**Содержание**

[1. Теория лазерного наклёпа 3](#_Toc535557502)

[2. Планирование эксперимента 5](#_Toc535557503)

[3. Проведение эксперимента 9](#_Toc535557504)

[3.1. Описание системы 9](#_Toc535557505)

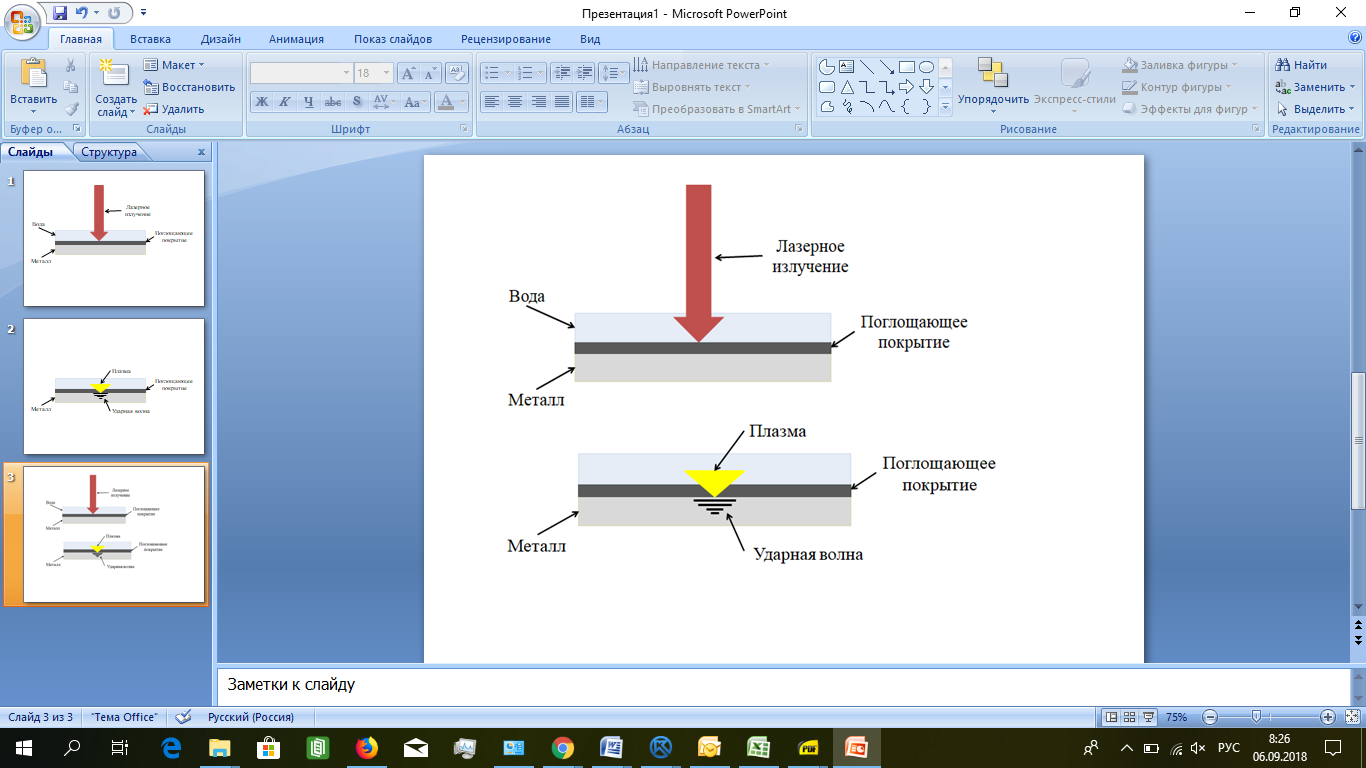
[3.2. Описание проведённых экспериментов 12](#_Toc535557506)

[Заключение 17](#_Toc535557507)

# 1. Теория лазерного наклёпа

Лазерный наклёп – обработка поверхности образца, при котором в нём возникают сжимающие остаточные напряжения, которые позволяют повысить устойчивость к коррозионному растрескиванию под напряжением.

Поверхностный слой металла (или специально нанесённое покрытие на металле) при воздействии лазерного излучения высокой плотности мощности переходит в состояние плазмы. Расширяющийся плазменный факел создает ударную волну. Для усиления эффекта от ударной волны образец помещают под слой материала, не поглощающего лазерное излучение, в данном случае это вода. При таких скоростях воздействия вода имеет свойство сопротивляться сжатию, что приводит к локализации давления в обрабатываемой области, и усиленная ударная волна приводит к возникновению деформации поверхностного слоя образца. Иллюстрация, поясняющая процесс наклёпа приведена на рис. 1.1.

  
Рис. 1.1. Процесс лазерного наклёпа

Для определения параметров излучения, толщины слоя воды, типа поглощающего материала был проведён краткий литературный обзор, и теоретическая оценка. Результаты краткого теоретического обзора приведены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты краткого теоретического обзора

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № п/п | Обрабат.  материал | Предел текучести (условный),  МПа | Предел прочности, МПа | Поглощающий материал | Плотность мощности, Вт/см2 |
| 1 | 2050-T8 | 552 | 579 | 80 мкм окислы алюминия, 10 мкм органическая краска | 1,91 х 1010 |
| 2 | 7075-T6 | 505 | 540 | Специальная чёрная самоклеющаяся плёнка | 5,31 х 109 |
| 3 | 6061-Т6 | 275 | 290 | Алюминиевая фольга 100 мкм | 9,90 х 109 |
| 4 | Ti-17 | 106 | 112 | 100 мкм чёрная лента | 9,51 х 109 |
| 5 | Al | 30 | 73,5 | Не указан | 2,83 х 109 |
| 6 | AISI 321 | 234 | 620 | Не указан | 5,97 х 109 |

Для определения требуемой плотности мощности для обработки образцов никелевых сплавов были рассмотрены механические характеристики сплавов, приведённые в таблице 2.

Табл. 2 Механические характеристики никелевых сплавов

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № п/п | Наименование сплава | Предел прочности, МПа |
| 1 | ВХ – 4Л | 780 |
| 2 | ВКНА – 1В | 720 |
| 3 | ВКНА – 1ВР | 410 |
| 4 | ЖС – 32 | 1300 |

Для оценки толщины слоя воды будем исходить из поглощения излучения в слое воды. Показатель поглощения воды (α) излучения с длиной волны около 1 мкм составит 40 обратных метров. Пусть слой воды должен быть такой толщины (h), что бы в нём поглощалось не более 10% излучения. Тогда, по закону Бугера толщина может быть вычислена по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Толщина слоя воды (h) должна быть менее 2,6 мм.

# 2. Планирование эксперимента

Для проведения эксперимента был произведён расчёт параметров установки для наклёпа. В таблице 3 представлены исходные данные для расчёта.

Табл. 3 Исходные данные

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Характеристика | Значение | Обозначение |
| Требуемая плотность мощности, Вт/м. кв. |  | W |
| Допустимо отклонение от заданной мощности, % | 20 | dW |
| Энергия в импульсе, Дж | 0,3 | E |
| Длительность импульса, с | 2,00 | t |
| Пиковая мощность, Вт | 1,50 | Pп |
| Параметр качества () | 100 |  |
| Диаметр выходной аппертуры лазера, м | 0,003 | D |
| Длина волны излучения, м | 1,06 | λ |

Зная требуемую плотность мощности, пиковую мощность импульса можно вычислить площадь обрабатываемой поверхности за один импульс, то есть площадь пятна в фокусе линзы (S), ,а зная площадь пятна легко узнать требуемый радиус пятна в перетяжке линзы (Rf), м.

|  |  |
| --- | --- |
| , м2  , м |  |

Следующим шагом вычислим полную расходимость излучения (θ), рад:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

, рад

Зная полную расходимость излучения найдём фокусное расстояние линзы (f), м:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

, м

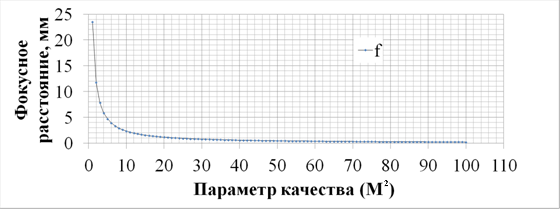
Для определения параметров системы при отклонении плотности мощности от заданного значения произведём вычисления повторно, но плотность мощности (W) заменим на (W · (dW/100)), тогда новое фокусное расстояние (f(dW)) примет значение:

f (dW) = 2,82 · 10-4 м

Значит, отклонение от положения фокуса (Δf) не должно превышать:

Δf = 6 · 10-5 м.

Так же качество излучения (параметр ) оказывает сильное влияние на фокусное расстояние линзы. На рис. 2.1 приведена зависимость фокусного расстояния линзы от параметра качества . Данная зависимость позволяет определить линзу для фокусировки излучения с заданным .

  
Рис. 2.1. Зависимость фокусного расстояние от параметра качества

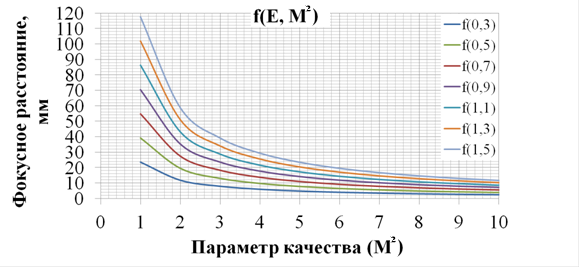
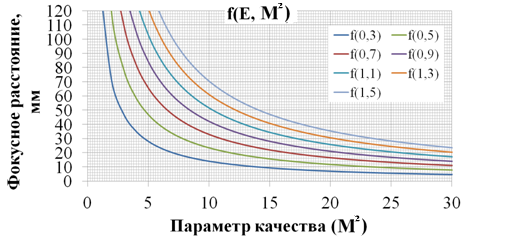
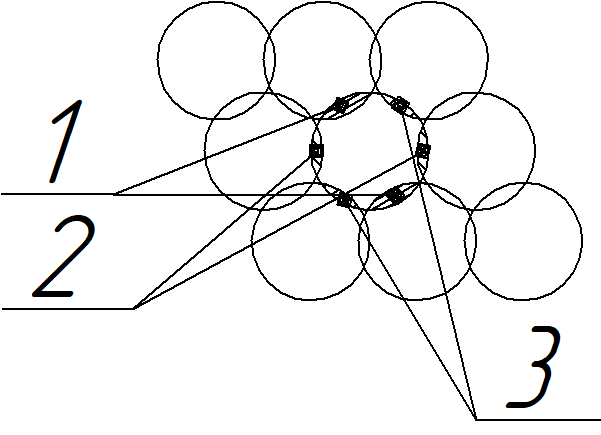


Рис. 2.2. Зависимость фокусного расстояния (f) от *М2*, и от энергии в импульсе (Е, Дж), для обеспечения плотности мощности 6 · 1014 Вт/м2

  
Рис. 2.3. Зависимость фокусного расстояния (f) от , и от энергии в импульсе (Е, Дж), для обеспечения плотности мощности 1 · 1014 Вт/м2

Стоит заметить, что для обеспечения требуемой плотности мощности требуется значительно увеличить параметр качества излучения, либо значительно повысить энергию в импульсе.

Для обработки поверхности была предложена следующая схема заполнения образца (рис. 2.4)

  
Рис. 2.4. Схема заполнения рабочей области при заданном перекрытии по осям Ох, и Оу. Цифрами 1, 2, 3 – отмечены области, повторной обработки, появляющиеся вследствие наличия перекрытия по той, или иной оси.

Далее определим время, требуемое для обработки поверхности заданной площади, при установленном перекрытии по осям х, у. В таблице 4 приведены исходные данные для расчёта.

Табл. 4. Исходные данные для расчёта времени обработки поверхности

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Наименование параметра | Значение | Обозначение |
| Высота участка поверхности обрабатываемого образца (по оси у), м | 0,01 | a |
| Ширина участка поверхности обрабатываемого образца (по оси х), м | 0,005 | b |
| Обрабатываемая площадь, | 0,00005 |  |
| Перекрытие по оси ординат (у), % диаметра | 10 | *d*a |
| Перекрытие по оси абсцисс (х), % диаметра | 10 | *d*b |
| Частота следования импульсов, Гц | 1 | ν |
| Площадь пучка в перетяжке, |  | S |

Для вычисления количества импульсов (N) при заданном перекрытии для обработки заданной площади воспользуемся выражением.

|  |  |
| --- | --- |
| , шт |  |

Здесь δ – коэффициент, учитывающий увеличение площади из–за перекрытия областей, обрабатываемых за один импульс. Данный коэффициент вычисляется следующим образом:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

При обработке поверхности следует внести коэффициент запаса времени (*d*T), показывающий насколько медленнее частоты следования импульсов будет происходить обработка образца. Примем этот коэффициент равным 2. Тогда оценочное время, для обработки поверхности образца площадью 1 см на 0,5 см, с 10% перекрытием по осям Ох, и Оу будет затрачено время (T):

|  |  |
| --- | --- |
| , мин. |  |

# Проведение эксперимента

## 3.1. Описание системы

Для выполнения наклепа необходим мощный моноимпульс, который достигается с использованием модулирования добротности.

Начальные параметры лазера в режиме свободной генерации:

Энергия в импульсе (среднее за 30 с.) – 1,685±0,005 Дж

Поперечное распределение мощности представлено на рис. 3.1.

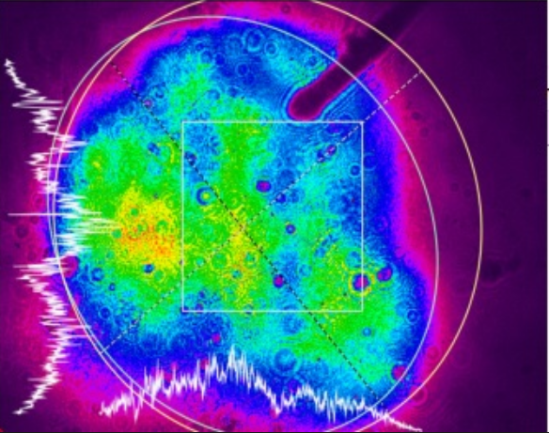


Рис.3.1. Поперечное распределение мощности в режиме свободной генерации

Далее в схему были установлены два затвора: LiF:F2 и Cr:YAG. Осциллограмма импульса представлена на рис. 3.2, длительность импульса составила 11 нс. Энергия в импульсе – 349±4 мДж (среднее за 30 с.).

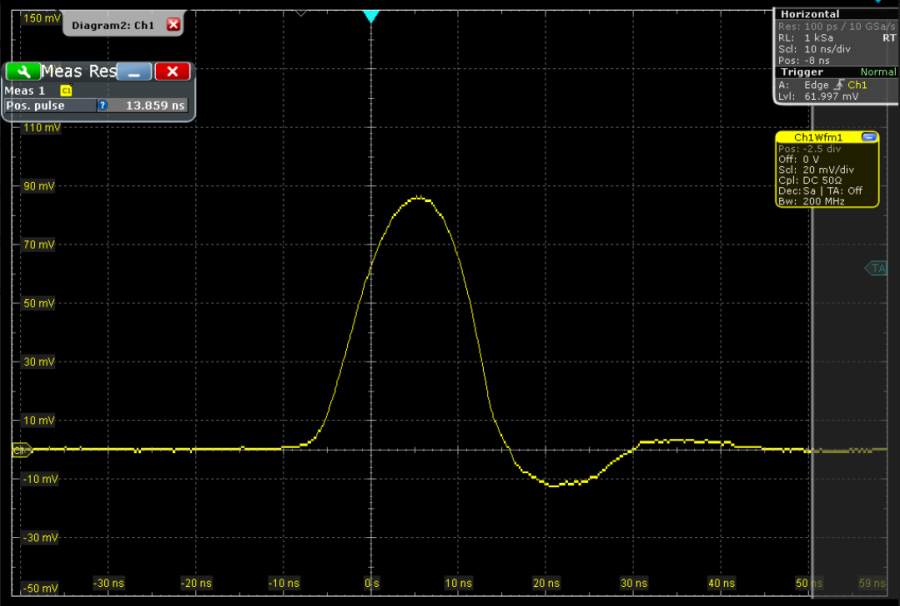


Рис. 3.2. Осциллограмма импульса в режиме модулированной добротности

Распределение мощности в поперечном сечении пучка представлено на рис. 3.3-3.6. Для фокусировки использовалась линза с фокусным расстоянием 100 мм, диаметр линзы – 100 мм. Все измерения проводились в режиме пассивной модуляции добротности, в фокусе линзы.

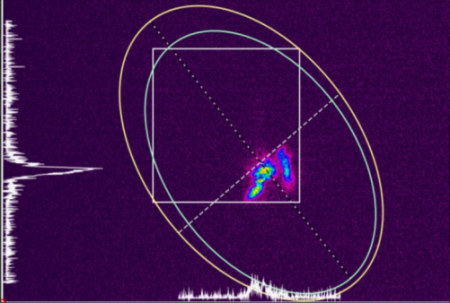


Рис. 3.3. Распределение плотности мощности в плоскости XY

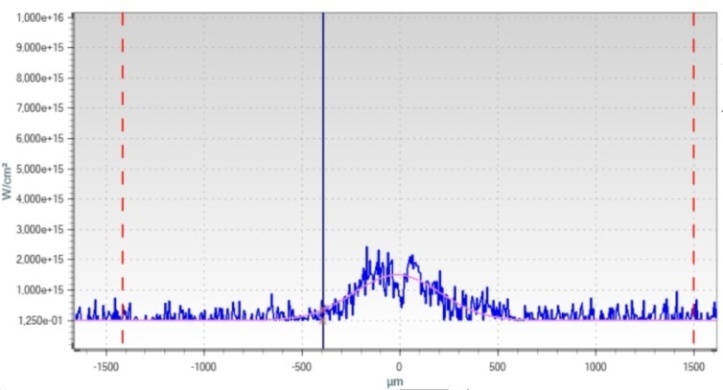


Рис. 3.4. Распределение плотности мощности в плоскости ZY



Рис. 3.5. Распределение плотности мощности в плоскости ZX

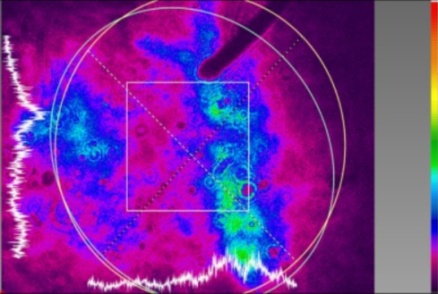


Рис. 3.6. Распределение плотности мощности в плоскости XY, не в фокусе

Затем, для уменьшения радиуса диска Эйри, на выходе из усилителя был установлен телескоп с увеличением в 5 раз. Телескоп был отрегулирован, что бы давать на выходе параллельный пучок. Распределение в фокусе измерялось асферической линзой, диаметром 5 мм и фокусным расстоянием около 100 мм (Задний фокальный отрезок в случае отсутствия фильтров составил 94,5 мм). Предел лучевой стойкости для расширителя, согласно оценки с сайта производителя, в связи с чем была снижена мощность накачки до значения энергии импульса на выходе 240 мДж (напряжение накачки 650 В).

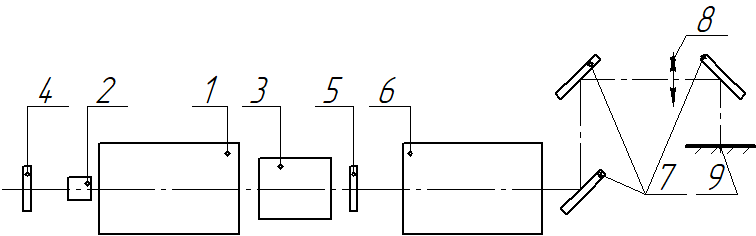


Рис. 3.7. Оптическая схема установки

1- Квантрон генератора; 2 - Кристалл Cr:YAG; 3 - Кристалл LiF:F2; 4 - Глухое зеркало 5 - Выходное зеркало; 6 - Квантрон усилителя; 7 - Зеркала; 8 - Собирающая линза; 9 - Образец.

Установка представляет собой П-образное колено, поставлен телескоп, линза (задний фокальный отрезок 94,5 мм), пучок лазера падает перпендикулярно поверхности образца, в центр кюветы.  Пропускание системы из п-образного колена, линзы, телескопа составило 40%.

Табл. 5. Диаметр пучка в зависимости от положения линзы

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № п/п | Положение линзы, мм | Диаметр пучка, мм |
| 1 | 58,0 | 0,041 |
| 2 | 58,6 | 0,093 |
| 3 | 58,8 | 0,21 |
| 4 | 59,6 | 0,475 |
| 5 | 60,9 | 1,075 |

## 3.2. Описание проведённых экспериментов

Проведена серия экспериментов с изменением фокусного расстояния и последующим измерением размера отпечатка. Измерения проводились на наклепанном материале, без защитного покрытия.

Табл. 6. Размер отпечатка в зависимости от фокусного расстояния

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № п/п | Z-координата линзы, мм | Диаметр по оси Х, мм | Диаметр по оси У, мм |
| 1 | 61,5 | 0,49 | 0,47 |
| 2 | 62 | 0,64 | 0,54 |
| 3 | 62,5 | 1,15 | 0,95 |
| 4 | 63 | 1,31 | 1,13 |

Проведена серия экспериментов на наклепанных образцах с разными покрытиями для выяснения степени повреждения поверхности после моно-импульса. Далее на рисунках точка 1 – Z-координата линзы 63 мм, точка 2 - Z-координата линзы 61,5 мм.



Рис. 4.1. Покрытие фломастером слева в 1 слой, справа – в 3 слоя



Рис. 4.2. Никелевое покрытие



Рис. 4.3. Гравировка



Рис. 4.4. Пескоструйная обработка



Рис. 4.5. Окалина. Так как металл точно пробило еще не в фокусе, эксперимент в фокусе повторять не стали

Покрытие фломастером и черным никелем не предоставляет достаточного уровня защиты поверхности образца при рабочих плотностях мощности излучения. Оставшиеся три материала не дают возможности оценить повреждение металла.

Предложено покрытие алюминиевой фольгой. Производится обработка пяти точек с шагом 0.5 мм по фокусу от 58.5 до 61 мм, покрытие алюминиевая фольга толщиной ~ 18 мкм, наклепанный материал. Отчетливо видно изменение профиля поверхности, термических изменений не видно.



Рис. 4.6. Отпечатки после фольги

Однако данное покрытие не выдержало эксперимента с обработкой площадки, перекрытие между соседними ударами составляло 200 мкм. Эксперимент был прерван, так как плазма разрывала фольгу и она (фольга) отслаивалась, наклеп проводился по металлу без покрытия.

Повторена серия экспериментов с изменением фокусного расстояния и последующим измерением размера отпечатка.

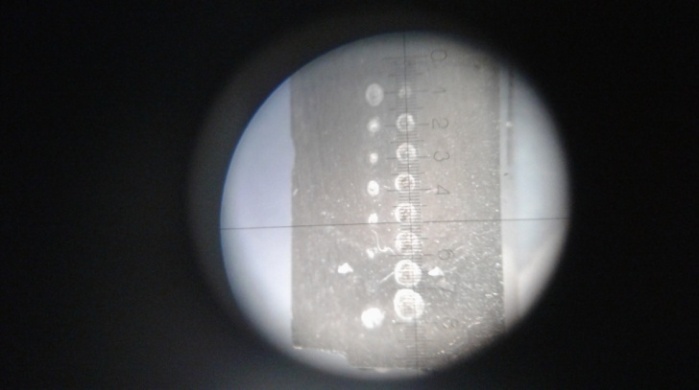


Рис. 4.7. Результат эксперимента

После проведены серии экспериментов по забитию поверхности. Глубина обработки проверялась твердомером. Измерения производились на оборудовании: твердомер HBRV-187.5 с использованием индентора НП-1 согласно ГОСТ 2999-75 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу». Результаты измерений приведены в табл.7.

Табл.7. Измерение образцов на твердость

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование сплава | Покрытие | D1 | D2 | Dср | Значение твёрдости | Среднее значение твёрдости | СКО | Достоверность |
| ВХ4Л | Полировка | 0,491 | 0,517 | 0,504 | 219 | 487 | 20 | 5,3 |
| 0,779 | 0,798 | 0,789 | 89 | 2,4 |
| 334 | 332 | 0,333 | 501 | 0,6 |
| 340 | 346 | 0,343 | 473 | 1,8 |
| ЖС69 | Полировка | 214 | 212 | 0,213 | 1226 | 666 | 485 | 0,9 |
| 372 | 368 | 0,370 | 406 | 1,1 |
| 0,389 | 0,389 | 0,389 | 367 | 0,0 |
| 0,364 | 0,377 | 0,371 | 405 | 3,6 |
| ЖС32 | Полировка | 0,373 | 0,369 | 0,371 | 404 | 434 | 134 | 1,1 |
| 0,43 | 0,432 | 0,431 | 299 | 0,5 |
| 0,362 | 0,368 | 0,365 | 417 | 1,7 |
| 0,358 | 0,374 | 0,366 | 415 | 4,5 |
| 0,376 | 0,381 | 0,379 | 388 | 1,3 |
| 0,292 | 0,289 | 0,291 | 659 | 1,0 |
| ВКНА1В | Полировка | 282 | 282 | 0,282 | 699 | 401 | 260 | 0,0 |
| 446 | 450 | 0,448 | 277 | 0,9 |
| 0,456 | 0,444 | 0,450 | 275 | 2,7 |
| 0,499 | 0,494 | 0,497 | 226 | 1,0 |
| ВКНА1ВР | Полировка | 404 | 400 | 0,402 | 344 | 390 | 40 | 1,0 |
| 0,375 | 0,366 | 0,371 | 405 | 2,5 |
| 0,358 | 0,37 | 0,364 | 420 | 3,4 |
| ВЖМ4 | Полировка | 0,388 | 0,383 | 0,386 | 374 | 389 | 20 | 1,3 |
| 0,379 | 0,373 | 0,376 | 393 | 1,6 |
| 0,387 | 0,393 | 0,390 | 366 | 1,6 |
| 0,374 | 0,372 | 0,373 | 400 | 0,5 |
| 0,284 | 0,291 | 0,288 | 673 | 2,5 |
| 0,364 | 0,369 | 0,367 | 414 | 1,4 |
|  | Гравировка | 0,423 | 0,449 | 0,436 | 293 | 315 | 32 | 6,1 |
| 0,403 | 0,408 | 0,406 | 338 | 1,2 |
| Чёрный никель | 0,324 | 0,315 | 0,320 | 545 | 443 | 144 | 2,9 |
| 0,404 | 0,403 | 0,404 | 342 | 0,2 |
| Чёрный никель референтный | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 285 | 304 | 27 | 0,0 |
| 0,41 | 0,42 | 0,415 | 323 | 2,4 |
| Пескоструйная обработка | 0,472 | 0,457 | 0,465 | 258 | 315 | 82 | 3,3 |
| 0,383 | 0,389 | 0,386 | 373 | 1,6 |

Достоверность измерений проверялась согласно ГОСТ 2999-75 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу», где указано, что разность диагоналей d1-d2 одного отпечатка не должна превышать 2% от меньшей из них:

В дальнейшем расчете для чистоты результатов эксперимента недостоверные показатели не учитывались. Результаты сведены в табл. 8.

Табл. 8. Сравнение значений твердости до и после обработки

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование сплава | Покрытие | Среднее значение твёрдости | | СКО | |
| до | после | до | после |
| ВКНА-1В | Полировка | 250 | 401 | 10 | 260 |
| ВЖМ4 | Полировка | 394 | 389 | 5 | 20 |
| ВХ4Л | Полировка | 168 | 487 | 0 | 20 |
| ЖС69 | Полировка | 387 | 666 | 67 | 485 |
| ВКНА-1ВР | Полировка | 305 | 390 | 11 | 40 |
| ЖС32 | Полировка | 376 | 434 | 55 | 134 |
|  | Пескоструйная обработка | 332 | 315 | 10 | 82 |
| Чёрный никель | 443 | 144 |
| Референтный | 304 | 27 |
| Гравировка | 315 | 32 |

# Заключение

В ходе данной научно-исследовательской работы было проведено ознакомление с технологией проведения лазерного наклепа, проведен литературный обзор, позволяющий определить основные виды проведения прецизионной обработки металла такого типа. На основе полученных данных были рассчитаны минимально необходимые значения показателей лазера, была предложена схема обработки металла.

Так же в процессе работы была собрана установка, на которой в дальнейшем проводились эксперименты. После всех экспериментов результаты были собраны в отчет, по которому состоялось выступление перед потенциальными заказчиками.

Как видно из таблицы, эксперимент не показал значительного улучшения твердости поверхности. Главной причиной такого результата экспериментов на данный момент принято считать малый размер пятна, при котором достигаются значение, необходимые для получения наклепа, т.к. при таком малом размере пятна нельзя с точностью определить, осталось ли покрытие на обрабатываемой поверхности после предыдущих импульсов или нет, а размер обработанного моно-импульсом участка не позволяет оценить изменение твердости ввиду отсутствия оборудования для измерения твердости на столь малых участках.