УТВЕРЖДАЮ:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Заведующий кафедрой | | | | | | | \_\_И1\_\_\_\_ | | |
|  | | | |  | | индекс кафедры | | | |
| \_Борейшо А.С. | | | |  | | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | | | |
| Фамилия ИО | | |  | | подпись | | | |
| « 15 » |  | марта | | | | | | 2019г. | |

**Задание**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **на** | преддипломную | **практику** |

наименование практики

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Обучающемуся группы** | И1М31 | | |  | Колосовой Татьяне Владимировне | | | | | | | | | | | | | |
|  | группа | | |  | Фамилия Имя Отчество | | | | | | | | | | | | | |
| **Направление/специальность** | 12.04.05 | | | | |  | | Лазерная техника и лазерные технологии | | | | | | | | | | |
| нужное подчеркнуть | код | | | | | | | |  | полное наименование направления/специальности | | | | | | |
|  | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Руководитель практики** | Киселев И.А., к.т.н., доцент | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | Фамилия ИО, ученая степень, ученое звание, должность | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Тема задания на практику:** |  | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Срок прохождения практики:** | | с | 27.03.19 | | | | | | | | | г. |  | по | 07.06.19 | | | г. | |
| **Место прохождения практики:** | | БГТУ «Военмех» им. Д.Ф.Устинова, СПб | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Должность обучающегося на практике:** | | | | | | | магистрант | | | | | | | | | | | |
| 1. **Виды работ и требования к их выполнению:** | | | | | | | | | | |  | | | | | | | |
| Разработка теоретического раздела магистерской диссертационной работы | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Разработка экспериментального раздела дипломной работы | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Создание отчетных документов | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. **Виды отчетных материалов и требования к их выполнению:** | | | | | | | | | | | | | | | | дневник, отчет | | |
|  | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

1. **ПЛАН-ГРАФИК практики**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № этапа | | | Наименование этапа | | | | | | | | | Срок завершения этапа | | Виды работ | Форма  отчетности | |
| 1 | | | Разработка теоретического раздела магистерской диссертационной работы | | | | | | | | | 14.04.2019 | | Разработка | отчет | |
| 2 | | | Разработка экспериментального раздела дипломной работы | | | | | | | | | 05.05.2019 | | Разработка | отчет | |
| 3 | | | Создание отчетных документов | | | | | | | | | 07.06.2019 | | Разработка | отчет | |
| **Дата выдачи задания:** | | | | | | | | | |  | | **Срок сдачи отчетных документов:** | | | | | |
| « | | 27 | | » | марта | 2019 | | г. | «\_07\_» \_\_\_\_июня\_\_\_\_\_\_\_ 2019 г. | | | | | | |
| **Руководитель практики:** | | | | | | |  | | | | **Обучающийся:** | |  | |
| « | 07 | | | » | июня | 2019 | | г. | «\_07\_» \_\_\_июня\_\_\_\_\_ 2019 г. | | | | | | |

**Дневник**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **прохождения** | преддипломной | **практики** |

наименование практики

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Обучающегося группы** | | И1М31 | | |  | | Колосовой Татьяне Владимировне | | | | | | | | |
|  | | группа | | |  | | Фамилия Имя Отчество | | | | | | | | |
| **По направлению/специальности** | | | 12.04.05 | | | | |  | Лазерная техника и лазерные | | | | | | |
| нужное подчеркнуть | | | код | | | | |  | полное наименование направления/специальности | | | | | | |
| технологии | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Срок прохождения практики:** | | | | с | | 27.03.19 | | | | г. |  | по | 07.06.19 | | г. | |
| **Место прохождения практики:** | | | | БГТУ «Военмех» им. Д.Ф.Устинова, СПб | | | | | | | | | | | |
|  | | | | полное наименование организации | | | | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | | | | | | | | |
| **В должности:** | магистрант | | | | | | | | | | | | |
|  | | | | указать должность | | | | | | | | | | | |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Дата | Вид работ | Примечание |
| 14.04.2019 | Разработка теоретического раздела магистерской диссертационной работы |  |
| 05.05.2019 | Разработка экспериментального раздела дипломной работы |  |
| 07.06.2019 | Создание отчетных документов |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

**Обучающийся** \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

подпись

«\_07\_» \_\_\_\_июня\_\_\_\_\_ 2019 г.

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**

**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | |  |  | ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ: | | | | | | | | | | | | | | |
| Факультет | И | |  | Заведующий кафедрой | | | | | |  | | | | И1 | | | | | | |
|  | индекс факультета | |  |  | | | | |  | | | | | | индекс кафедры | | |
| Выпускающая кафедра | И1 | |  | | Борейшо А.С. | | |  | | | |  | | | | | | | |
|  | индекс кафедры | |  | | Фамилия ИО | |  | | | | подпись | | | | | | | | | | |
| Группа | И1М31 | |  | «26 » | | марта | | | | | | | | | | 2019 г. | | |
|  | индекс группы | |  |  | |  | | | | | | |  | | | |

**отчет**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **о прохождении** | | | преддипломной | | | | | | | | | | | | | | **практики** | | | | | | | |
| наименование практики | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Колосовой Татьяны Владимировны | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Фамилия, имя, отчество обучающегося | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **обучающегося по**  **направлению/специальности** | | | | | | 12.04.05 | | |  | | Лазерная техника и лазерные | | | | | | | | | |
| нужное подчеркнуть | | | | | | код | | | |  | | полное наименование направления/специальности | | | | | |
| технологии | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Руководитель практики:** | | | | | Киселев И.А., к.т.н., доцент | | | | | | | | | | | | | | |
|  | | Фамилия ИО, ученая степень, ученое звание, должность | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Срок прохождения практики:** | | | | с | | 27.03.2019 | | | | | | г. |  | по | 07.06.2019 | | | г. | | | |
| **Должность обучающегося на практике:** | | | | | | | **магистрант** | | | | | | | | | | | | | | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Руководитель практики:** | | | |  | | |  |  | | | | |  | | | | | |
|  | | |  | Киселев И.А. | | |  | |  | | |  | |  | | | | |
| Подпись | | |  | Фамилия ИО | | |  | |  | | | |  | |  | | |
| « 07» |  | \_\_\_\_\_\_\_июня\_\_\_\_\_\_\_ | | |  | 2019 г. |  |  | |  |  | | | | |  |  | | |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2019 г.

**Содержание**

1. Разработка теоретического раздела дипломной работы 5

1.1. Технология лазерного формирования отверстий 5

1.2. Технология лазерного наклепа 8

2. Разработка экспериментального раздела дипломной работы 11

2.1. Установка для лазерной прошивки отверстий 11

2.2. Установка для лазерного наклепа 17

Библиографический список 25

## 1. Разработка теоретического раздела дипломной работы

## 1.1. Технология лазерного формирования отверстий

С исторической точки зрения сверление отверстий было одним из самых первых технологических применений лазеров (впервые сведения об использовании лазеров для изготовления отверстий в алмазах появились еще в 1962 г.). Если же говорить о физике этого процесса, то он основан на испарении материала. Основными физическими процессами при лазерном сверлении являются разогрев, плавление и испарение материала из зоны лазерного воздействия. Для того чтобы инициировать данные процессы, на поверхности обрабатываемого изделия необходимо обеспечить плотность мощности излучения на уровне 106…107 Вт/см2. [2]

Суть лазерного сверления заключается в том, что под воздействием сфокусированного на поверхности материала лазерного пучка отверстие увеличивается в глубину вследствии испарения, а по диаметру - в результате плавления стенок и вытеснения жидкости избыточным давлением паров. Для получения прецизионных отверстий с допуском порядка 2 мкм, используются лазеры с очень короткими импульсами в диапазоне нс и пс, позволяющие контролировать диаметр отверстия на заданном уровне, т.е. не приводящим к нагреву и плавлению стенок, отвечающих за рост диаметра отверстия, а приводящее к испарению материала из твердой фазы. Также использование лазеров с нс и пс диапазоном импульсов позволяет существенно уменьшить наличие затвердевшей жидкой фазы на боковых поверхностях отверстия. Различают два вида лазерного формирования отверстий: пробивку («прошивку») и сверление отверстий. [4]

Первый способ обычно применяется при обработке сверхпрочных материалов. В этом случае на материал воздействуют одиночными импульсами мощного лазера. Заготовка помещается в фокусе лазерного излучения и не меняет своего положения в процессе обработки.

Под лазерным сверлением понимается прецизионный способ получения отверстий различного диаметра. Для этой операции используются два независимых метода. В одном случае лазерный луч перемещается по заданному контуру и форма отверстия определяется траекторией его относительного перемещения. Фактически здесь происходит процесс резки, при котором тепловой источник перемещается с определенной скоростью в заданном направлении. При этом, как правило, применяются лазеры непрерывного действия либо импульсные лазеры с очень короткой (нано- или фемтосекундной) длительностью импульсов и высокой частотой их повторения. В другом случае, получившем название проекционного метода, обрабатываемое отверстие, подобно тому как это происходит при резке, повторяет форму лазерного пучка, которому с помощью специальной маски (диафрагмы) и проекционной оптической системы можно придать любое сечение.

В последние годы для сверления микроотверстий стали широко использовать метод многоимпульсной обработки (МИО). Техника МИО формирует отверстие за счет использования последовательности лазерных импульсов заданной энергии и длительности. Такой характер генерации лазеров может быть обеспечен в режиме синхронизации продольных мод резонатора. Обработка материала последовательностью импульсов приводит к постепенному увеличению глубины отверстия вследствие испарения слоя за слоем с каждым импульсом. Конечная глубина отверстия определяется полной энергией серии импульсов, в то время как диаметр зависит от средних параметров отдельного импульса (как и диаметр светового пучка и фокальная каустика в зоне воздействия). [4]

В режиме МИО можно обеспечить очень высокое качество микроотверстий за счет минимизации оплавления стенок и дна отверстия. Для этого необходимо выполнить 2 следующих условия:

где – длительность лазерного импульса; – радиус лазерного пучка в фокусе; – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала.

Заметим, что метод МИО допускает использование различных вариантов подачи лазерного излучения в зону обработки. Помимо облучения материала неподвижным пучком (как при прошивке отверстий) лазерным лучом можно плавно обходить наружный диаметр отверстия (как при контурной резке) или придавать ему движение по спирали от центра к краям.[4]

Отношение глубины отверстия (толщины материала) к его диаметру (так называемое аспектное отношение) является мерой качества получения малых отверстий. При обычном механическом сверлении оно составляет 2:1, при ультразвуковом – 4:1. Важным достоинством лазерного сверления является то, что оно позволяет получить очень большие значения аспектного соотношения (до 11:1 – в керамике и до 100:1 – в менее прочных материалах). Кроме того, лазерная обработка обеспечивает более высокую точность размещения отверстий при значительном сокращении времени обработки деталей. [3]

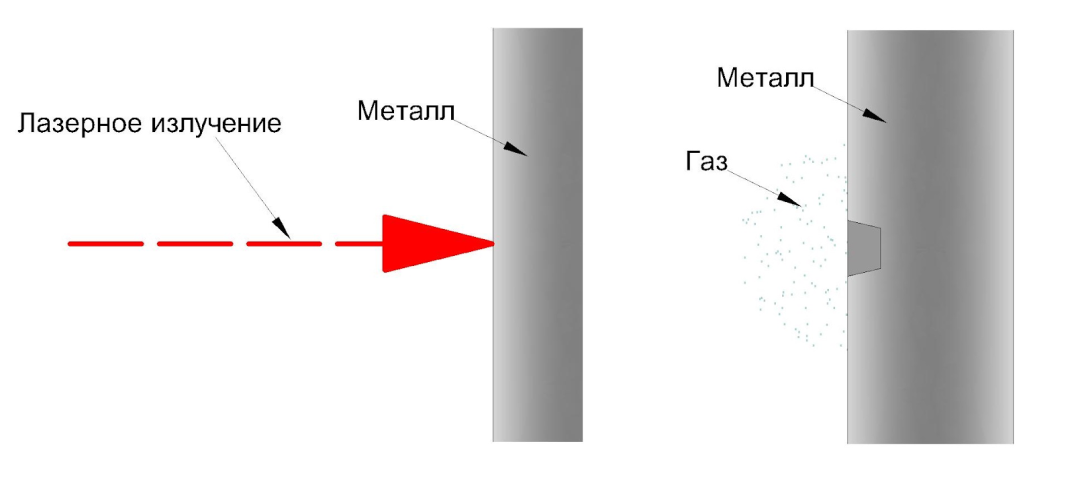


Рис. 1.1.1. Лазерная прошивка отверстий

## 1.2. Технология лазерного наклепа

Лазерный наклеп на сегодняшний день является одним из самых перспективных и широко используемых за рубежом методов поверхностного упрочнения. Метод лазерного наклепа известен как один из методов повышения сопротивления усталости, длительной прочности, коррозионному растрескиванию деталей машин и конструкций, эксплуатируемых в условиях повышенных температур и циклических нагрузок. Если детали, узлы машин и механизмов подвержены циклическим знакопеременным нагрузкам, равно как и значительным тепловым нагрузкам, то существует высокая вероятность образования микротрещин, рост которых может привести к разрушению детали. Метод упрочнения поверхности позволяет снизить вероятность образования микротрещин. [3]

Наклеп металлов и сплавов  – это изменение структуры и свойств металлов и сплавов под действием пластической деформации при температурах, лежащих ниже температуры рекристаллизации в состоянии "холодной" поверхности. Во время наклепа в металле происходит накопление части энергии деформации, которая расходуется на искажение кристаллической решетки с образованием преимущественно ориентированных текстур и изменением положения дислокаций. Наклеп сопровождается повышением прочности, твердости и снижением пластичности материала. После обработки в поверхностном слое детали создается благоприятная система сжимающих остаточных напряжений, которая выражается в повышении предела усталостной прочности, а иногда и износостойкости. Обычно наклеп осуществляют на специальном оборудовании при помощи обкатки роликами, дробеструйной обработки или ударными инструментами. [5]

Лазерное упрочнение поверхности обеспечивается ударной волной большой амплитуды, которая генерируется в лазерной плазме при помощи лазерных импульсов высокой энергии. Эффект упрочнения достигается за счет механической деформации в холодном состоянии, производимой ударной волной, а не термическим нагреванием поверхности излучением лазера, как в случае лазерной закалки. [2]

В самом общем случае поверхность обрабатываемой детали покрывают слоем-поглотителем (слой краски или пленки, которая хорошо поглощает лазерное излучение), непрозрачным для лазерного излучения. Затем добавляют слой прозрачного для лазерного излучения материала, это может быть вода или другая жидкость (которая может течь по поверхности детали, течение должно быть ламинарным, не иметь пузырьков и видимых завихрений). Сфокусированное лазерное излучение направляется на поверхность, оно проходит через прозрачный слой и взаимодействует со слоем-поглотителем.

При взаимодействии лазерная энергия адсорбируется внутри слоя-поглотителя, происходит его испарение и формируется плазменный факел. Давление в изолированной плазме быстро возрастает, вызывая ударную волну, которая идет в материал детали через остаток непрозрачного слоя поглотителя и наружу через слой прозрачного материала. Слой-поглотитель служит защитой от прямого контакта поверхности детали с плазмой. Прямое взаимодействие поверхности детали с плазмой, как правило, ведет к образованию расплава металла на поверхности на глубину до 15–25 мкм. Непрозрачный слой-поглотитель может быть сформирован из различных материалов: сухая или влажная краска, черная пленка, металлическая фольга, все они позволяют реализовать номинально одинаковые давления. [5]

Прозрачный слой изолирует плазму от атмосферы и служит отражателем акустической волны для создания более мощной ударной волны. Самый простой прозрачный слой – ламинарный поток воды. В этом случае давление, созданное плазмой на поверхности детали, увеличивается в 10 раз. Ударная волна, распространяясь в материале, приводит к улучшению свойств материала. Пластическая деформация от ударной волны при лазерном наклепе распространяется гораздо глубже, чем при дробеструйном упрочнении. Поэтому и сжимающие остаточные напряжения находятся на большей глубине материала. Более глубоко расположенные остаточные напряжения определяют улучшение свойств материала. В случае большой мощности ударной волны на поверхности детали можно наблюдать характерные отпечатки после обработки глубиной до нескольких микрон. [5]

## https://lh6.googleusercontent.com/NtJkyvw0ZxyQ2nIZLDyq6xCzJMtDYY9Y7Yy7xSlLjhWiQ1JN2FkZaLFUHH9DZKzkpRJOd9OgCxNaVbP5eid_BVa_d8Ote6dDJBF2EdOgc9Dh_cLpLkVNyuMFwvz1Q0Z1UjHrhczC

Рис. 1.2.1. Лазерный наклеп

**2. Разработка экспериментального раздела дипломной работы**

## 2.1. Установка для лазерной прошивки отверстий

Для проведения данной работы был выбран метод многоимпульсной обработки. Образец помещался в фокусе лазерного излучения и не менял своего положения в процессе обработки. В такой системе пиковая мощность в импульсе будет влиять на количество слоев, переводимых в газообразное состояние. Если мощность будет слишком велика, то будет образовываться плазма, и лишняя энергия будет переводиться в свечение плазмы, а также будет образовываться переплавленный слой внутри отверстия, необходима будет продувка отверстия для удаления плазмы из рабочей области. Если же мощности будет не хватать, то сверление не произойдет.

Для проведения эксперимента был произведён расчёт параметров установки для прошивки отверстий. В таблице 2.1 представлены исходные данные для расчёта. Расчет проведен для образца ВЖЛ14, однако остальные образцы имеют схожие параметры, так что расчет приближен к верному для всех образцов.

Разница температур, теплопроводность,  температуропроводность, коэффициент отражения, разница температур взяты из справочников, определяются материалом и постоянны для данного материала.

Длительность воздействия определяется режимом и существенно различен для режима свободной генерации и модуляции добротности. Рассмотрены крайние режимы: модуляция добротности и свободная генерация.

Табл. 2.1. Исходные данные

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Характеристика | Значение | Обозначение |
| Диаметр выходной апертуры лазера, м | 0,003 | D |
| Длительность импульса, с | 2,00 |  |
| Энергия в импульсе, Дж | 7,8 | Eсв |
| Энергия в импульсе, Дж | 0,1 | Eмод |
| Длительность импульса, с | 2,00 |  |
| Длина волны излучения, м | 1,06 | λ |
| Температура плавления материала образца, К | 1550 | Тп |
| Температура испарения материала образца, К | 1650 | Ти |
| Лабораторная температура, К | 300 | Тл |
| Температуропроводность образца, м2/с | 2,1 | α |
| Теплопроводность образца, Вт/мК | 11.4 | *k* |
| Коэффициент отражения поверхности | 0,741 | R |

Согласно данным из [4], пороговая плотность мощности qпор, необходимая для нагревания поверхности до заданной температуры Т в случае импульсного нагрева, рассчитывается по формуле:

,

где - Тн - начальная температура образца, k - теплопроводность образца, R - коэффициент отражения поверхности, α - температуропроводность образца, - длительность импульса.

В работе использовался Nd:YAG лазер с резонатором Фабри-Перо и усилителем в режиме модулированной добротности и фокусирующей линзой с фокусным расстоянием 102 мм.

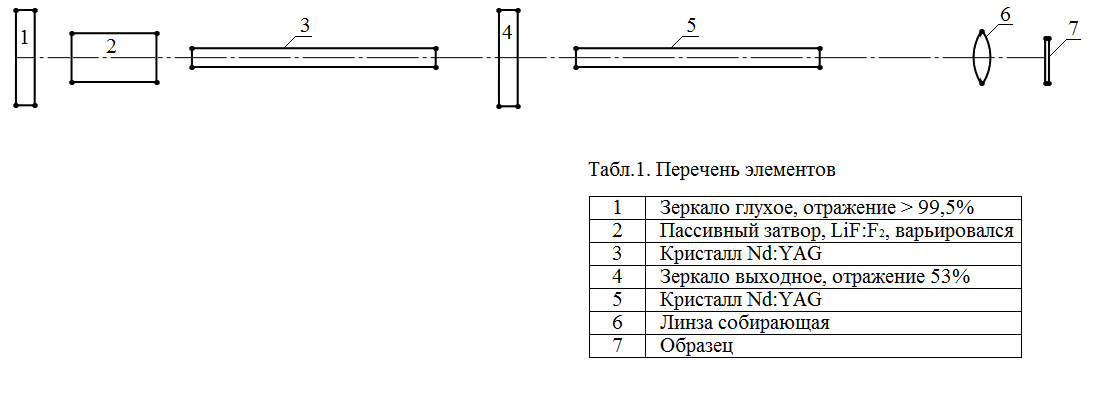


Рис. 3.1.1. Общий вид установки для лазерного сверления, 1 - Зеркало глухое, отражение >99,5%; 2 - Пассивный затвор, LiF:F2, варьировался; 3 - Кристалл Nd:YAG; 4 -Зеркало выходное, отражение 53%; 5 -  Кристалл Nd:YAG; 6 - Линза собирающая; 7 - Образец.

Таблица 2.2. Результат эксперимента

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Количество импульсов для пробития | Толщина пластины, мм | Отверстие  (Входное - слева, выходное - справа) |
| 15 | 3,8 | Image 06Image 03 |
| 100 | 4.3 | Image 07Image 07 |
| 103 | 4,6 | Image 05Image 04 |
| 262 | 6,2 | Image 04Image 05 |
| 4140 | 6,8 | Image 03Image 06 |



Рис. 2.1. Зависимость скорости пробития отверстий в жаропрочных сталях от толщины пластины

Как видно из графика, зависимость имеет экспоненциальный характер, что говорит о существенной зависимости целесообразности использования метода в отношении образцов разной толщины. Исследование скорости и возможности пробития на толщину при заданной мощности также позволяет судить о скорости падения плотности мощности внутри отверстия.

Для более тщательного рассмотрения процессов, происходящих внутри отверстия были пробиты отверстия в 3 мм металлической пластине сплава ВЖА-14 при энергии цуга 650 мДж в фокусе линзы, для которых были сделаны микрошлифы, что позволяет увидеть форму отверстия в продольном сечении, а также структурные изменения в металле из-за перегрева.

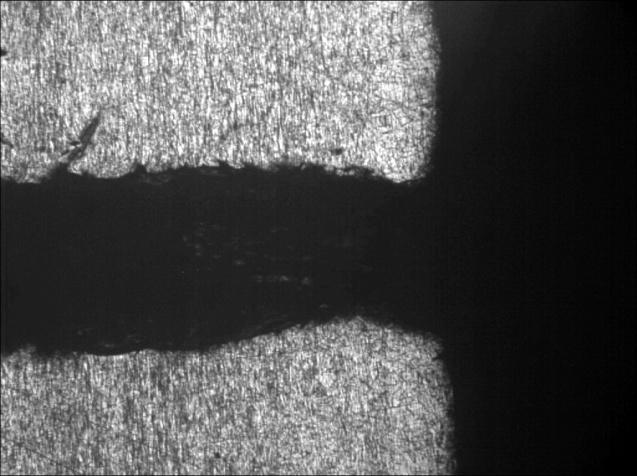
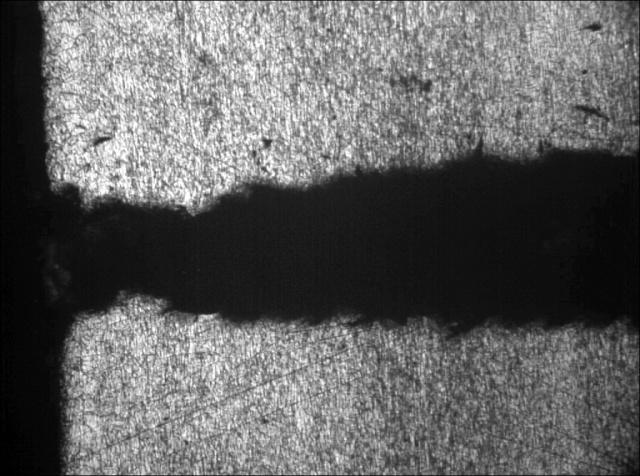


Рис. 2.2 и 2.3. Продольный разрез отверстия

Конусность отверстия проявляется неравномерно по всей длине, а наиболее сконцентрирована ближе к выходной грани пластины. Вероятно это связано с отдалением поверхности материала в отверстии от фокуса и соответствующим уменьшением плотности мощности, приходящейся на материал в месте пробоя отверстия. Ближе к выходу наблюдается расширение, это связано с новой возможностью плазмы вылетать через выходное отверстие.



Рис. 2.4. Увеличенный снимок края

Как можно видеть на рисунке 2.8, область возле выходного отверстия изменила свою структуру, однако измененный слой не простирается вглубь изделия. Изменений в структуре вдоль отверстия не наблюдается.

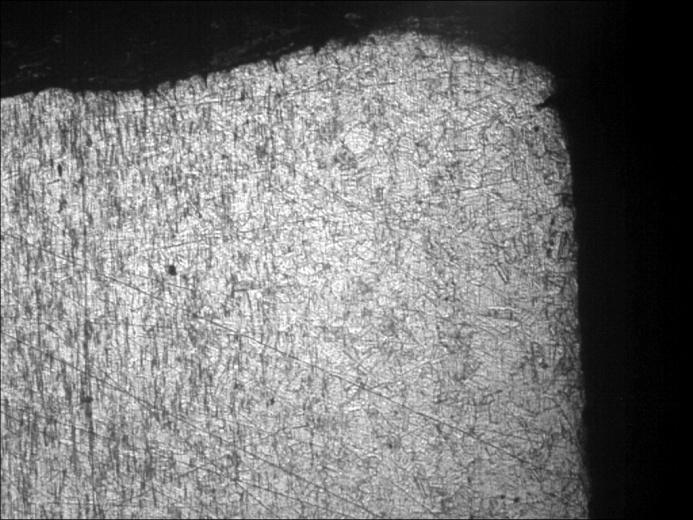
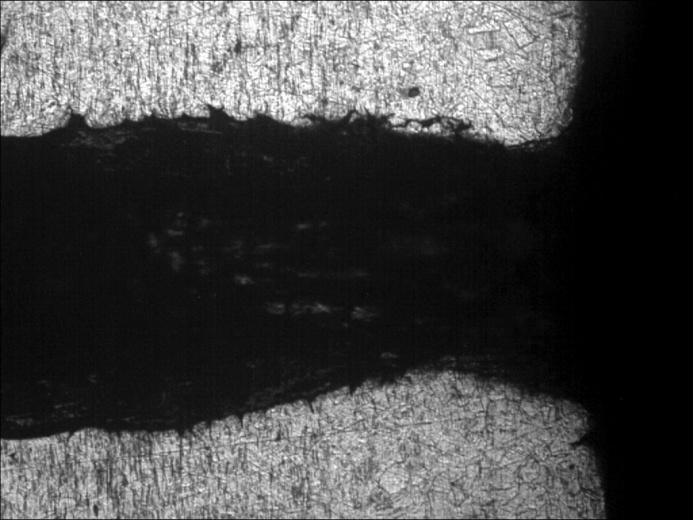


Рис. 2.5 и 2.6. Увеличенные снимки края

На рисунках 2.5 и 2.6 изображено входное отверстие. Как видно из рисунка 2.5, изменение структуры также происходит, причем область изменения больше, чем у выходного отверстия. На рисунке 2.6 можно видеть переход от измененной структуры к исходной структуре изделия, которая сохранилась в середине.

Кроме того, боковые стороны канала не однородны, а имеют четкие небольшие надрывы в виде трещин малого размера. Они представлены на рисунках 2.7 и 2.8.

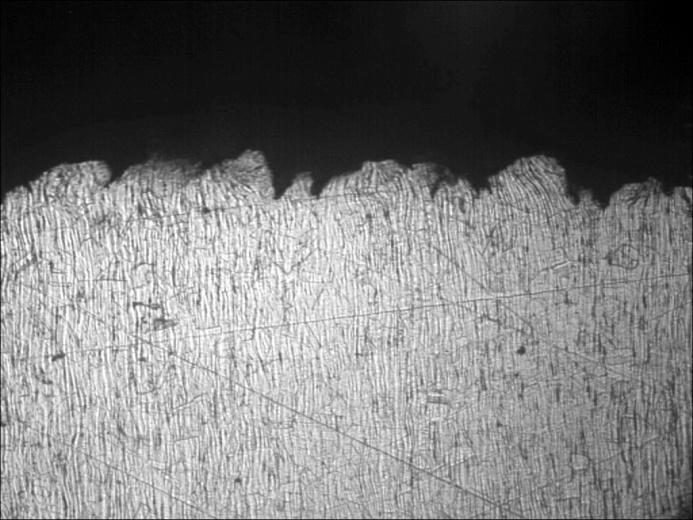
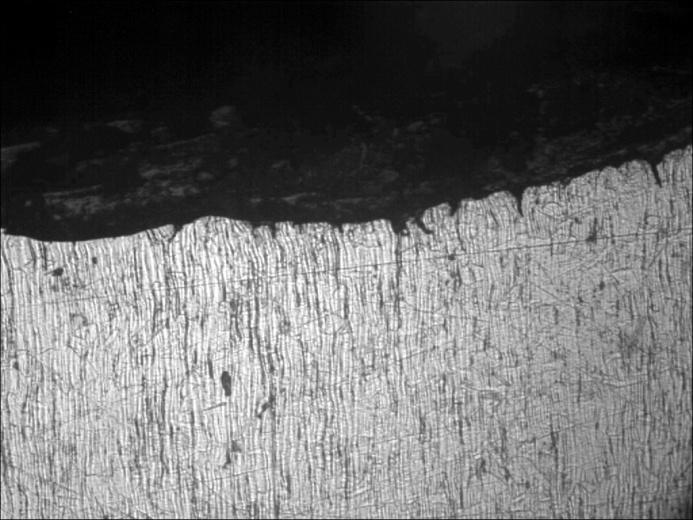


Рис. 2.7 и 2.8. Увеличенные снимки боковых сторон отверстия.

Вероятно это связано с остаточным нагревом материала, не превратившегося в газ в результате предыдущего импульса. Таким образом пограничные слои, не затрагиваемые ранее благодаря охлаждению от окружающей среды, теперь так же получают достаточное количество энергии и вырываются из кристаллической решетки, разрывая ее. При более высокой пиковой мощности этого эффекта можно будет избежать - вся энергия будет уходить на свечение плазмы, не оставляя остаточного нагрева до температуры плавления. Также решением может являться удаление расплава из отверстия с помощью продувки.

## 2.2. Установка для лазерного наклепа

Для проведения эксперимента был произведён расчёт параметров установки для наклёпа. В таблице 3.8 представлены исходные данные для расчёта.

Таблица 2.3. Исходные данные

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Характеристика | Значение | Обозначение |
| Требуемая плотность мощности, Вт/м2 |  | 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 апертуры 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), м2, 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 |  |

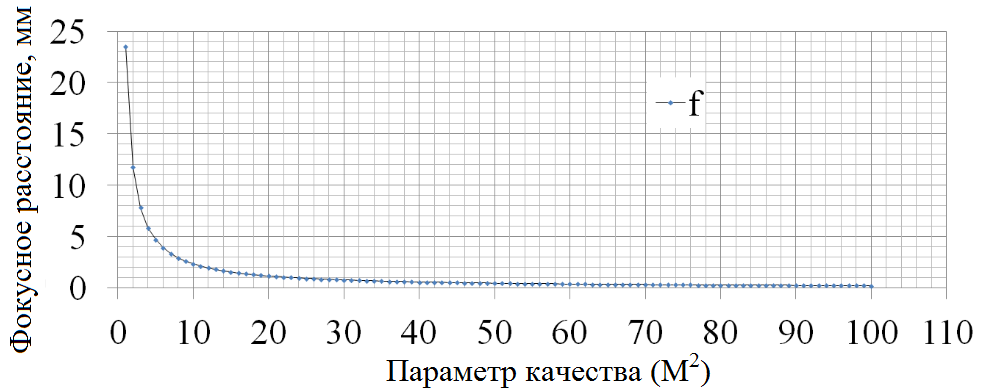
Для определения параметров системы при отклонении плотности мощности от заданного значения произведём вычисления повторно, но плотность мощности (W) заменим на (W x (dW/100)), тогда новое фокусное расстояние (f(dW)) примет значение:

f (dW) = 2,82 x 10-4 м

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

Δf = 6 х 10-5 м.

Так же качество излучения (параметр ) оказывает сильное влияние на фокусное расстояние линзы. На рис. 3.2.1.1 приведена зависимость фокусного расстояния линзы от параметра качества Данная зависимость позволяет определить линзу для фокусировки излучения с заданным .

  
Рис. 2.2.1. Зависимость фокусного расстояние от параметра качества

Исходя из данного расчёта была предложена схема установки (рис. 2.2.2).

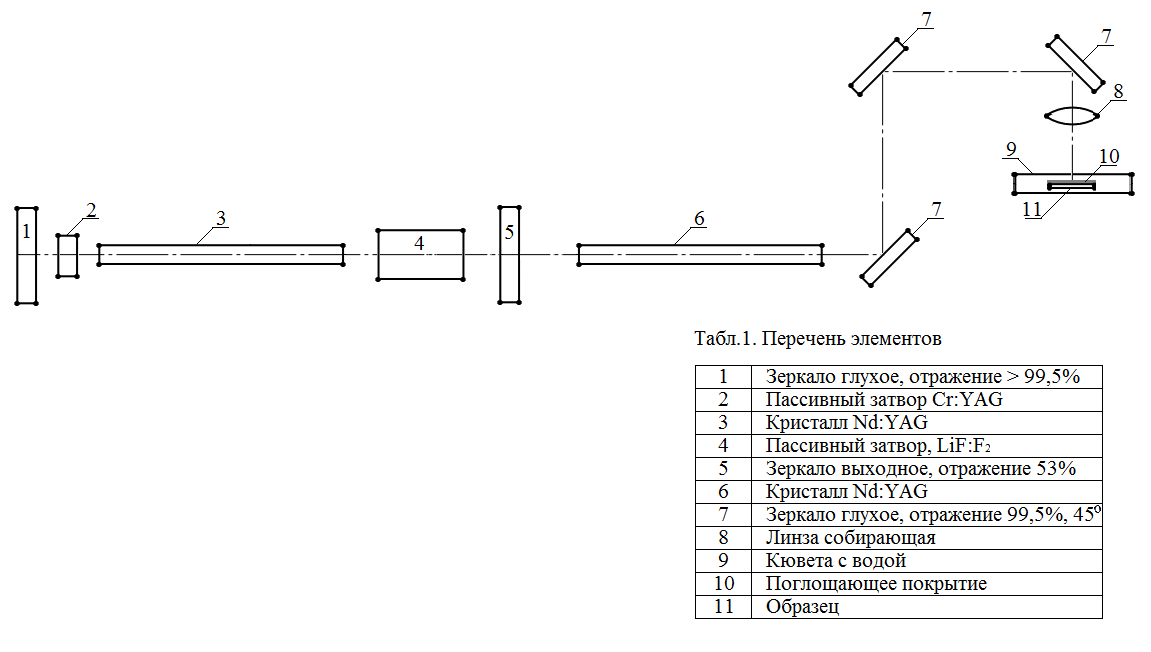


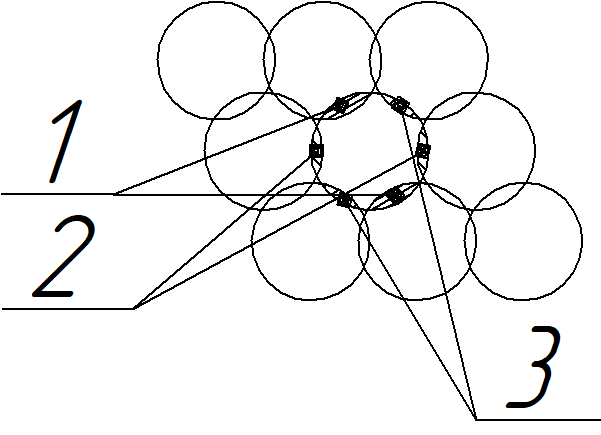
Рис. 2.2.2. Общий вид установки для лазерного наклепа, 1 - Зеркало глухое, отражение >99,5%; 2 - Пассивный затвор, Cr:YAG; 3 - Кристалл Nd:YAG; 4 - Пассивный затвор, LiF:F2; 5 - Зеркало выходное, отражение 53%;

6 - Кристалл Nd:YAG; 7 - Зеркало глухое, отражение 99,5%? 45o;

8 - Линза собирающая; 9 - Кювета с водой; 10 - Поглощающее покрытие; 11 - Образец.

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. 2.2.3).

  
Рис. 2.2.3. 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.

Для нахождения точного фокусного расстояния, а также размера отпечатка в фокусе проведена серия экспериментов с изменением фокусного расстояния и последующим измерением размера отпечатка. Измерения проводились на образце жаропрочного никелевого сплава ВКНА1В, наклепанном материале, без защитного покрытия.

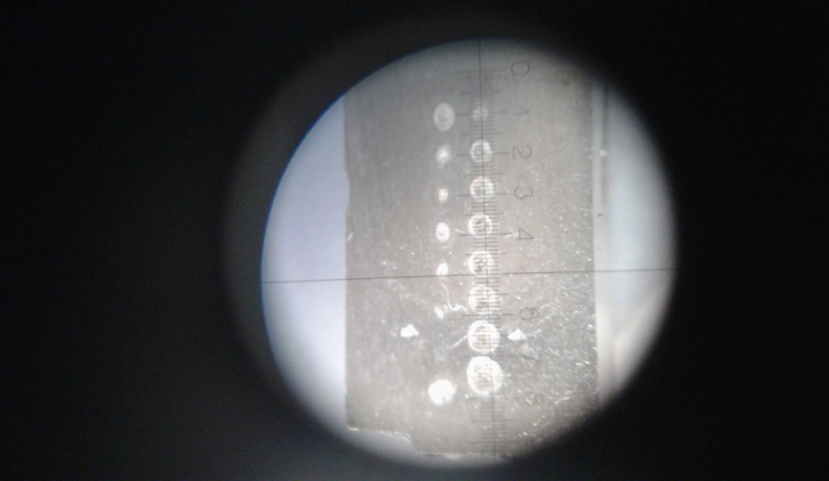


Рис. 2.2.4. Результат эксперимента

Табл. 2.4. Размер отпечатка в зависимости от фокусного расстояния

|  |  |
| --- | --- |
| Установка линзы по оси z, мм | Диаметр пучка (отн. ед.) |
| 56 | 5 |
| 56,5 | 3 |
| 57 | 2 |
| 57,5 | 3 |
| 58 | 4 |
| 58,2 | 4 |
| 58,4 | 4 |
| 58,6 | 7 |
| 58,8 | 4 |
| 59 | 5 |
| 59,2 | 6 |
| 59,5 | 6 |
| 60 | 6 |
| 60,5 | 7 |
| 61 | 7 |
| 61,5 | 8 |
| 62 | 10 |
| 62,5 | 19 |
| 63 | 21 |

Так как мощностные характеристики лазера находятся на пороговом значении возможного выполнения наклепа, то переплав поверхностного слоя может целиком прийтись на зону упрочнения, в связи с чем проведена серия экспериментов для нахождения оптимального поглощающего слоя, при использовании которого не будут происходить термические изменения поверхности. В качестве прозрачного для лазерного излучения слоя была выбрана вода, заключенная в кювету, куда погружался образец.

Для оценки толщины слоя воды будем исходить из поглощения излучения в слое воды. Согласно [1] 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.

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. В эксперименте проводились испытания на следующих покрытиях:

* Черная краска, один слой и много слоев
* Черный никель, гальваническое нанесение
* Лазерная гравировка поверхности
* Пескоструйная обработка поверхности
* Окалина, оксидная пленка
* Алюминиевая фольга, толщина покрытия 18 мкм



Рис. 2.2.5. Покрытие черной краской: слева в 1 слой, справа – в 3 слоя



Рис. 2.2.6. Покрытие черный никель



Рис. 2.2.7. Лазерная гравировка



Рис. 2.2.8. Пескоструйная обработка



Рис. 2.2.9. Окалина. Так как образец был поврежден не в фокусе, эксперимент в фокусе повторять не стали



Рис. 2.2.10. Отпечатки после фольги. Производилась обработка пяти точек с шагом 0.5 мм по фокусу от 58.5 до 61 мм

Покрытия черной краской и окалиной не предоставляет достаточного уровня защиты поверхности образца при рабочих плотностях мощности излучения. Оставшиеся три материала не дают возможности оценить повреждение металла. Кроме того, для дальнейшей обработки зачастую необходимо удалять с образца поглощающий слой. В случае лазерной гравировки и пескоструйной обработки сделать это можно было бы лишь механически, а снятие покрытия из черного никеля предполагает сильное химическое воздействие на поверхность, однако оно возможно без механических воздействий на образец. Покрытие из фольги является наиболее перспективным из представленных - на образцах с данного эксперимента отчетливо видно изменение профиля поверхности, а термических изменений не видно, кроме того ее достаточно просто отделить от поверхности образца.

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.

Для остальных покрытий, не показавших термического изменения поверхности были проведены эксперименты по наклепу. Эксперименты проводились на одном и том же материале, среднее значение твердости которого до обработки составило 332 HV.

Измерения твердости проводились до и после воздействия лазерным излучением по ГОСТ 2999-75 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу» с использованием индентора НП-1.

Таблица 2.5. Измерение твердости металла при различных покрытиях

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование покрытия | d1 | d2 |  | Значение твёрдости | Среднее значение твёрдости | СКО | Достоверность, % |
| Лазерная 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 |
| Пескоструйная обработка | 0,472 | 0,457 | 0,465 | 258 | 315 | 82 | 3,3 |
| 0,383 | 0,389 | 0,386 | 373 | 1,6 |

Таблица 2.6. Сравнение значения твердости до и после обработки с разными покрытиями

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование покрытия | Среднее значение твёрдости | | СКО | |
| до обработки | после обработки | до обработки | после обработки |
| Лазерная гравировка | 332 | 315 | 10 | 32 |
| Чёрный никель | 443 | 144 |
| Пескоструйная обработка | 315 | 82 |

Так как СКО до обработки и после обработки перекрываются, то результатом эксперимента следует считать невозможность лазерного наклепа на материале такой твердости с использованием данного лазере при любых рассмотренных покрытиях.

**Библиографический список**

1. Bertie J. E.; Lan Z. (1996). "Infrared Intensities of Liquids XX: The Intensity of the OH Stretching Band of Liquid Water Revisited, and the Best Current Values of the Optical Constants of H2O(l) at 25°C between 15,000 and 1 cm−1". Applied Spectroscopy. 50 (8): 1047–1057.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. -664 c.
3. Вакс Е.Д., Миленький М.Н., Сапрыкин Л.Г. Практика прецизионной лазерной обработки Москва: Техносфера, 2013. — 696c.
4. Парфенов В. А. П55 Лазерная микрообработка материалов: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.
5. Фотоника  [Выпуск #3/2014](http://www.photonics.su/journal/2014/3) Волков М., Кишалов А., Орлов Н., Серебряков В., Смирнов В., Филатов А.“Лазерная очистка и лазерный наклеп – технологии улучшения свойств поверхности”