

УДК 621

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО НАКЛЕПА

Анна Владимировна Бурак

Студентка 4 курса

кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Д.М. Мельников,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

Ключевые слова: лазер(laser), наклеп(peening), применения(applications).

Аннотация: Рассмотрен процесс лазерного наклёпа (ЛН) использующий модулированное лазерное излучение для поверхностной модификации. Обсуждено развитие технологии ЛН и её многочисленные преимущества перед традиционной дробеструйной обработкой (ДО), такие как лучшее качество поверхности, большая глубина и равномерность распределения остаточных напряжений. Аналогичные сравнения производились для ультразвуковой ударной (УУО) и ультразвуковой дробеструйной обработки (УДО). Рассматривались генерация ударных волн, параметры процесса и характеристики обработанных объектов. Особое внимание уделено влиянию параметров процесса ЛН на профиль остаточных напряжений свойствам и структурам материалов. Рассматривались результаты ЛН приводящие к увеличению поверхностной микро и нанотвёрдости, модуля упругости, предела прочности, изменению микроструктуры, приводящие к увеличению усталостной прочности, фреттинговой долговечности, коррозионной усталостной прочности, сопротивляемости, коррозионному растрескиванию и коррозионной стойкости.

1. Введение

Улучшение свойств поверхности стало обязательной частью производственных операций благодаря улучшению механических и металлургических свойств, таких как усталостная прочность, коррозионная стойкость, сопротивляемость износу и эрозии. Среди недавно развитых технологий поверхностной обработки существует технология ЛН. Эта технология, представляет собой процесс, при котором интенсивное лазерное излучение падает на поверхность и служит причиной образования ударных волн. Эксперименты по воздействию импульсного излучения на материалы впервые проводились с 1968 по 1981 гг. Исследования велись на алюминиевых сплавах и сталях для аэрокосмических применений. ЛН – это универсальный процесс способный изменять различные материалы, такие как твёрдые и мягкие металлы и тонкие плёнки. Эта методика считается потенциальным заменителем ДО процесса из-за более высокой глубины остаточных напряжений под поверхностью материала, примерно в 4-5 раз большей, чем в ДО и с более высокой интенсивностью и однородностью по всей поверхности. Кроме того, ЛН обеспечивает хорошее качество поверхности по сравнению с ДО, где шероховатость должна быть снижена шлифованием или полировкой для типичных применений связанных с износом. Мелкие поверхностные элементы не могут быть упрочнены методом ДО, но допускаются для ЛН. Кроме того ЛН сравнивается с методами УУО и УДО. Ударные волны здесь образуются за счёт пластической деформации самого материала. УУО изобретена в России в 1970-х и применялся для сварных соединений для снижения остаточных напряжений и увеличивая сопротивляемость усталости.

Применение ЛН включает увеличение сопротивления усталости, сопротивляемости коррозионному растрескиванию, коррозионной стойкости, износостойкости. Схожие УУО и УДО так же исследовались в увеличении усталостной долговечности, усталостной прочности, изменение микроструктуры и улучшение механических свойств, таких как твердость. Другое применение ЛН – это поверхностная обработка тонкостенных элементов. Процесс может быть интегрирован в производственную линию с высокой степенью автоматизации. ЛН также пригоден для обработки сложных геометрий благодаря преимуществами переноса лазерного излучения, в то время как с помощью УУО, это затруднено, так как необходим полный контакт с поверхностью.

2. Лазерный наклёп

ЛН – это механический процесс, в котором под действием лазерных импульсов генерируются ударные волны, распространяющиеся под поверхностью материала. Эти волны создают сжимающие напряжения максимальные на поверхности и уменьшающиеся вглубь материала.

2.1 Генерация ударных волн

Основные этапы образования ударных волн можно описать в следующей последовательности:

а) Образец покрывается поглощающим покрытием. Этот слой испаряется, образуя плазменный факел оказывающий давление в течение длительности импульса. Поглощающий слой предотвращает плавление и абляцию образца, за счёт чего достигается высокое качество поверхности. Без этого слоя преобразование энергии от давления к ударным волнам не может производиться эффективно. Этот слой может быть алюминием, медью, свинцом, виниловой плёнкой, цинком, или чёрной краской. Исследования показали, что чёрная краска – наиболее эффективное покрытие, где почти 100 % лазерной энергии передаётся плазме. Для алюминия этот параметр составляет порядка 80 %.

б) Прозрачный (трамбовочный) слой применяется для того, чтобы энергия не распространялась от поверхности, благодаря чему увеличивается интенсивность ударных волн. Этими слоями могут быть: вода, кварц, стекло, хрусталь, плексиглас или каучук. Выбор ограничивающей среды зависит исключительно от материала подложки, плотности и скорости звука, которые могут создать так называемый «эффект акустического импеданса».

Пластическая деформация возникает, когда нагрузка от ударных волн превышает динамический предел пластичности металла. Процесс ЛН схематично показан на рисунке 1. Пластическая деформация приводит к значительному увеличению и движению дислокаций, что оказывает влияние на микроструктуру и свойства материала. Увеличение ударных сил приводит к увеличению глубины пластических деформаций.

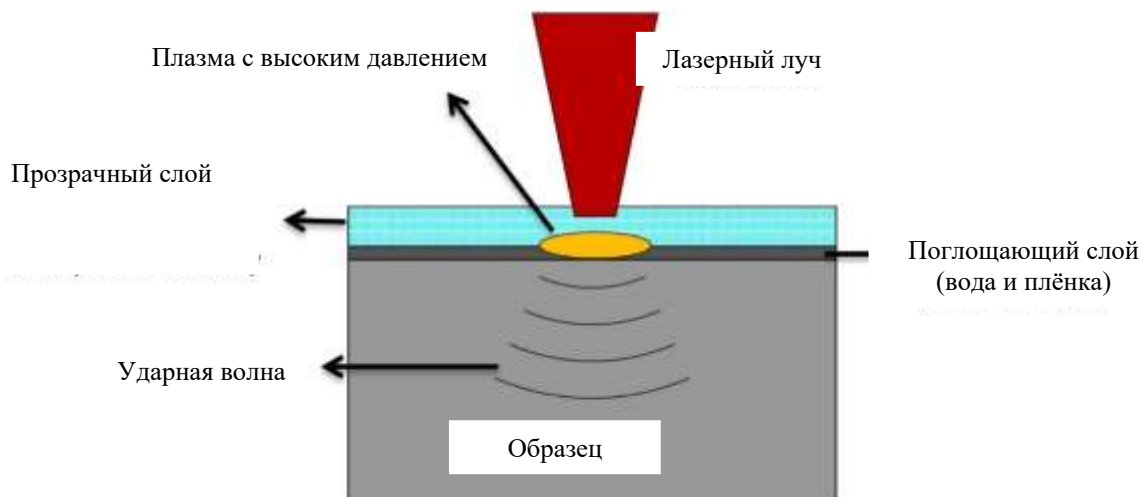


Рисунок 1 – Схема процесса лазерного наклёпа

2.2 Параметры процесса ЛН

Эффективность процесса ЛН зависит от материала образцы, параметров лазерного излучения, поглощающего и прозрачного покрытий. Типичные требования: Q-switch лазер, основанный на Nd:Glass, Nd:YAG, Nd:YVO₄, Yb:YAG. Используются разные длины волн: 1054, 532, 355 нм. Длительность импульсов давления равная длительности импульса лазерного излучения варьируется от 10 до 100 нс с энергией от 1 до 100 Дж на импульс и диаметром пятна от 1 до 6 мм. Геометрия пятна бывает: круг, эллипс, прямоугольник и квадрат. Причём квадрат является предпочтительной формой пятна благодаря лучшей равномерности по интенсивности остаточных напряжений и способности к перекрытию. Требуется частота менее 1 кГц и интенсивность от 1 до 10 ГВт/см². Для УУО используется частота от 15 до 100 кГц

2.3 Материалы для ЛН

Многие материалы были исследованы для процесса ЛН, типичные исследования включают в себя влияние ЛН на профиль остаточных напряжений, микроструктуру, механические свойства, усталостную и фреттинговую долговечность, коррозионную стойкость и т.д. Недавние исследования показали, что ЛН может быть использован для формообразования геометрии металлов, а так же исследования покрытий. Материалы которые обрабатывают при помощи ЛН: титановые сплавы, алюминиевые сплавы, различные стали, медные сплавы, цинк, никелевые сплавы, специальные сплавы, бронзы, магниевые сплавы, аморфные металлы (металлические стёкла), и другие материалы.

3. Применения лазерного наклёпа: настоящее и будущее положения

С момента появления ЛН показал отличный потенциал и применяемость в машиностроении, особенно в специальных применениях. Эта технология способна существенно улучшить свойства многих конструкционных материалов, благодаря увеличению глубины остаточных сжимающих напряжений и возможности контролировать процесс. Благодаря прогрессу в технологии ЛН, поставщики услуг, могут проводить процесс наклёпа на своих территориях и на территориях заказчика в связи с передовыми методами доставки лазерного луча, которые включают: фиксированный луч для движущихся деталей, перемещение луча для стационарной детали и сканирование луча для больших панелей. Кроме того, размер компонентов, начиная от небольших топливных форсунок до ста дюймовых панелей крыла могут успешно обрабатываться при помощи ЛН.

Такие отрасли, как аэрокосмическая используют ЛН и для коммерческих и для военных авиадвигателей, чтобы уменьшить вероятность усталостных поломок. Например, технология ЛН используется для двигателей таких военных самолётов, как F101-102-B-1B bomber, F110-129, F110-100, F110-132-F-16 fighter, F119-F-22 fighter, F118-100-B-2 bomber, F414-F/A-18E/F hornet, а так же коммерческих: CFM 56-B737, A320 Trent 500 Airbus, 340 Trent 800 Боинг 777, Trent 1000-Боинг 787, BR710-Gulfstream 500/550 BR725-Gulfstream 650. Широко применяется ЛН для лопаток газо- и паротурбинных двигателей. С 1991 г. Toshiba адаптировала ЛН в своих АЭС для обработки 10 оболочек реакторов. Потенциал использования ЛН в биомедицинских имплантах может быть использован для Mg-Ca сплавов, и др. Тем не менее, совместимость тканей и слоёв со сжимающими напряжениями необходимо изучать.

Недавние технологические разработки позволяют перейти к квадратной форме лазерного луча. Этот подход показал эффективные покрытие, перекрытие, равномерное уплотнение и улучшение качества поверхности для обработанного слоя по сравнению с круглым лучом. На рисунке 2 показана типичная форма обработки ЛН заготовки при квадратной форме луча. Геометрические неровность, такие как фаски, углубления, фигурные участки могут стать проблемой, так как большинство исследований проводится на плоских образцах. Больше исследований требуется для ЛН сложной геометрии.

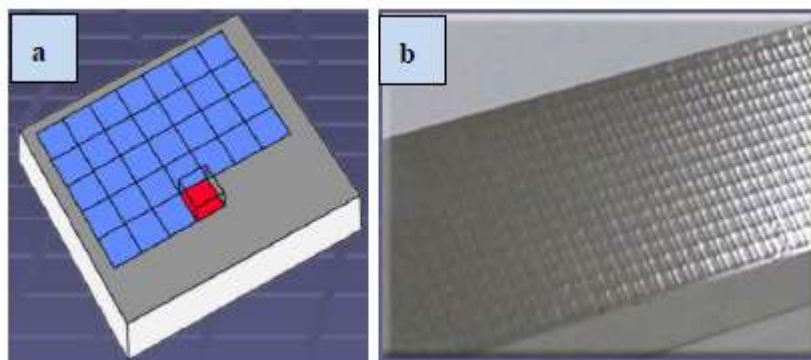


Рисунок 2 – Методика ЛН при квадратной форме лазерного луча (а) и обработанный компонент (b)

Учёными проводилось моделирование процесса ЛН в разных приближениях. Например, взаимодействие лазерного излучения с материалом используется для описания величины и формы импульса давления, профиля и распределения остаточных напряжений, лазерный теплопроводный нагрев, пластическую деформацию, остаточную упругую деформацию, микротрещины, поверхностную деформацию, поведение материала в зоне, граничащей с водным слоем, уплотнение порошка и поведение дислокаций. Успешно смоделированы рост усталостной трещины, тепловая релаксация остаточных напряжений и профили шероховатости поверхности. Численные модели и экспериментальные результаты показывают хорошие схождения, особенно для толстых образцов, хотя некоторые расхождения встречаются. Однако для тонких образцов моделирование затруднено из-за циклической пластической деформации в центральной области при сложной картине движения ударных волн.

ЛН для сварных соединений продемонстрировали улучшения в твёрдости, пределе текучести, сопротивляемости росту трещин и усталостной долговечности. Дальнейшая работа показала улучшения в усталостной долговечности для различных сварных швов стали SM490. Похожие исследования проводились и для УУО сварных швов. Это говорит о том, что сжимающие остаточные напряжения выгодны для сварных швов, независимо от технологии.

Технология ЛН так же может быть использована формообразования металлических деталей под действием высокогоэнергетических импульсов. ЛН позволяет создавать более тонкие геометрии и более резкие кривые, благодаря большой глубине остаточных сжимающих напряжений, чем это можно сделать при помощи ДО. Под действием напряжений происходит удлинение наклёпанной области, которое может привести к изгибу целой детали. В отличие от обычного механического формообразования, при ЛН формообразующие силы создают нежелательные растягивающие остаточные напряжения, что может привести к коррозионному растрескиванию и усталостному разрушению, что показано на рисунке 3. Для демонстрации возможностей ЛН Metal Improvement Company обрабатывала при помощи ЛН Al7050 толщиной 10 мм и радиусом около 230 мм, что показано на рисунке 4. Схожие формообразующие процессы исследовались для меди и Fe78Si9B13. Необходимо больше исследований для симуляции реальных условий работы изделий, где, например, напряжения могут быть релаксированы под действием температуры.

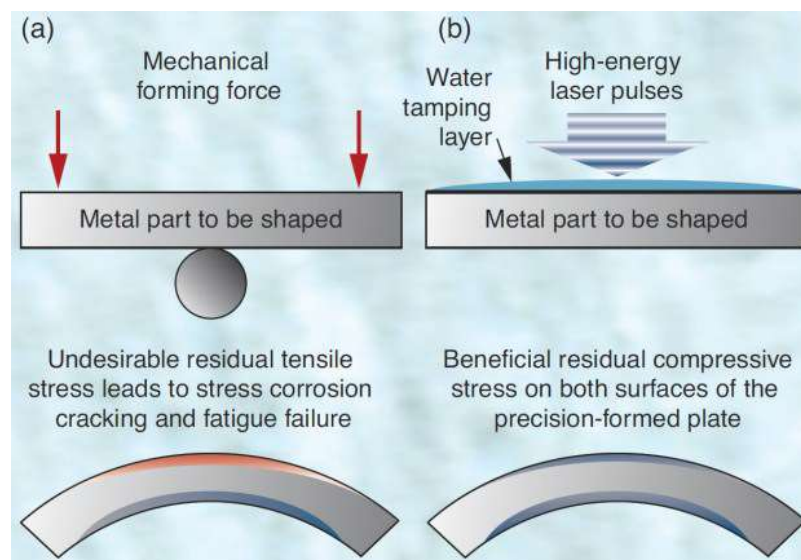


Рисунок 3 – Сравнение обычного (a) и лазерного (b) точного формообразования



Рисунок 4 – Формообразование заготовки из Al7050 толщиной 10 мм при помощи ЛН

Более того применяют лазерное динамическое формообразование (ЛДФ) для медной фольги. ЛДФ – это гибридный процесс, включающий преимущества ЛН и формообразования металлов. Типовая установка для ЛДФ показана на рисунке 5. ЛДФ создаёт высокую плотность дислокаций и измельчённую микроструктуру, что увеличивает прочность компонентов.

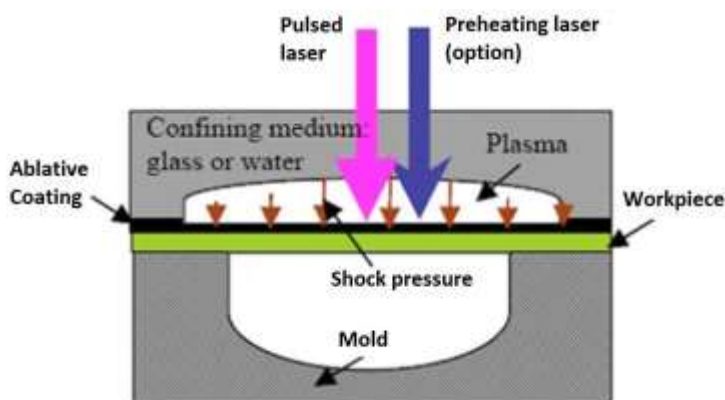
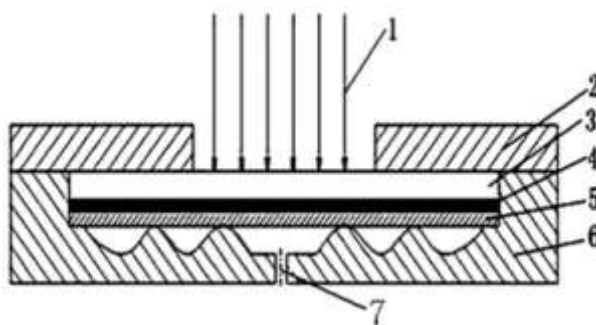


Рисунок 5 – Схема установки для ЛДФ

Существует также ЛДФ для спечённых композитов на структурированной 3-D поверхности. Установили, что полимер поглощает энергию ударной волны, что исключает негативный эффект для структуры композита. Кроме того, исследования влияния поверхностных дефектов и неровностей, изменения механических свойств и состояния подложки необходимы для дальнейшего совершенствования техники ЛДФ. Обратное формообразование после релаксации напряжений может представлять проблему для этой новой технологии. Более того, точность технологии может от разных параметров формообразования и

параметров ЛН, что приводит к изменениям в структуре поверхности. Например, изучали контроль точности формообразования сплава 3J53Ni в полувогнутом штампе, типовая схема которого показана на рисунке 6. Механический эффект от лазерной ударной волны использовался для пластической деформации металлического листа. Использовался неодимовый лазер на стекле с энергией от 10 до 40 Дж, длительностью импульса 22 нс и диаметром пятна 6 мм. В качестве поглощающей с сдерживающей сред использовались чёрная краска и стекло К9 соответственно. Определили, что для точного задания формы в полуштампе при помощи лазерной ударной волны оптимальной являлась энергия в 15 Дж, как показано на рисунке 7. Из этого рисунка очевидно, что для разных энергий импульса, воспроизводимость формы и контура штампа различаются. Тем не менее, более глубокое понимание того, как процесс влияет на механические свойства и микроструктуру, и такие эффекты как эффект пружины и обратная деформация по-прежнему необходимо. Более того, при переходе от макроформирования к микроформированию открываются перспективные направления исследований особенно для таких применений как: выпуклое формообразование, сварка и гибка. Так как при переходе к микроформообразованию необходим точный контроль параметров процесса, использование УУО является не очень подходящим, особенно для сложных геометрий, ввиду использования аппаратуры, которую надо держать руками. Использование ДО может не подходить ввиду высокой степени холодной работы, приводящей к высокой релаксации напряжений.



1 – Лазерный импульс; 2 – верхняя крышка; 3 – сдерживающий слой; 4 – поглощающий слой; 5 – образец; 6 – вогнутый штамп; 7 – выпуск воздуха

Рисунок 6 – Схема установки формообразования металлов под действием лазерной ударной волны с вогнутым штампом



Рисунок 7 – Результаты ЛДФ с вогнутым штампом при энергиях импульса 12, 15 и 18 Дж (слева-направо)

Использование лазерной ударной волны для тестирования адгезии покрытий является ещё одним интересным применением. Исследовали нарушение механизма сцепления гальванического от 70 до 90 мкм непористого и нешероховатого никелевого покрытия на медной подложке (от 120 до 190 мкм). Моделирование SHYLAC и HUGO были использованы для подтверждения результатов. И эксперимент и моделирование показали, что могут быть определены и усталостное и направленное отслоения. Тем не менее, больше исследований

необходимо для того, чтобы проверить эффективность и точность метода. Также исследовали поверхность композитов и других соединений с использованием техники лазерной инспекции сцеплений. Получили хорошие результаты для образцов 23 мм толщиной, но более толстые образцы представляют проблемы для применения этого метода. Тем не менее, больше исследования необходимо для сложных и многослойных покрытий для оптимизации процесса и достоверной количественной оценки адгезии.

В то время как много работ посвящено улучшениям материалов после ЛН с точки зрения сопротивления коррозии, мало работ встречается сопротивлению капельной эрозии. Тем не менее попытки такой работы были предприняты для таких материалов как Ti-6Al-4V применяемого для производства лопаток ГТД. Предварительные исследования показывают, что ЛН может быть потенциальным решением с точки зрения борьбы с капельной эрозией. Капельная эрозия – это особый вид эрозии с высокой скоростью капель, падающих на твёрдую поверхность. Механизм процесса соударения сложен в силу многих параметров, в том числе: скорости удара, угла удара, размера капель и распределения их по размерам, формы капель, частоты ударов и состояния исследуемого материала. Другие технологии лазерной обработки поверхности, такие как лазерное поверхностное легирование и лазерное азотирование показали улучшения в отношении водной эрозии. Например, использовали CO₂ лазер для модификации поверхности Ti-6Al-4V в инертной и азотосодержащей атмосфере. Улучшение на 10 % микротвёрдости и однородности микроструктуры увеличило сопротивление водной эрозии после 25 ч эрозии. Потеря массы образца при лазерной обработке составляла от 20 до 25 %. Этот подход может быть использован для того, чтобы проверить, какие факторы (твёрдость, глубина сжимающих остаточных напряжений, количество ударов и перекрытия) влияют на сопротивление водной эрозии. Микроструктурный анализ может играть важную роль в понимании различных этапов процесса эрозии, такие как инкубация, ускорение, замедление и разрушение. Синергетическое исследование может обеспечить более систематическое и научное объяснение эффектов ЛН на сопротивление водной эрозии. На основе этих применений можно заключить, что ЛН имеет больше перспектив, чем УУО и ДО. Это может быть связано с большей глубиной остаточных сжимающих напряжений, низким уровнем холодной работы, точностью и воспроизводимостью процесса. Тем не менее, в некоторых случаях, таких как снижение сварочных остаточных напряжений, УУО может быть конкурентоспособными с ЛН из-за более низкой стоимости и большей гибкости по сравнению с высокой стоимостью эксплуатации при использовании ЛН.

4. Проблемы процесса ЛН

Хотя ЛН имеет ряд преимуществ по сравнению с ДО, нельзя игнорировать и ряд недостатков. При ЛН возникают глубокие остаточные сжимающие напряжения, которые должны быть уравновешены с остаточными напряжениями. Это проблема, особенно при обработке тонких поверхностей, где под обрабатываемой поверхностью появляются растягивающие напряжения. Этот феномен наблюдается, когда сжимающие напряжения не проходят сквозь всю толщину образца. Возможным решением может быть двусторонняя обработка, которая встречается в аэрокосмических применениях. На самом деле, этот подход применялся в исследованиях разрушения кромки лопаток турбин из Ti-6Al-4V. Другой путь ограничения растягивающих напряжений – заведение их в некритические места. General Electric Infrastructure-Aviation (GEA) использовали оптимизационное математическое моделирование для решения этой задачи.

Изменения размеров – другая проблема метода ЛН, которая ведёт к деформации компонента. Она может быть связана с толщиной, параметрами ЛН и другими геометрическими зависимостями. Например, существующие исследования демонстрировали удлинение передних кромок крыла в радиальном направлении из-за остаточных напряжений, когда другие части деформировались в результате растягивающих напряжений. GEA показали, что в глубине

обнаружилось меньше кручения, чем на кромке. Дальнейшие исследования искажений при ЛН необходимы для получения подробной технической информации, для внедрения ЛН.

Отсутствие неразрушающего контроля и обеспечения качества – одна из важных проблем ЛН деталей. Такие технологии были бы очень полезны для внедрения ЛН. В настоящее время только разрушающая дефектоскопия, например, высокие или низкие испытания на усталость используются для оценки результатов ЛН для большинства материалов. Для успешного внедрения ЛН необходимо сочетание разрушающего и неразрушающего методов контроля.

При стремлении к максимальной величине остаточных сжимающих напряжений в процессе ЛН может происходить внутреннее разрушение компонентов. При такой обработке могут образовываться трещины толщиной до 0,002 дюйма по нормали к направлению распространения ударных волн. Для исключения таких дефектов необходимо аккуратно подбирать параметры и условия процесса ЛН.

Для каждой новой технологической разработки стоимость проведения исследований и внедрения в промышленность является серьёзной проблемой, и ЛН здесь не является исключением. ЛН – это дорогая технология в сравнении с ДО и УУО, особенно когда для применения важна эффективность характеристики работы компонента. По этой причине при многосерийном производстве компаниям сложно сделать выбор в пользу лазерного наклёпа выпускаемой продукции. Однако, внедрение ЛН в наиболее ответственных участках производственного процесса может помочь снизить расходы. Более того, исследования в области моделирования могут минимизировать стоимость исследований, путём сокращения необходимости прогонять все комбинации параметров процесса ЛН.

5. Заключение

Было показано, что ЛН – это процесс, который вызывает остаточные сжимающие напряжений до 5 раз более глубокие, более интенсивные, с большей однородностью по поверхности, чем традиционная технология ДО. Однако, ЛН полностью не заменил ДО, особенно в применениях, где используются покрытия. Многие исследователи сходятся во мнении, что обе технологии имеют свои преимущества, недостатки и проблемы. ЛН показал решающее преимущество в области повышения усталостной долговечности, сопротивляемости фреттинговому износу и коррозии ввиду измельчения микроструктуры и улучшения механических свойств. Эти улучшения были продемонстрированы в коммерчески доступных материалах, таких как: низкоуглеродистые стали, никелевые сплавы, нержавеющие стали, титановые сплавы, магниевые и алюминиевые сплавы. Недавние работы по лазерному формообразованию показали, что исследователи вышли за пределы повышения усталостной долговечности к более широкому спектру применений ЛН, где ещё требуется больше исследований.

Несмотря на достижения технологии ЛН, всё ещё требуется больше исследований для понимания процесса.

Существует много методов измерения остаточных напряжений, что приводит к расхождению в их количественной оценке на и под поверхность. Это может быть связано в внешней природой напряжений, оцениваемых по деформации материалов, что связано с соответствующими методами оценки. Однако экспериментальные исследования и моделирования могут привести к более точному предсказанию остаточных напряжений при особом внимании к геометрическим параметрам деталей.

Несмотря на то, что при помощи ЛН можно улучшать параметры материалов для медицинских имплантатов, до сих пор нет экспериментальных исследований, подтверждающих этот факт.

Возможность формообразования сложных и криволинейных геометрий при помощи ЛН может в некоторых случаях потенциально заменить обычные процессы обработки металлов давлением. Это связано с тем, что растягивающие напряжения полностью устраняются сжимающими остаточными напряжениями. Тем не менее, очень мало работ было опубликовано

в этой области и необходимо больше сведений касающихся температурных ограничений, угловых вариаций и явления обратной деформации. Стоит отметить, что технико-экономическое обоснование при помощи ДО может быть затруднено из-за высокого уровня холодной работы, что приводит к существенной релаксации напряжений. Использование УУО сопряжено со сложностями в области точности размеров ввиду того, что эта технология подразумевает использование ручного инструмента.

Процесс УУО показал сходие с ЛН улучшения в области усталостной долговечности сварных соединений. Однако мало сопоставлений этих процессов встречается в литературе. Однако с точки зрения стоимости процесса и участка обработки, особенно в сложных условиях УУО имеет преимущества перед ЛН ввиду простоты и мобильности оборудования.

Рассмотрены так же существенные улучшения материалов после ЛН с точки зрения сопротивления коррозии и коррозионного растрескивания под нагрузкой, что связано с измельчением микроструктуры и сжимающими остаточными напряжениями

Литература

1. Clauer, A.H.; Fairand, B.P.; Wilcox, B.A. Laser shock hardening of weld zones in aluminum alloys // *Metall. Trans.* 1977. №8 p. 1871–1876.
2. Генерации ударных волн и образование кратеров в твёрдом веществе при кратковременном воздействии лазерного импульса / Гуськов С.Ю. [и др.] // *Квантовая электроника*, 2004 №11 с. 989-1003
3. Zhang L., Li X., Nie Z. Microstructure and mechanical properties of a new Al–Zn–Mg–Cu alloy joints welded by laser beam // *Materials and Design* 2015, № 83 p. 453–458
4. Gujba A. Medraj M. Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening // *Materials* 2014, № 7, p. 7925-7974
5. Zhang X., Yang W., Xiao R. Microstructure and mechanical properties of laser beam welded Al–Li alloy 2060 with Al–Mg filler wire // *Materials and Design* 2015, № 88 p. 446–450
6. Dong Peng, Jun Shen, Qin Tang Effects of aging treatment and heat input on the microstructures and mechanical properties of TIG-welded 6061-T6 alloy joints // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 2013 V. 20, № 3, p, 259-265
7. Dane, C.; Hackel, L.; Daly, J. Shot peening with laser. *Adv. Mater. Process.* 1998, 153, 37–48.
8. Mordyuk, B.N. Milman, Y.V. Iefimov, M.O.. Characterization of ultrasonically peened and laser shock peened surface layers of AISI 321 stainless steel // *Surf. Coat. Technol.* 2008. № 202. p.4875–4883.
9. Wang, F.; Yao, Z.; Deng, Q. Experimental study on laser shock processing of brass. // *Metall. Mater.* 2007. №14. p. 529–532
10. Zhang, X.C.; Zhang, Y.K.; Lu, J.Z.; Xuan, F.Z.; Wang, Z.D.; Tu, S.T. Improvement of fatigue life of Ti-6Al-4V alloy by laser shock peening. *Mater. Sci. Eng. A* 2010, 527, 3411–3415.
11. Ocatia, L.; Morales, M.; Molpeceres, C.; Porro, J.A.; Abascal, J.G.; Zupaneic, M. Laser shock processing as a method for surface properties modification of metallic materials // 9th International Conference on Shot Peening, Paris, France. 2005. p. 466–471.
12. Luo, K.; Lu, J.; Zhang, L.; Zhong, J.; Guan, H.; Qian, X. The microstructural mechanism for mechanical property of LY2 aluminum alloy after laser shock processing // *Mater.* 2010. №31. p. 2599–2603.
13. Montross, C.; Wei, T.; Ye, L.; Clark, G.; Mai, Y. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: A review. *Int. J. Fatigue* 2006, 24, 1021–1036.
14. Peyre, P.; Fabbro, R. Laser shock processing: A review of the physics and applications. *Opt. Quant. Electron.* 1995, 27, 1213–1229.
15. Peyre, P.; Scherpereel, X.; Berthe, L.; Carboni, C.; Fabbro, R.; Béranger, G.; Lemaitre, C. Surface modifications induced in 316 L steel by laser peening and shot-peening. Influence on pitting corrosion resistance. *Mater. Sci. Eng. A* 2000, 280, 294–302

16. Ruschau, J.; John, R.; Thompson, S.R.; Nicholas, T. Fatigue crack nucleation and growth rate behavior of laser shock peened titanium. *Int. J. Fatigue* 1999, 21, 199–209.
17. Martinez, S.A.; Sathish, S.; Blodgett, M.P.; Shepard, M.J. Residual stress distribution on surface-treated Ti-6Al-4V by X-ray diffraction. *Exp. Mech.* 2003, 43, 141–147.