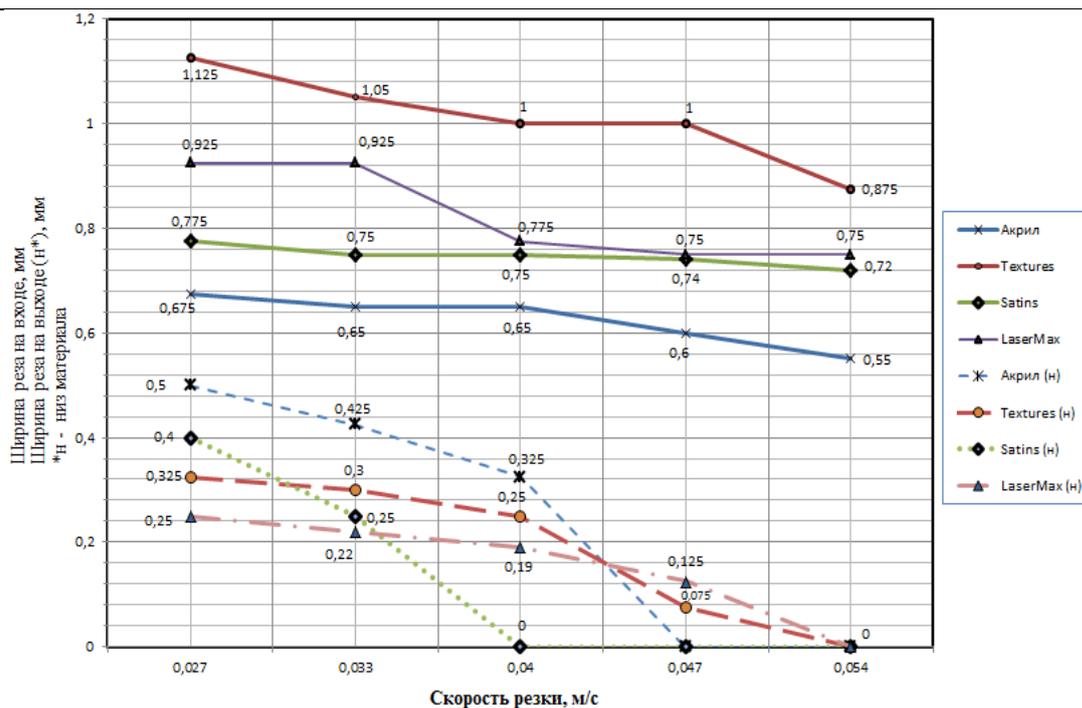


График 3. Изменение ширины реза пластиков в зависимости от скорости резки

II. Резка производилась при изменении следующих параметров:

- Мощность
- Фокус

4. $F=0$ мм – фокус, $V = 0.04$ м/с = const – скорость резки, P – мощность Вт, изменяемый параметр

Диапазон изменения мощности – [20.. 25] Вт

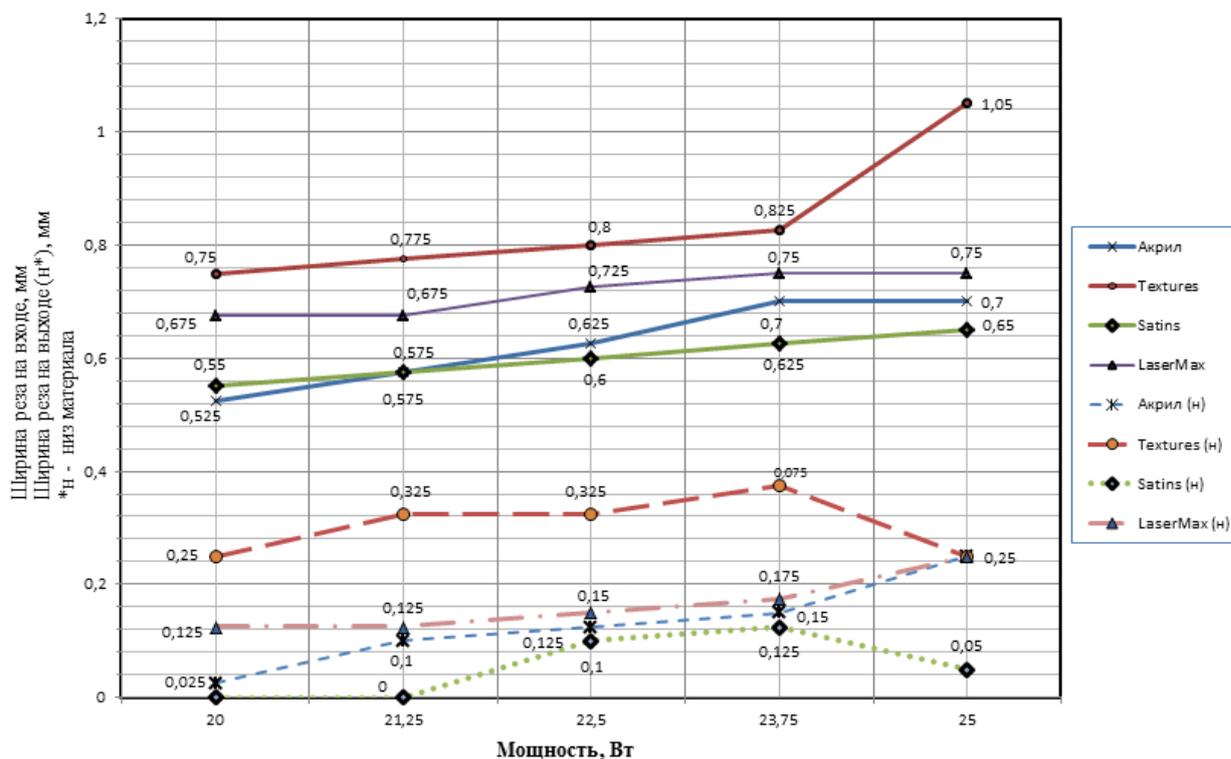


График 4. Изменение ширины реза пластика в зависимости от мощности излучения

5. $F = +0.5$ мм – фокус, $V = 0.04$ м/с = const – скорость резки, P– мощность Вт, изменяемый параметр.

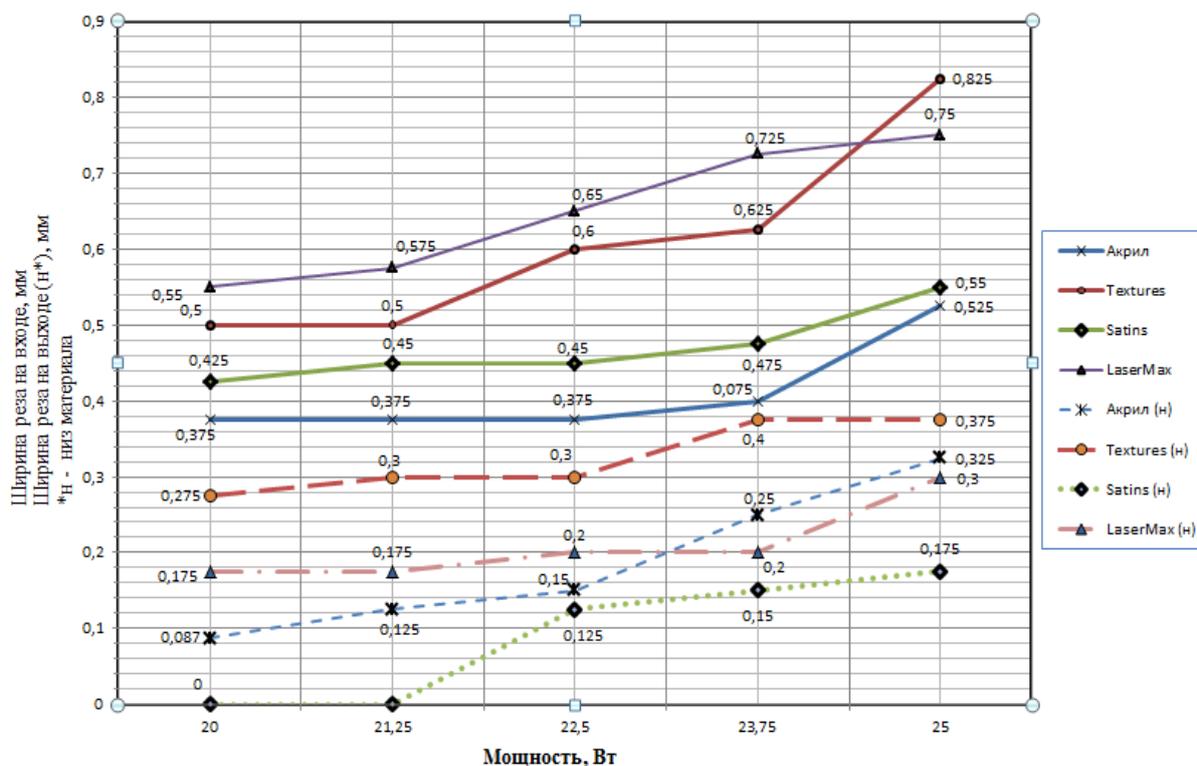


График 5. Изменение ширины реза пластиков в зависимости от мощности излучения

6. $F = -0.5$ мм – фокус, $V = 0.04$ м/с = const – скорость резки, P – мощность Вт, изменяемый параметр

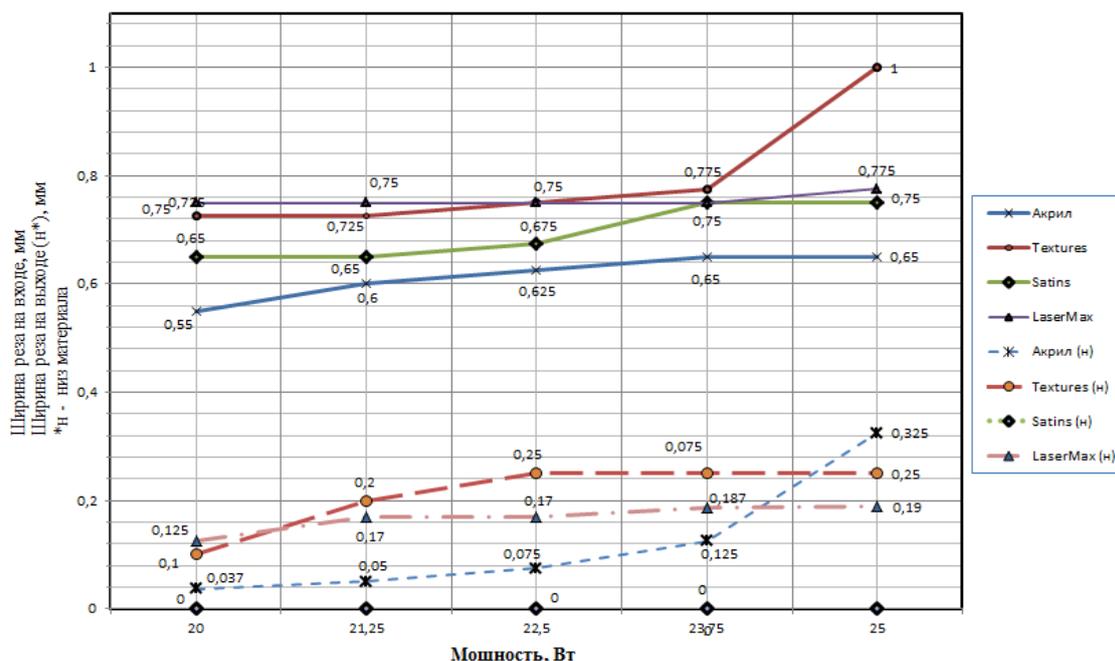


График 6. Зависимость ширины реза пластиков в зависимости от мощности излучения

Была проведена серия экспериментов по лазерной резке, состоящая из двух частей. В первой части была продемонстрирована зависимость ширины реза от изменения скорости, во второй от мощности излучения. Параллельно производилось изменение фокуса: «+0,5», «0», «-0,5» мм. Анализируя полученные зависимости, можно заметить, что:

- при заглаблении фокуса, ширина реза уменьшается.
- при увеличении скорости величина входного реза уменьшается - это объясняется тем, что тепло не успевает распространиться вглубь материала, такая же картина наблюдается и с изменением мощности.
- Проводя сравнение по видам пластика, обратим внимание, что наибольший рез у Textures и LaserMax. Это объясняется тем, что теплофизические свойства верхнего слоя (теплопроводность) у LaserMax и Textures имеет большую величину по сравнению с чистым Акрилом ($0,22 \text{ Вт/м}\cdot\text{К} > 0,19 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), а так же по сравнению с Satins, у которого основа - АБС, теплопроводность которого меньше по сравнению с представленными видами пластика ($0,12 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$). В большинстве случаев Satins (АБС) не прорезается у основания пластика, что опять же таки подтверждается малой теплопроводностью АБС.

Гравировка пластиков

III. Гравировка производилась при изменении следующих параметров:

- Скорость
- Фокус

1. $F=0$ мм – фокус, $P=7.5$ Вт = const – мощность, V – скорость гравировки м/с, изменяемый параметр

Диапазон изменения скорости – [0.75..1.2] м/с

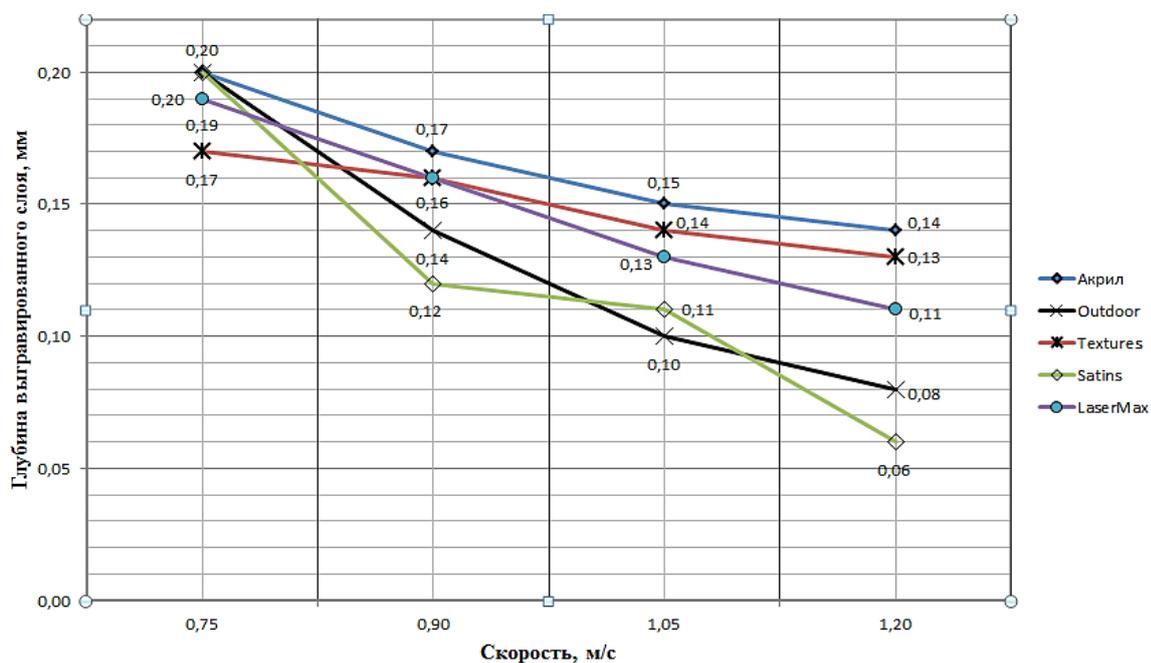


График 7. Зависимость глубины выгравированного слоя, от скорости гравировки

2. $F=+0.5$ мм – фокус, $P=7.5$ Вт = const – мощность, V – скорость гравировки м/с, изменяемый параметр

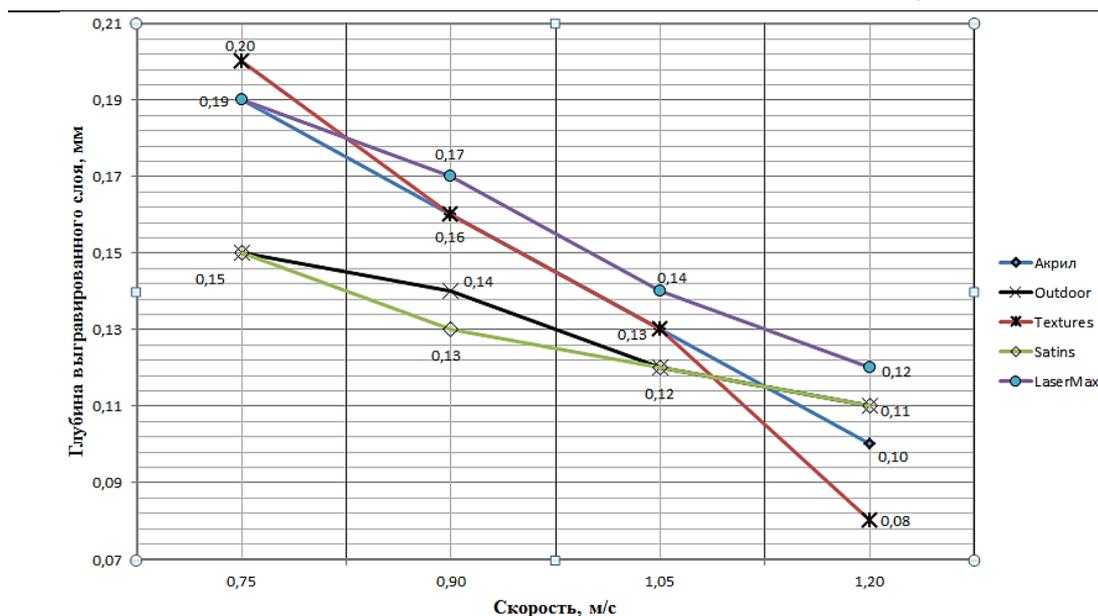


График 8. Зависимость глубины выгравированного слоя, от скорости гравировки

3. $F = -0.5$ мм – фокус, $P = 7.5$ Вт = const – мощность, V – скорость гравировки м/с, изменяемый параметр

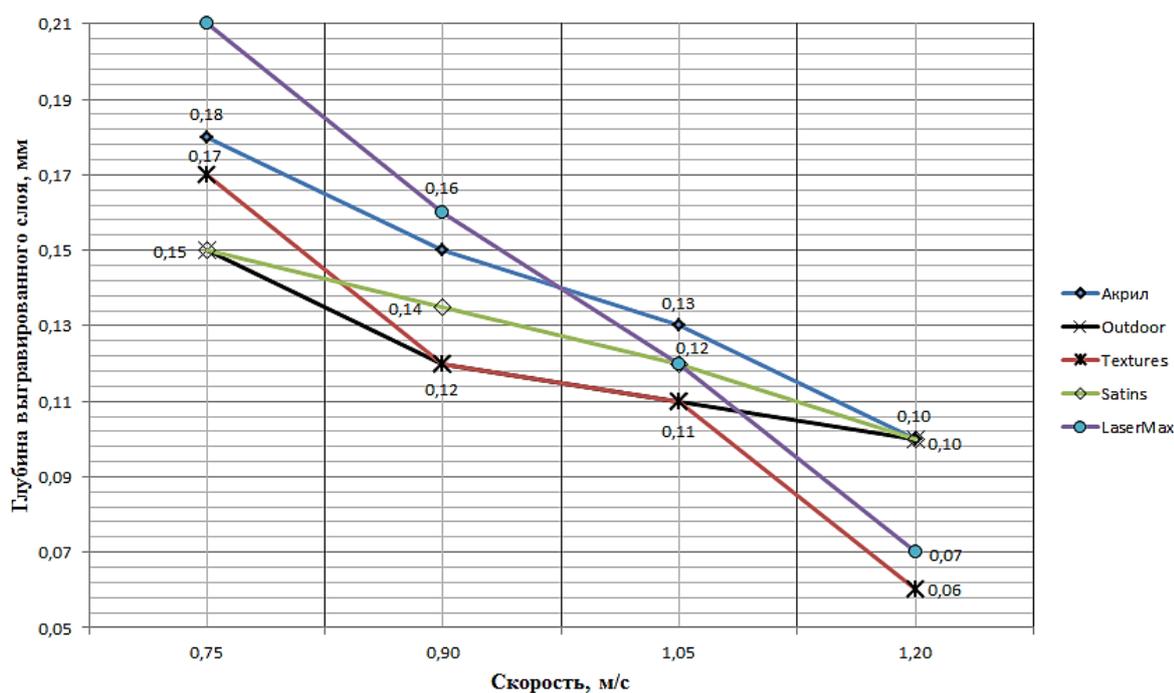


График 8. Зависимость глубины выгравированного слоя, от скорости гравировки

IV. Гравировка производилась при изменении следующих параметров:

- Мощность
- Фокус

4. $F = 0$ мм – фокус, $V = 1.05$ м/с = const – скорость гравировки, P – мощность Вт, изменяемый параметр

Диапазон изменения мощности – [5..17.5] Вт

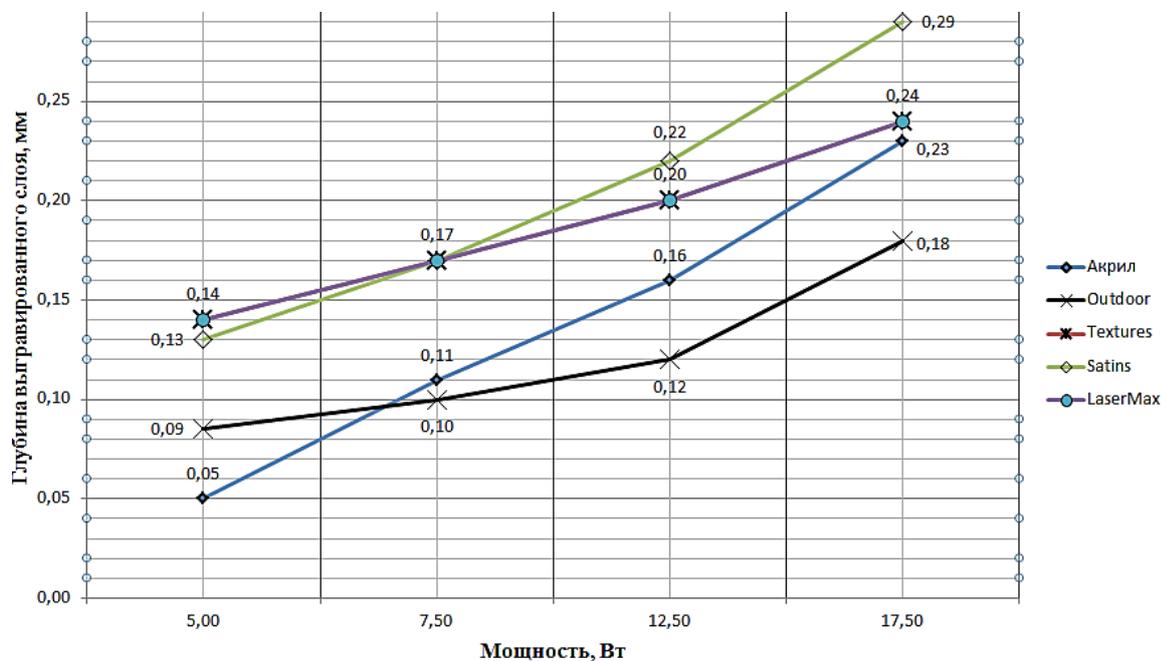


График 10. Зависимость глубины выгравированного слоя, от скорости гравировки

*- кривые *LaserMax* и *Textures* совпали

5. $F = + 0.5$ мм – фокус, $V = 1.05$ м/с = const – скорость гравировки, P – мощность Вт, изменяемый параметр

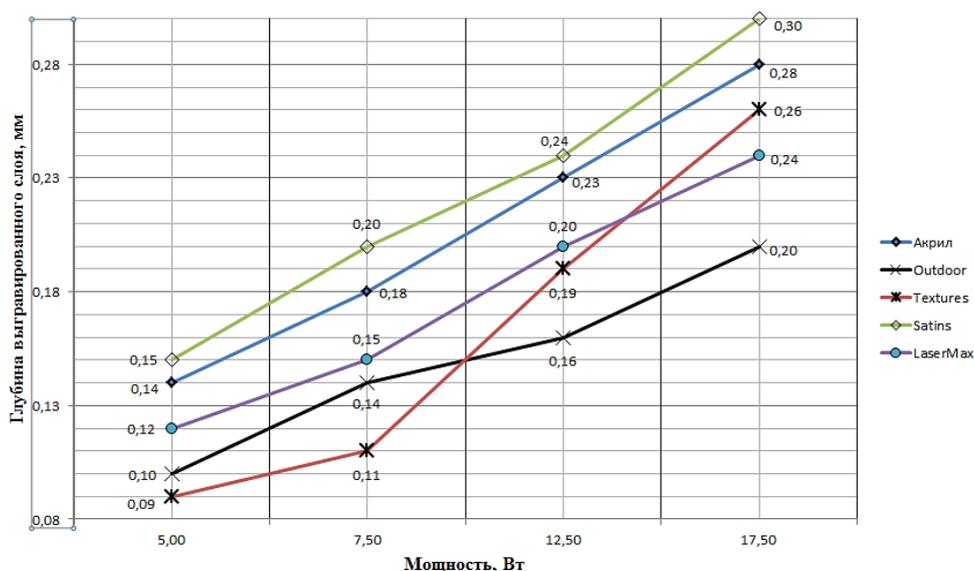


График 11. Зависимость глубины выгравированного слоя, от скорости гравировки

6. $F = -0.5$ мм – фокус, $V = 1.05$ м/с = const – скорость гравировки, P – мощность Вт, изменяемый параметр

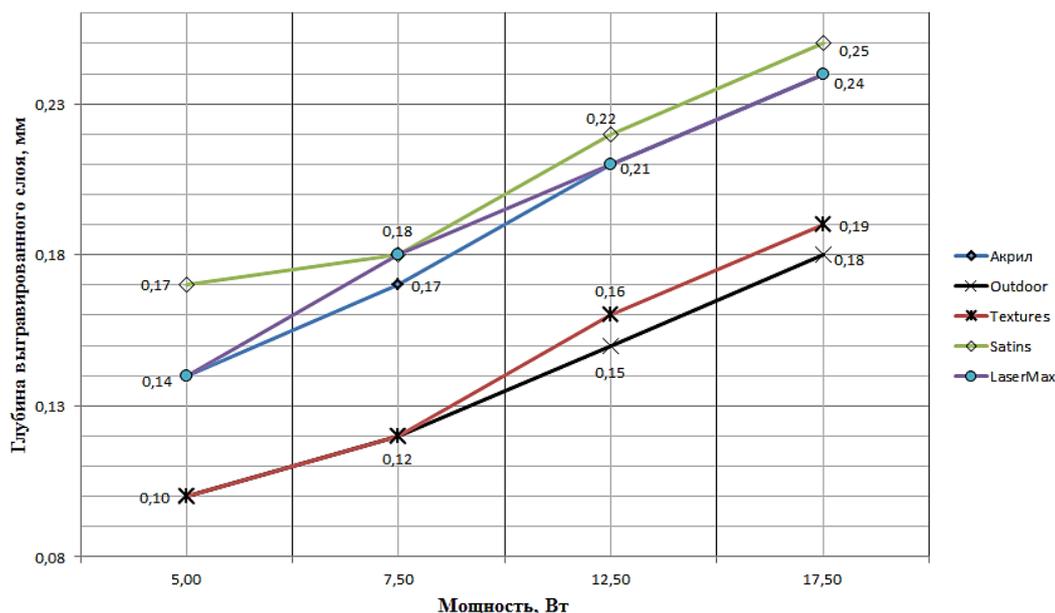


График 12. Зависимость глубины выгравированного слоя, от скорости гравировки

- Изменение фокуса не приводит к значительным изменениям, хотя в частных случаях наблюдается визуальное улучшение обработки поверхности.

- При введении электропроводящих наполнителей возрастает теплопроводность полимерного материала. В отличие от чистых полимеров в таких композициях наряду с фоновым наблюдается и электронный механизм теплопроводности, характерный для проводников.

Выше представлены экспериментальные зависимости - глубина гравировки от скорости движения каретки и мощности ЛИ. Как видно из большинства графиков, наибольшая глубина гравировки достигается у LaserMax, Satins и Акрила. Это связано с тем, что в верхнем слое находятся металлические включения: у LaserMax – алюминиевые хлопья, технический углерод, бронза (теплопроводность составляет 0,22 Вт/м·К), у Satins – диоксид титана, сульфат бария (0,24 Вт/м·К). Акрил не содержит верхнего слоя, но имея при этом хорошую проводимость (0,19 Вт/м·К) – также хорошо гравировается. Соответственно теоретические данные о влиянии включений - подтвердились экспериментально.

Выводы

В данной работе был проведен анализ лазерной резки и гравировки полимеров. За основу были взяты полимеры с различным химическим составом - пластики, специально предназначенные для лазерной гравировки. Целью исследования было экспериментально подтвердить правоту суждения о влиянии химического состава на лазерную обработку.

Результаты экспериментальных исследований по лазерной обработке полимерных материалов показали, что различие в теплофизических свойствах у

составляющих материал компонентов влияет на характеристики реза и гравировки, и как следствие на качество обработки.

Литература

1. Ю. В. Голубенко, А. В. Бондарев, К. В. Пономаренко. Лазерная резка полимеров и неметаллических композиционных материалов. Технология машиностроения. - 2005. - N 10. - С. . 57-59.
2. Дувакина Н.И., Ткачева Н.И. Выбор наполнителей для придания специальных свойств полимерным материалам. Пластические массы. 1989, № 11, с.46-48.31.
Ентус Н.Р. Техническое обслуживание и ремонт резервуаров. М., Химия, 1992,240 с.
3. Mark, James E. Physical Properties of Polymers Handbook Springer; 2 edition (December 18, 2006). American Institute of Physics .1095 pages.
4. http://www.rowmark.com/laser/Laser_Engravable_Materials.asp