

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»



Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева
Кафедра машиностроение

Кайырбеков Алихан Кайырбекулы

Исследование влияния лазерного излучения на свойства
штамповочных сталей

Магистерская диссертация (проект)

7M07112 – Цифровизация
машиностроительного
производства (научно-педагогическое/
профильное направление)

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева

Кафедра машиностроение

7M07112 – Цифровизация машиностроительного производства

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
Машиностроение
доктор Ph.D.

 Нугман Е.З.

«___» _____ 20___ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Кайырбеков Алихан Кайырбекулы

Тема: Исследование влияния лазерного излучения на свойства штамповочных сталей

Утверждена приказом ректора №548-П/0 №___ от «04» 12 2023 г.
(*куруирующй проректор*)

Срок сдачи законченной диссертации «13» 06 2024 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: Методическое пособие для выполнения магистерской диссертации кафедры машиностроения.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) общая характеристика штамповых сталей и их технологические и механические свойства;
- б) свойства поверхности, модифицированные лазером;
- в) воздействие лазерного излучения на параметры штамповых сталей;
- д) приложения.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): 18

Рекомендуемая основная литература:

- 1 Позняк Л.А. Инструментальные стали. – М., «Металлургия», 1977. – 168 с.
- 2 Roberts G. Tool steels. – London, 1998. – 341 p.
- 3 Курдюмов Л.Н. Материаловедение. – М.: Машиностроения, 2020. – 54 с.
- 4 Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
- 5 Paschotta R. Laser Surface Modification // RP Photonics Encyclopedia. – 2024. – 7. – pp 218-226.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Общая характеристика штамповых сталей и их технологические и механические свойства	11.01.2024	Воложкино
Свойства поверхности, модифицированные лазером	20.02.2024	Воложкино
Воздействие лазерного излучения на параметры штамповых сталей	17.04.2024	Воложкино
Подготовка диссертации к защите	01.06.2024	Воложкино

Подписи

консультантов и норм контролера на законченную магистерскую диссертацию
с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименование разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Основной раздел	доктор Ph.D., ассоциированный профессор Удербаяева А.Е.	11.03.24	
Заключение и выводы	доктор Ph.D., ассоциированный профессор Удербаяева А.Е.	13.05.24	
Норм контролер	доктор Ph.D., ассоциированный профессор Аблқайыр Ж.Н	30.05.2024	

Научный руководитель

Удербаяева А.Е.

Задание принял к исполнению обучающийся

Кайырбеков А.К.

Дата

« 11 » 01 2024 г

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Кайырбеков Алихан Кайырбекулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ШТАМПОВОЧНЫХ СТАЛЕЙ НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

Научный руководитель: Асемгуль Удербаета

Коэффициент Подобия 1: 0.5

Коэффициент Подобия 2: 0.3

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 8

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

Дата



Заведующий кафедрой

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Кайырбеков Алихан Кайырбекулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ШТАМПОВОЧНЫХ СТАЛЕЙ НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

Научный руководитель: Асемгуль Удербаета

Коэффициент Подобия 1: 0.5

Коэффициент Подобия 2: 0.3

Микропробелы: 0

Знаки из здругих алфавитов: 8

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрыва плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

Дата

11.06.24.

Базирдаи В.Б.

проверяющий эксперт

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	6
1	Аналитический обзор	9
1.1	Инструментальные стали и их классификация	9
1.2	Характеристика штамповых сталей и их изготовление	14
1.3	Свойства и классификация штамповых сталей	17
2	Методическая часть	24
2.1	Особенности метода лазерной обработки	24
2.2	Методы лазерной модификации поверхности	29
2.3	Свойства поверхности, модифицированные лазером	35
3	Экспериментальная часть	43
3.1	Воздействие лазерного излучения на параметры штамповых сталей	43
3.2	Влияние технологических параметров на глубину модифицированного слоя	47
3.3	Влияние технологических параметров на твердость и шероховатость поверхности	52
3.4	Влияние скорости нагрева и охлаждения на твердость	58
	Заключение	61
	Список используемой литературы	64

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В течение многих лет проводились исследовательские работы по улучшению свойств поверхности материалов, чтобы они лучше выдерживали высокие температуры, износ и трение, путем нанесения покрытий или модификации поверхности. Несмотря на то, что были разработаны различные передовые материалы со значительными свойствами, тем не менее, когда речь заходит о конкретном применении в области обработки поверхностей, физические свойства материалов являются одними из других факторов, которые необходимо учитывать, включая практичность, стоимость и временные затраты. В настоящее время актуальная проблема возникает в дорогостоящей подготовке штампов, которая включает в себя проектирование инструмента, выбор материала, его термообработку и разработку параметров процесса литья с целью сохранения свойств поверхности и продления срока службы.

Благодаря быстрому прогрессу в области обработки поверхностей традиционные методы обработки, такие как науглероживание и пламенная закалка, были заменены методами, использующими передовые источники тепла, такие как плазма, лазер, ионы и электроны. В настоящее время мощные лазеры получают все большее признание в качестве инструментов для многих применений – от резки до сварки и методов модификации поверхности. В производстве штамповочных стальных деталей также все чаще используются лазерные технологии, обеспечивающие большую точность и контроль обработки материала. Также было доказано, что лазерная обработка позволяет получать адгезивные, твердые, стойкие к износу, коррозии, усталости и разрушению покрытия на различных материалах. Другими словами, кристаллическая структура поверхности металлов действительно может быть модифицирована в очень мелкие неравновесные микроструктуры в результате быстрого затвердевания с помощью лазерной модификации поверхности.

Использование инструментальной стали (в частности H13) в штампах даже при высоких температурах требует замены штампа после тысяч циклов литья алюминия или еще меньшего количества циклов для отливок из латуни. Различные исследования показывают, что обработка поверхности и нанесение покрытий являются наиболее эффективными методами защиты поверхностей штампов от термической усталости и продления срока службы штампов за счет уменьшения повреждений на контактирующих поверхностях. Из-за высокой температуры и циклической эксплуатации часто происходят поломки штампов для литья под давлением, используемых в металлургической промышленности. Эти суровые условия в конечном итоге приведут к повреждению поверхности и выходу из строя штампов из-за некоторого сочетания термической усталости, термоконтроля, эрозии, коррозии под напряжением и пайки.

Лазерная модификация поверхности была изучена как способ упрочнения поверхности матрицы, чтобы предотвратить преждевременный

выход матрицы из строя во время литья путем создания слоя высокой твердости на поверхности подложки. В настоящее время применяются технологии нанесения покрытий для увеличения срока службы штампов, хотя трудно удовлетворить многие требования к покрытиям, связанные с отличным сцеплением, достаточной толщиной, отсутствием дефектов, подходящими механическими свойствами, устойчивостью к термическим ударам и высокой температурной стабильностью

Объектом исследования являются штамповые стали, в частности штамповая сталь Н13, которая широко используется в инструментах для горячей и холодной обработки.

Предметом исследования является влияние лазерной обработки на свойства штамповых сталей.

Цель научной работы состоит в экспериментальном исследовании процессов воздействия лазерного излучения на параметры штамповой стали для того, чтобы получить модифицированный поверхностный слой с улучшенными свойствами твердости и минимальной шероховатостью. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- раскрыть общую характеристику штамповых сталей и определить их технологические и механические свойства;
- установить особенности метода лазерной обработки;
- проанализировать свойства поверхности, модифицированные лазером;
- экспериментальным методом выявить воздействие лазерного излучения на параметры штамповых сталей, в том числе влияние технологических параметров на глубину слоя, на твердость и на шероховатость поверхности.

Научная новизна. В настоящее время лазерная обработка материалов хорошо зарекомендовала себя в промышленности для различных применений, таких как сварка, резка, наплавка и т.д. Эти процессы в основном связаны с температурами, превышающими температуру плавления и даже достигающими температуры кипения. Однако влияние более высоких температур на энергетическую связь лазерного излучения до сих пор практически не изучено. Таким образом, научная новизна магистерской диссертации выражена в комплексном исследовании влияния лазерной обработки на свойства штамповочных сталей. В ходе экспериментальной части были выявлены такие вопросы, как влияние технологических параметров на глубину модифицированного слоя, на твердость и шероховатость поверхности штамповой стали Н13.

Методологическая основа исследования. В ходе исследования применялись эмпирические и теоретические методы. Проводилось экспериментальное исследование свойств штамповых сталей в зоне лазерного излучения; последующая статистическая обработка полученных результатов; сравнение результатов моделирования с экспериментом; экспериментальное изучение взаимосвязи лазерной обработки с характеристиками поверхности стали.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационного исследования были представлены на международных научно-практических конференциях «Интеграция энергетики и машиностроения: инновационные технологии и практики» и «International Satbayev conference». По теме диссертации были опубликованы 2 статьи, в которых нашли отражение теоретические принципы и выводы работы:

- Исследование влияния лазерного излучения на свойства штамповочных сталей // Материалы международной научно-практической конференции «Интеграция энергетики и машиностроения: инновационные технологии и практики», 2023;

- Исследование влияния лазерного излучения на свойства штамповочных сталей // Материалы международной научно-практической конференции «International Satbayev conference», 2023.

Структура диссертационного исследования. Работа состоит из введения, 3 глав, 10 подглав, заключения и списка используемой литературы.

1 Аналитический обзор

1.1 Инструментальные стали и их классификация

Инструментальные стали – это нелегированные или легированные стали, которые в основном используются для обработки и формовки других материалов. Термин «инструментальная сталь» относится к группе сплавов на основе железа, пригодных для изготовления формообразующих инструментов. Инструментальные стали используются для производства металлических деталей в различных отраслях промышленности. Например, на долю автомобильной промышленности приходится почти 44% металлических деталей в мировом масштабе. Рост производства автомобилей в таких странах, как США, Китай, Япония и Германия, привел к увеличению спроса на инструменты этого типа [1].

Наряду с увеличением спроса со стороны автомобильной промышленности мировой рынок штамповки и пробивки металлов растет устойчивыми темпами. Ожидается, что мировой рынок штамповки металлов будет расти с ежегодным темпом роста 3 %. С увеличением использования металлов в различных областях, таких как транспорт, аэрокосмическая, автомобильная и прецизионная промышленность, растет и спрос на инструменты для холодной штамповки [2].

Применимость инструментальных сталей определяется их свойствами. Эти стали характеризуются высокой твердостью, пределом текучести и стойкостью к истиранию. Для достижения этих свойств при производстве инструментальных сталей необходимо уделять особое внимание их высокой чистоте и однородности.

Основными свойствами инструментальных сталей являются:

- износостойкость;
- твердость;
- жаропрочность;
- коррозионная стойкость;
- полируемость;
- прочность на сжатие;
- способность к азотированию;
- способность к нанесению покрытий [3].

На эти свойства влияют химический состав и микроструктура. Так, например, углерод определяет доступную твердость, прочность, прокаливаемость, температуру начала (M_s) и окончания (M_f) мартенситного превращения [4]. Хром повышает прокаливаемость, износостойкость, стойкость кромок и коррозионную стойкость [5]. Ванадий рафинирует первичное зерно, повышая тем самым вязкость, износостойкость, стойкость кромок и жаропрочность. Карбиды вольфрама повышают жаропрочность и износостойкость при высоких температурах. Кобальт предотвращает рост зерен при высоких температурах [6]. Структура и размер зерна

инструментальных сталей также влияют на свойства [7], которые могут зависеть от технологии производства сырья, т.е. обычной, переплавленной или порошковой металлургии, горячей или холодной штамповки и термической обработки [8].

Инструментальные стали классифицируются по крайней мере по трем различным системам:

- состав;
- твердость;
- свойства (в качестве альтернативы инструментальные стали могут быть классифицированы в зависимости от области применения).

Классифицируемые по составу инструментальные стали можно разделить на три основные группы.

- 1) Гиперэвтектоидные (часто обозначаемые как ледебуретические) и эвтектоидные стали с твердостью 60- 65 HRC или выше,
- 2) ледебуритные стали с твердостью 45- 55 HRC и
- 3) высоколегированные низкоуглеродистые стали с твердостью 40- 60 HRC [3].

Однако, поскольку инструментальные стали различного состава могут демонстрировать схожие характеристики, данная система классификации представляет только научный интерес. Классификация по твердости недостаточна для правильного выбора. Согласно системе классификации, разработанной Американским институтом черной металлургии (AISI), инструментальные стали можно разделить на семь различных групп в зависимости от таких важных характеристик, как легирующие элементы, термообработка и область применения. К этим группам относятся:

- быстрорежущие стали,
- стали для холодной обработки,
- стали для горячей обработки,
- ударопрочные стали,
- стали специального назначения для литья под давлением
- стали, закаливаемые водой [9].

Подгруппа инструментальных сталей для холодной обработки предназначена для рабочих температур ниже 200 °С. Как правило, высокое содержание углерода и легирующих элементов повышает прокаливаемость. Кроме того, высокое содержание карбидов повышает износостойкость, но снижает вязкость. Быстрорежущие стали расширяют диапазон применения до более высоких температур, что позволяет использовать их при более высокой скорости резания. Это достигается за счет добавления хрома, вольфрама, молибдена и ванадия. Стали для горячей обработки, напротив, демонстрируют твердость, прочность и вязкость при повышенных температурах примерно на 100 °С ниже температуры отжига. Это достигается за счет низкого содержания углерода, но значительного количества легирующих элементов, таких как хром и вольфрам. Устойчивость к тепловому удару и оптимальная теплопроводность являются дополнительными свойствами, необходимыми

для сталей, предназначенных для горячей обработки [10]. Более подробная классификация инструментальных сталей согласно стандарту AISI представлена на таблице 1.

Таблица 1 – Классификация инструментальных сталей согласно стандарту AISI [9]

Классификация AISI	Разделение на группы по стандартам AISI	Важная групповая характеристика	Основные легирующие элементы	Примеры применения
Быстрорежущие стали	Группа M, обогащенная Mo	Высокая твердость для высокоскоростной резки материалов, красная твердость.	C, Mo, W, V, Cr	Всевозможные режущие инструменты.
	Группа T, обогащенная W		C, W, V, Cr, Co	
Сталь для холодной обработки	Группа A, воздушная закалка	Глубокая закалка на воздухе (до 100 мм)	C, Mn, Cr, Mo	Пуансоны, штампы для формовки и чеканки монет Штампы длительного пользования для вырубки. Штампы для вырубki и штамповки
	Группа D, с высоким содержанием Cr	Высокая износостойкость при нормальной температуре.	C, Cr, (Mo)	
	Группа O, отверждение в масле	Высокая износостойкость при нормальной температуре	Варьируется	
Стали для горячей обработки	Группа H, Cr-стали для горячей обработки	Глубокая закалка, высокая ударная вязкость	C, Cr, W, (V)	Штампы для экструзии Al и Mg. Экструзионные штампы для латуни, никелевых сплавов и стали.
	Группа H, W - стали для горячей обработки	Улучшенная термическая стабильность по сравнению с Cr-сталями для горячей обработки, свойства которых аналогичны HSS	C, W, V, Cr, Co	
	Группа H, Mo-стали для горячей обработки		C, Mo, W, V, Cr, Co	
Ударопрочные стали	Группа S	Высокая устойчивость к ударным нагрузкам	Mn, Si, Cr, W, Mo	Зубила, молотки, перфораторы
Сталь для литейных форм	Группа P	Низкая стойкость к размягчению при повышенных температурах.	Cr, Ni	Пресс-формы, пресс-формы с критической отделкой.
Стали специального назначения	Группа L	Низколегированные стали. Группа W - обладает повышенной прочностью по сравнению со сталями группы L.	Cr, V, Ni, Mo	Варьируется
Закаленная в воде сталь	Группа W		C	

Быстрорежущие стали (БРС). По определению, быстрорежущая сталь обладает высокой твердостью, позволяющей осуществлять высокоскоростное резание материалов. Поэтому эти стали в основном используются как всевозможные режущие инструменты, но некоторые марки также подходят для холодной обработки. Стали часто содержат ~ 20 весовых процентов легирующих элементов. Основными легирующими элементами являются молибден и/или вольфрам, хром, ванадий, кобальт и углерод. Быстрорежущие стали делятся на две группы: М (молибденовые) и Т (вольфрамовые) в зависимости от того, какой атомный процент молибдена или вольфрама является наибольшим. Два быстрорежущих сплава, содержащие одинаковые общие молярные доли легирующих элементов, но с той разницей, что один содержит вольфрам, а другой - молибден, равны по своим характеристикам [11].

Быстрорежущие стали могут быть закалены до 65-70 HRC, и они обладают очень высокой износостойкостью. Высокая твердость этих сталей в сочетании с красной твердостью (то есть способностью противостоять размягчению при температурах, достаточно высоких для того, чтобы сталь излучала свет в красной части видимого спектра) объясняет, почему быстрорежущие стали в основном применяются в качестве режущего инструмента. Красная твердость объясняется осаждением мелких карбидов вторичных легирующих элементов, которые когерентны с матрицей [12].

Стали для холодной обработки. Стали для холодной обработки не предназначены для сопротивления размягчению при повышенных температурах и поэтому применяются только при температурах ниже ~200-260°C. Они делятся на три группы: А (стали воздушного твердения), D (высокоуглеродистые, высокохромистые стали) и О (стали масляного твердения) [12]. Основные легирующие элементы различаются для всех трех групп, но в целом общее содержание легирующих элементов слишком мало для получения высокотемпературных сталей [6]. Даже детали достаточно больших размеров, изготовленные из сталей для холодной обработки, не изменяют своей формы при закалке. В целом, эти стали безопасны для закалки и классифицируются как недеформируемые [13].

Закаленная в воде сталь. Водонепроницаемые стали обозначаются как стали группы W. По сути, это простые углеродистые и низколегированные стали. Основным легирующим элементом является углерод, но для измельчения зерна, повышения износостойкости и (в меньшей степени) улучшения прокаливаемости часто добавляют небольшие количества хрома и ванадия. Эти инструменты обладают низкой стойкостью к размягчению при повышенных температурах. Они используются для работ с ограниченной динамической нагрузкой и низкой скоростью, таких как речной инструмент, деревообрабатывающий и гравировальный инструмент [14].

Низколегированные стали специального назначения. Низколегированные стали специального назначения обозначаются как стали группы L. Основными легирующими элементами в них являются хром и

ванадий. Кроме этих элементов, они содержат 0,50-1,10 мас.% углерода и небольшое количество никеля и молибдена. Стали типа L2 имеют неглубокую закалку. Закалка в масле позволяет достичь твердости 57 HRC в сечении 13 мм. Закалка сталей типа L6 в масле приводит к поверхностной и приповерхностной твердости 64 HRC, сохраняя твердость выше 60 HRC в сечениях 750 мм [12]. Они используются для изготовления пуансонов, штампов и т.д. [15].

Сталь для литейных форм или стали группы P, содержат хром и никель в качестве основных легирующих элементов и имеют низкое содержание углерода (0,1 - 0,3 мас. доля %). Стали типов P4 и P6 могут достигать полной твердости при охлаждении на воздухе [12]. Как следует из названия, основное применение этих сталей – изготовление пресс-форм, которые подвергаются сильному давлению, относительно низким температурам (~200°C) и абразивному износу от формовочных порошков, например, пластмасс, керамики или металлов. Эти стали имеют твердую поверхность и вязкую массу [13], [15]. Стали группы P демонстрируют низкую и ограниченную стойкость к размягчению при повышенных температурах [12].

Ударопрочные стали. Группа ударопрочных сталей имеет префикс S. Основными легирующими элементами этой группы являются углерод, марганец, кремний, хром, вольфрам и молибден (обычно в состав входит также ванадий). Содержание углерода среднее ~0,50 мас. доля %. Уникальным для этой группы сталей является (относительно) высокое содержание кремния, который отвечает за снижение чувствительности к разрушению в некоторых закаленных микроструктурах. Закаливаемость и глубина, на которую можно закалить эти стали, различны. Некоторые типы закаливаются в воде (S2), другие – в масле (S1, S5, S6). Стали типа S2 закаливаются неглубоко, в то время как стали типа S7 закаливаются глубоко. Стали этой группы обладают высокой прочностью, умеренной износостойкостью и необычайно высокой вязкостью. Они способны противостоять повторяющимся высоким ударным нагрузкам (они твердые и вязкие одновременно), и в основном используются для таких работ, как забивание и пробивание [12], [14].

Стали для горячей обработки. Стали для горячей обработки отличаются очень хорошей термической стойкостью против размягчения при (повышенной) рабочей температуре или во время термообработки. Все стали для горячей обработки обозначаются префиксом H в номенклатуре AISI и обычно содержат относительно низкое содержание углерода - 0,30-0,40 весовых процентов углерода. Стали типа H делятся на три группы в зависимости от основного легирующего элемента, обеспечивающего красную твердость. Некоторые из высоколегированных сталей группы H похожи на быстрорежущие стали, но имеют более низкое содержание углерода, а также более низкое содержание легирующих элементов [3].

1.2 Характеристика штамповых сталей и их изготовление

Штамповая сталь – это легированная инструментальная сталь, предназначенная для использования в областях применения, где температура поверхности обычно превышает 200°C. Во время обработки штамп соприкасается с горячим материалом, температура которого значительно превышает 200°C. Помимо длительной тепловой нагрузки, возникает дополнительное напряжение из-за периодического изменения температуры от температуры. Горячекатаные штамповые стали для таких применений должны быть способны выдерживать не только универсальные механические и абразивные нагрузки, обычно возникающие в штамповых сталях, но и выдерживать тепловые нагрузки.

Из штампованной стали изготавливают штампы для формования деталей или компонентов, адаптированных для определенного применения. Развитие штамповой стали тесно связано с эволюцией сталей в целом, но началом истории штамповой или инструментальной стали принято считать 1740 год, когда часовщик Бенджамин Хантсман выплавил в тигле куски черновой стали. Плавление стали вместо нагревания чугуна на древесном угле (за счет диффузии углерода в чугун образуется черновая сталь) сделало сталь намного более однородной и, следовательно, более прочной [10].

Самыми ранними штамповыми сталями были простые углеродистые стали, но начиная с 1868 года, когда Роберт Муше намеренно добавил вольфрам в высокоуглеродистую сталь, и в большей степени в начале 20-го века было разработано много сложных высоколегированных штамповых сталей. Однако понимание взаимосвязи между содержанием углерода, составом сплава и технологическими процессами, которые привели к созданию современных штамповых сталей для горячей обработки, пришло лишь в 19 веке [10].

Современные штамповые стали, со сложным легированием и термообработкой, являются гораздо более совершенными. Эти сложнолегированные горячекатаные штамповые стали, содержащие, среди прочих элементов, относительно большое количество вольфрама (W), молибдена (Mo), ванадия (V) и хрома (Cr), позволяют удовлетворять все более строгим требованиям к обслуживанию и обеспечивают больший контроль размеров и защиту от растрескивания в процессе эксплуатации. термическая обработка. Область применения штамповых сталей широка, и штампы, изготовленные из этих сталей, используются в самых разных областях. Штамповые стали используются для обработки заготовок из железа и цветных металлов, а также их сплавов при высоких температурах. Они применяются в таких процессах, как горячая ковка, литье под давлением и экструзия, а также в производстве труб и изделий из стекла [16].

Штамповые стали являются широко используемым материалом для изготовления инструментов, предназначенных для формообразования металлических, пластмассовых и других элементов в массовом производстве.

Эти инструменты включают в себя штампы для экструзии, штампы для литья под давлением, формы, пуансоны и различные другие элементы для придания пластической формы материалам, предварительно нагретым до температур в диапазоне от 250 °С до 700 °С. Поскольку стабильность формы является основным требованием, которому должен соответствовать любой инструмент, материал, из которого он изготовлен, является ожидаемым, что он будет выдерживать нагрузки без каких-либо пластических деформаций, сохраняя при этом высокую стойкость к истиранию. Кроме того, инструмент должен обладать хорошей твердостью и прочностью, а также соответствующей пластичностью и ударной вязкостью, которые обеспечивают устойчивость к растрескиванию, и эти качества должны быть достигнуты при высоких рабочих температурах (до 700°С) [17].

В процессе обработки горячекатаная сталь обычно подвергается воздействию высоких температур, которые превышают 200 °С. Микроструктура этой стали должна быть достаточно стабильной и устойчивой к отпуску, поскольку необходимо любой ценой предотвратить микроструктурные изменения. Инструменты, изготовленные из горячекатаной штамповой стали, не только постоянно подвергаются воздействию высоких температур при использовании, но и изменяющимся температурным напряжениям, возникающим при контакте поверхностей штампа с обрабатываемыми материалами. В сочетании с износом, вызванным истиранием или ударами, эти термические нагрузки предъявляют особые требования к штамповым сталям для горячей обработки [18].

Для изготовления типичных штампованных сталей сырье (включая лом) тщательно отбирается не только по содержанию сплава, но и по качествам, обеспечивающим чистоту и однородность готового изделия. Штампованную сталь обычно выплавляют в электродуговых печах относительно небольшой грузоподъемности и рафинируют в аргонокислородной камере обезуглероживания для достижения допустимых значений состава при низких затратах, хорошей чистоте и точном контроле условий плавки. Для удовлетворения особо сложных требований, предъявляемых к качеству и производительности стали при горячей обработке, были внедрены специальные процессы рафинирования и вторичного переплава, такие как электрошлаковый переплав и вакуумно-дуговой переплав. Для некоторых сталей со средним и высоким содержанием сплавов в горячекатаных штампах требуется контроль процессаковки и прокатки, что часто приводит к образованию большого количества технологического брака [16].

Полуфабрикаты и готовые прутки проходят тщательный контроль в процессе производства и на заключительном этапе. Этот контроль может быть настолько тщательным, что можно проверить макроструктуру (качество травления), чистоту, твердость, размер зерен, отожженную структуру и способность к упрочнению с обоих концов каждого прутка. Для контроля также может потребоваться, чтобы весь стержень был подвергнут магнитному и ультразвуковому контролю на предмет наличия поверхностных и

внутренних неоднородностей. Важно, чтобы готовые прутки из инструментальной стали имели минимальное обезуглероживание в тщательно контролируемых пределах, для чего требуется отжиг по специальным процедурам в строго контролируемых условиях [19].

Специфические методы производства и строгий контроль качества приводят к высокой стоимости штамповых сталей для горячей обработки, в том числе из-за содержащихся в них дорогостоящих легирующих элементов. Однако требования к качеству при производстве этих специальных сталей оправданы, поскольку из стальных прутков с горячей штамповкой обычно изготавливают сложные штампы для формовки, стоимость которых во много раз превышает стоимость самой стали. Хотя некоторые стандартные конструкционные легированные стали по составу напоминают сталь с горячей штамповкой, они редко используются для изготовления дорогостоящих штампов, поскольку, как правило, эти стали производятся не по таким строгим стандартам качества, как горячекатаные штамповые стали.

Эффективность штампа для горячей обработки в процессе эксплуатации зависит от:

- правильной конструкции;
- точности изготовления штампа;
- выбора подходящей стали для горячей обработки;
- применения надлежащей термической обработки [19].

Штамп для горячей обработки может успешно работать в процессе эксплуатации только при соблюдении всех четырех этих требований.

Большинство сталей для горячей штамповки изготавливаются коваными изделиями, но в некоторых случаях можно использовать прецизионное литье. При изготовлении этих сталей также используется технология порошковой металлургии. Этот процесс обеспечивает более равномерный размер и распределение карбида в больших сечениях и специальные составы, которых трудно или невозможно достичь путем плавления и литья, а затем механической обработки отлитого изделия.

В процессе эксплуатации большинство штампов для горячей обработки подвергаются экстремально высоким нагрузкам, которые быстро увеличиваются. Штампы должны выдерживать эти нагрузки большое количество раз, не ломаясь и не подвергаясь чрезмерному износу или деформации. В некоторых областях применения штамповые стали для горячей обработки должны обеспечивать эту способность в условиях, когда в штампах создаются высокие температуры. Ни один материал для штампов не сочетает в себе максимальную износостойкость, прочность и устойчивость к размягчению при высоких температурах.

Циклические высокотемпературные условия и воздействие высоковязкого расплавленного металла являются одной из причин износа и растрескивания штампов при полутвердой обработке. Термическая усталость приводит к тепловому контролю, который является одним из наиболее важных механизмов разрушения инструмента в процессе литья под давлением

расплавленного металла. Эти трещины на поверхности формы вызывают нежелательные следы или ребра на поверхности отливки, что влияет на качество конечной продукции. Расплавленные металлы, такие как алюминий, цинк, магний и сплавы на основе меди, подвергались термическому усталостному растрескиванию в результате быстрого изменения температуры поверхности. Приложение давления при высокой температуре во время впрыска и быстрое охлаждение формы в течение нескольких миллисекунд может вызвать напряжения, достаточно высокие, чтобы вызвать приращение пластической деформации в поверхностях инструмента во время каждого цикла литья

Другими видами разрушений, ограничивающими срок службы и производительность, являются грубое разрушение, эрозия, коррозия и локальное прилипание литейного сплава, которое также известно как пайка. Инжиниринг поверхности боридов, карбидов и нитридов создает керамические соединения с повышенной твердостью, износостойкостью и химической инертностью. Было доказано, что поверхностная инженерия повышает износостойкость инструментальных материалов при литье под давлением. Однако механизмы, лежащие в основе термического усталостного растрескивания материалов с поверхностным инжинирингом, до сих пор не до конца изучены.

1.3 Свойства и классификация штамповых сталей

Стали для штампов были разработаны для того, чтобы выдерживать комбинации тепла, давления и абразивного износа, связанные с такими операциями. В настоящее время существует несколько типов штамповых сталей, но желание повысить их эксплуатационные характеристики все еще сохраняется. Стали, используемые для горячей штамповки, представляют собой особый тип штамповой стали, изготовленной с учетом сочетания тепла, давления и истирания, и классифицируются Американским институтом железа и стали (AISI) как штамповая сталь для горячей обработки AISI типа 'H'. Все штамповые стали для горячей обработки должны использоваться в закаленном и отпущенном состоянии [9]. Наиболее важными свойствами для этих типов сталей являются высокие уровни горячей прочности, пластичности, вязкости, теплопроводности, прочности при ползучести, стойкости к отпуску, а также низкое тепловое расширение.

Штамповые стали AISI типа 'H' обычно имеют среднее содержание углерода (от 0,35 % до 0,45 %) и содержание хрома, вольфрама, молибдена и ванадия в пределах от 6 % до 25 %. Поскольку штамповые стали для горячей обработки должны сохранять свои свойства при высоких температурах, им требуется повышенная стойкость к отпуску, чтобы после отпуска при 550° C/650° C достигалась соответствующая прочность. Наиболее удобным методом является использование реакции вторичной закалки, включающей

осаждение карбидов сплава. Хороший эффект вторичного упрочнения достигается за счет сильных карбидообразующих элементов, таких как хром, молибден, ванадий и вольфрам. Эти элементы играют важную роль, когда сталь для штампов горячей обработки подвергается воздействию высоких температур, поскольку они выпадают в осадок в виде мелких карбидов сплава, что не только замедляет размягчение, но и повышает твердость.

Стали AISI типа H делятся на три подгруппы, названные по преобладающему легирующему элементу, а именно:

- хром;
- вольфрам;
- молибден [9].

Стали H1 - H19 – на основе хрома, H20 - H39 – на основе вольфрама, а H40 - H59 – на основе молибдена. Стали на основе хрома обладают наилучшей вязкостью среди всех этих сталей, но их самая высокая температура использования является самой низкой (до 475 градусов Цельсия) среди всех трех категорий. Вольфрамовые или молибденовые стали используются для работы при температуре до 600 градусов Цельсия, но их вязкость уступает хромовым сталям [16]. На таблице 2 представлены химические составы данных штамповых сталей в процентах

Таблица 2 – Химический состав штамповых сталей в процентах

Марка стали AISI	Химический состав в процентах					
	C	W	Mo	Cr	V	Другие
Хромистые штамповые стали						
H10	0,40		2,50	3,15	0,40	
H11	0,35	1,50		5,00	0,40	
H12	0,35		1,50	5,00	0,40	
H13	0,35		1,50	5,00	1,00	
H13	0,40	5,00	5,00	5,00		
H14	0,40	5,00	5,00	5,00		
H16	0,55	7,00		7,00		
H19	0,40	4,25		4,25	2,00	Co – 4.25
Вольфрамовые штамповые стали						
H20	0,35	9,00		2,00		
H21	0,35	9,00		3,50		
H22	0.35	11.00		2.00		
H23	0.30	12.00		12.00		
H24	0.45	15.00		3. 00		
H25	0.25	15.00		4.00		
H26	0.50	18.00		4.00	1.00	

Продолжение таблицы 2

Молибденовые штамповые стали						
H41	0.65	1.50	8.00	4.00	1.00	
H42	0.60	6.00	5.00	4.00	2.00	
H43	0.55		8.00	4.00	2.00	

Хромистые штамповые стали для горячей обработки – эти стали хорошо подходят для горячей обработки всех видов, например, штампов для экструзии алюминия и магния, а также штампов для литья под давлением, штампов дляковки и горячих ножниц. Эта группа штамповых сталей для горячей обработки содержит хром, а в некоторых случаях - вольфрам, молибден, ванадий и кобальт (Co). Содержание углерода (C) в этой группе относительно низкое, примерно от 0,35 до 0,4 %, и это, вместе с относительно низким общим содержанием сплава, способствует повышению вязкости при нормальной рабочей твердости в диапазоне от 41,7 HRC до 54,5 HRC.

Хромистые штамповые стали для горячей обработки обладают хорошей стойкостью к термическому размягчению благодаря среднему содержанию хрома и добавлению карбидообразующих элементов, таких как молибден, вольфрам и ванадий. Низкое содержание углерода (C) и низкое общее содержание сплавов способствуют повышению вязкости при нормальной рабочей твердости от 40 HRC до 55 HRC. Более высокое содержание вольфрама и молибдена повышает прочность в горячем состоянии, но немного снижает вязкость. Ванадий добавляется для повышения стойкости к стиранию (эрозионному износу) при высоких температурах. Увеличение содержания кремния повышает стойкость к окислению при температурах до 800 градусов Цельсия.) Наиболее распространенными типами хромистых штамповых сталей для горячей обработки являются H11, H12, H13 и, в меньшей степени, H19 [16].

Высокое содержание хрома в этой группе в сочетании с низким содержанием углерода обеспечивает глубину закалки, и поэтому эти стали могут быть закалены на воздухе до полной рабочей твердости. Стали H11, H12 и H13 могут быть закалены на воздухе до полной рабочей твердости в сечении размером до 150 мм, другие стали типа H могут быть закалены на воздухе в сечении размером до 300 мм. Повышенное содержание вольфрама и молибдена в сталях H10 увеличивает красную твердость и горячую прочность, но несколько снижает вязкость. Воздушная закалка и сбалансированное содержание сплавов в этих сталях приводят к низкой деформации при закалке. Основным преимуществом этой группы является способность выдерживать длительное воздействие температуры до 540 градусов Цельсия и в то же время обеспечивать вязкую и прочную штамповку при этой температуре [3].

В этой группе сталей H11, H12 и H13, возможно, представлен самый высокий тоннаж, используемый во всех штамповых сталях для горячей обработки. Воздушная закалка и сбалансированное содержание сплавов обеспечивают низкую деформацию при закалке. Хромистые штамповые стали

для горячей обработки особенно хорошо подходят для горячей штамповки всех видов, в частности штампов для экструзии алюминия и магния, а также штампов для литья под давлением, ковочных штампов, дорнов и горячих ножниц. Большинство этих сталей имеют достаточно низкое содержание легирующих элементов и углерода, чтобы штампы, изготовленные из них, можно было охлаждать водой в процессе эксплуатации без образования трещин.

Сталь H11 используется для изготовления некоторых высоконагруженных конструкционных деталей, в частности, в аэрокосмической технике [9]. Материал для таких ответственных применений производится методом вакуумно-дугового переплава расплавленных на воздухе электродов, что обеспечивает чрезвычайно низкое содержание остаточных газов, превосходную микрочистоту и высокую степень структурной однородности. Основным преимуществом H11 перед обычными высокопрочными сталями является его способность противостоять размягчению при длительном воздействии температур до 540 градусов Цельсия и в то же время обеспечивать умеренную вязкость и пластичность при комнатной температуре с пределом прочности при растяжении от 1 720 МПа до 2 070 МПа.

Кроме того, благодаря свойству вторичного упрочнения, сталь H11 можно закалывать при высоких температурах, что приводит к практически полному снятию остаточных закалочных напряжений, необходимых для обеспечения максимальной вязкости при высоких уровнях прочности. Другие важные преимущества сталей H11, H12 и H13 для конструкционных и горячедеформированных применений включают легкость формовки и обработки, хорошую свариваемость, относительно низкий коэффициент теплового расширения, приемлемую теплопроводность и устойчивость к окислению и коррозии выше среднего [14].

Сталь H10 – относительный новичок в этом семействе сталей, впервые появившийся в США. Эта марка стали обеспечивает повышенную вязкость, и она настолько важна в различных областях применения, что несколько поставщиков стали предлагают модификации номинального состава стали H10 для придания ряда выбранных свойств. В табл. 1 приведен типичный химический состав хромистых штамповых сталей для горячей обработки.

Вольфрамовые штамповые стали для горячей обработки используются для изготовления дорнов и экструзионных штампов для высокотемпературных применений, таких как экструзия латуни, никелевых сплавов и стали. Основными легирующими элементами вольфрамовых штамповых сталей для горячей обработки (типы H21 - H26) являются углерод, вольфрам, хром и в некоторых случаях ванадий. Более высокое содержание легирующих элементов в этих сталях делает их более устойчивыми к высокотемпературному размягчению и вымыванию по сравнению с хромистыми сталями. Однако высокое содержание сплавов также делает

вольфрамовые стали для горячих штампов более склонными к хрупкости при нормальной рабочей твердости (от 45 HRC до 55 HRC) [16].

Хотя вольфрамовые стали для горячих работ могут быть закалены на воздухе, они обычно закаливаются в масле или горячей соли, чтобы минимизировать образование окалины. При закалке на воздухе, эти стали показывают низкий уровень искажений. Кроме того, эти стали нуждаются в более высоких температурах закалки, чем хромовые стали для горячей обработки штампов, что делает первые более склонными к образованию окалины при нагреве в окислительной атмосфере. Кроме того, хотя эти стали обладают гораздо более высокой вязкостью, по многим характеристикам они схожи с быстрорежущими сталями. Фактически, сталь H26 - это низкоуглеродистая версия быстрорежущей стали T1. Если вольфрамовые стали для горячей обработки штампов предварительно нагреваются до рабочей температуры перед использованием, поломки могут быть сведены к минимуму. Эти стали используются для изготовления дорнов и экструзионных матриц для высокотемпературных применений, таких как экструзия латуни, никелевых сплавов и стали. Эти стали также подходят для использования в штампах для горячейковки прочной конструкции [18].

По сравнению со сталями хромовой группы для горячей обработки, высокое содержание вольфрама делает эти стали непригодными для водяного охлаждения в процессе эксплуатации. В штамповых сталях этой группы для горячей обработки вязкость и стойкость к тепловым ударам обычно достигаются за счет снижения содержания углерода. Однако при этом необходимо также корректировать содержание вольфрама и ванадия, поскольку оба этих элемента снижают прокаливаемость, удерживая слишком много углерода в сложных карбидах и тем самым допуская недостаточное количество углерода в аустенитной матрице. Таким образом, скорректированный состав представляет собой наилучшее сочетание твердости и красностойкости со значительной степенью вязкости и стойкости к термоударам.

Молибденовые стали для горячей обработки штампов почти аналогичны вольфрамовым сталям для горячей обработки штампов с почти такими же характеристиками и использованием, но имеют главное преимущество в их более низкой начальной стоимости. Существует только три активных молибденовых стали для горячей обработки штампов, а именно:

- сталь H41;
- сталь H42;
- сталь H43 [9].

Основными легирующими элементами в молибденовых штамповых сталях для горячей обработки являются молибден, хром, углерод и ванадий, а также различное количество вольфрама. Как и быстрорежущие стали, молибденовые марки стали для горячей обработки имеют почти такие же характеристики и применение, как и соответствующие вольфрамовые стали для горячей обработки. Хотя состав молибденовых сталей для горячей

обработки штампов похож на состав различных молибденовых быстрорежущих сталей, они имеют низкое содержание углерода и большую вязкость.

Основным преимуществом этих сталей по сравнению с вольфрамовыми сталями для штампов горячей обработки является их более низкая стоимость и более высокая стойкость к тепловому контролю, но, как и все высокомолибденовые стали, они требуют более тщательной термической обработки, особенно в отношении обезуглероживания и контроля температуры аустенизации.

Таким образом, стали для штампов горячей обработки являются важнейшими материалами для основного оборудования в передовых отраслях обрабатывающей промышленности, например, штампов для литья под давлением и горячей штамповки в автомобильной, аэрокосмической и железнодорожной промышленности [21]. Улучшение механических свойств сталей для горячей штамповки, особенно при высоких температурах, может повысить точность штампа. Более того, стали для штампов горячей обработки обладают превосходной прочностью и вязкостью, что продлевает срок службы штампа, что соответствует целям энергосбережения и снижения загрязнения окружающей среды [22].

В целом, основными методами повышения прочности и вязкости сталей для горячего деформирования являются оптимизация состава, прививочная обработка и проектирование процессов подготовки в промышленном производстве [23]. Процессы подготовки, такие как технология плавки, термообработка и пластическое деформирование, зависят в первую очередь от оборудования для подготовки и производственного опыта. Усиливающий эффект улучшенного процесса подготовки металла достиг верхнего предела с точки зрения развития оборудования, обновления затравки и накопления производственного времени. Поэтому разработка состава, в частности микролегирование, долгое время находилась в центре внимания исследователей при схожих уровнях производства [24], [25].

Объектом диссертационного исследования является сталь H13, которая считается передовой и часто используемой во всем мире сталью для штампов горячей обработки. Методы микролегирования для улучшения эксплуатационных характеристик стали H13 были исследованы. Например, Ли и др. [26] обнаружили, что добавление Cr и Mo одновременно увеличивает прочность и удлинение стали Fe18Mn1.0C TWIP. Гроше и другие [21] обнаружили, что предварительное зерно аустенита и межламелльные расстояния перлита были уточнены растворенным Nb и дисперсией частиц NbC в Nb-микролегированной стали CeMnSi, что повысило прочность стали. Теласан и другие [18] сообщили, что добавление 0,053 мас. % V в высокоуглеродистую перлитную сталь повысило прочность за счет упрочнения осадками V (C, N), однако вязкость снизилась. Тем не менее, они обнаружили, что добавление Nb вместо частичного V может увеличить прочность без снижения вязкости.

Однако во многих исследованиях сообщалось, что такие распространенные легирующие элементы, как Cr, Mo и V в стали H13, легко обогащаются в дендритах и образуют области сегрегации, создавая крупные первичные карбиды [23], [24]. Устранить эти крупные первичные карбиды в процессе последующей термообработки очень сложно из-за их высокотемпературной стабильности. Сохранение таких карбидов в стальных деталях способствует образованию очагов трещин и приводит к разрушению деталей в процессе эксплуатации. Кроме того, содержание углерода оказывает значительное влияние на механические свойства стали; сталь с высоким содержанием углерода обладает хорошей прочностью, но часто недостаточной вязкостью.

В целом, трудно добиться синергетического эффекта прочности и вязкости только за счет разработки состава; препятствие сегрегации легирующих элементов и очистка от крупных карбидов – это проблемы, которые необходимо решить. Поэтому для улучшения микроструктуры и эксплуатационных характеристик стали необходимо сочетание нескольких методов. В следующей главе будут рассмотрены методологические особенности технологий лазерной модификации.

2 Методическая часть

2.1 Особенности технологий лазерной обработки

Высокотехнологичные компоненты оборудования в аэрокосмической промышленности, новой энергетике, железнодорожном транспорте и т.д. должны отвечать чрезвычайно высоким требованиям к характеристикам поверхности [29]. Традиционные методы упрочнения поверхности, такие как индукционная закалка, напыление, упрочнение и прокатка, не могут удовлетворить требованиям. Лазерные технологии демонстрируют выдающийся потенциал для улучшения свойств поверхности металлических материалов и преодоления ограничений применения традиционных технологий модификации; поэтому они рассматриваются как универсальный инструмент обработки и общий метод обработки для будущих производственных систем в современной промышленности.

Технологии лазерной модификации поверхности используют характеристики высокой яркости, высокой направленности, высокой монохроматичности и высокой когерентности лазера для укрепления поверхности металлических материалов путем изменения структуры и химического состава поверхности металла, улучшая тем самым их свойства. Получение недорогих высокоэффективных покрытий на поверхности недорогих материалов имеет большое значение для выбора материала, проектирования и производства важных компонентов. Являясь универсальной технологией инженерии поверхности, технология лазерной модификации поверхности может быть непосредственно применена для улучшения характеристик штампованных сталей и локализованного производства, что имеет широкий спектр услуг и отличные перспективы применения [30].

Методы модификации поверхности, такие как плазменное осаждение из паровой фазы, щеточное покрытие, технология плазменной поверхностной металлургии и химическое осаждение из паровой фазы, широко используются для создания покрытий с высокой износостойкостью, стойкостью к окислению и коррозии. Материалы, используемые для нанесения покрытий, могут демонстрировать различную устойчивость к термическому растрескиванию по сравнению с эталонными материалами, а механизм, лежащий в основе термического усталостного разрушения поверхностей покрытий, до сих пор не до конца изучен. Трудности с обеспечением требований к эффективному покрытию привели к тому, что поверхностная обработка является более предпочтительной для защиты штампов от преждевременного разрушения.

Лазерная обработка поверхности – это нетрадиционный, но развивающийся производственный процесс. Одним из наиболее актуальных процессов лазерной обработки поверхности является поверхностная закалка материалов штампов. Лазерная закалка осуществляется с помощью источника лазерного излучения высокой интенсивности, который быстро нагревает поверхность стали до аустенитной области. Это позволяет модифицировать

поверхность конструкционных или легированных сталей для улучшения механических свойств. Обработанный слой приводит к увеличению твердости за счет образования более мелких зерен, вторичного карбида и твердых неравновесных микроструктур [31].

В XX веке лазерная обработка поверхности сыграло важную роль в улучшении свойств поверхности материалов. Среди множества способов улучшения свойств материалов, лазерная обработка поверхности используется для улучшения физических свойств обработанной поверхности и улучшения характеристик деталей. Лазер был разработан для множества различных научных применений, включая обработку материалов, спектроскопию, фотохимию, микроскопию, лунную лазерную дальнометрию и ядерный синтез. Эти приложения являются результатом когерентности и монохроматичности пучка электромагнитного излучения, который может распространяться по прямой линии с незначительной дивергенцией и который может быть сгенерирован в широком диапазоне длин волн, энергий и режимов пучка [32].

В целом можно выделить два основных вида взаимодействия лазерной энергии с материалом, как показано на рисунке ниже:

- абляция;
- модификация [31].



Рисунок 1 – Взаимодействие лазерной энергии с материалом

Для лазерной обработки поверхности используются мощные неодимовые иттрий-алюминиевые гранаты (Nd: YAG), углекислотные (CO₂) и эксимерные лазеры, которые дороги, популярны и работают в импульсном режиме или в режиме непрерывной волны. Эти лазеры используются для нагрева приповерхностной зоны готовых компонентов с целью улучшения их свойств.

Различные типы лазеров обладают разными способностями для выполнения процесса на материалах. Все лазеры выделяют тепловую энергию, и длина волны лазерного луча в значительной степени влияет на характеристики материалов. Как правило, вся тепловая энергия лазера поступает к обрабатываемому материалу, и ее можно разделить на две части:

часть тепловой энергии воспринимается обрабатываемым материалом, а оставшаяся тепловая энергия отражается в окружающую среду. Это происходит во время поверхностной закалки лазером. Подвод тепловой энергии к полированным металлическим поверхностям зависит от теплопоглощающей способности обрабатываемого материала и длины волны облучения. Как правило, короткая длина волны имеет большую поглощающую способность. Следовательно, Nd: YAG лазер ($\lambda = 1,064$ мкм) создал луч с более высокой поглощающей способностью для рабочего материала, чем CO₂ лазер ($\lambda = 10,6$ мкм) для поверхностной закалки стали [33].

Инертные газы, гелий, неон и аргон, используются для устранения атмосферного загрязнения. Чтобы уменьшить длину волны лазера, был разработан эксимерный лазер с очень короткой длиной волны. Этот лазер можно использовать для микрообработки медицинских деталей. В этой главе были рассмотрены лазерное поверхностное упрочнение, лазерное поверхностное плавление, лазерное поверхностное легирование, лазерное поверхностное плакирование и лазерное поверхностное текстурирование для улучшения микроструктуры, твердости и износостойкости механических компонентов.

Применение лазерной технологии для модификации поверхности металлов позволяет использовать тепловую энергию лазерного луча для изменения свойств поверхности материалов. Лазерная обработка имеет больше преимуществ по сравнению с традиционными методами, которые включают локальный нагрев поверхности без изменения свойств материала подложки, точность и высокую скорость работы, а также низкую стоимость [32].

Широкий спектр процессов в контексте лазерной обработки материалов направлен на модификацию различных свойств поверхностей – на металлических деталях, на керамике, стеклах и полимерах. Такие процессы часто предполагают значительный нагрев, но многие из них нельзя рассматривать как чисто термические. Как правило, происходит прямое взаимодействие лазерного луча с обрабатываемыми деталями, а иногда и с дополнительным материалом, нанесенным на поверхность.

Общими терминами для этой области являются лазерная модификация поверхности и лазерный инжиниринг поверхности. В зависимости от конкретной цели процесса, а иногда и от задействованных физических механизмов, технологии модификации поверхности называют специальными терминами, такими как лазерное упрочнение, лазерный переплав, лакирование, отжиг, лазерное хонингование, стекловидное эмалирование или легирование. В некоторых случаях модификация поверхности может осуществляться с помощью оптического излучения, но не с помощью лазеров. Например, иногда используются эксимерные лампы [34].

Отчасти лазерные методы модификации поверхности конкурируют с традиционными нелазерными процессами, такими как механические процессы, термические процессы с традиционными методами нагрева,

например, с помощью пламени, и электрохимические процессы. Лазерные процессы обычно имеют следующие преимущества:

- они могут быть точно нанесены на определенные участки поверхности, например, на отдельные узкие полосы или небольшие прямоугольники, при этом соседний материал практически не затрагивается.

- время обработки обычно довольно короткое, что экономически выгодно.

- поскольку во многих случаях не требуется прямого контакта, можно избежать загрязнения и износа инструментов.

- модификация поверхности может быть достигнута даже в труднодоступных местах, например, в просверленных отверстиях малого диаметра.

- процесс легко автоматизируется и часто полностью интегрируется с другими этапами обработки [31].

Хотя на сегодняшний день в обработке поверхности используется несколько типов лазеров, инфракрасные лазеры, такие как CO_2 , имеют такие преимущества перед эксимерными лазерами, как большой размер луча, высокая эффективность, простота эксплуатации, использование нетоксичных газов и более низкая стоимость. Во многих обзорах волоконные лазеры представлены как лучшие, между тем использование CO_2 -лазеров, особенно в непрерывном режиме, широко распространено для резки, сверления, плавления поверхности, сварки, удаления материала, отжига и наплавки.

Формирование модифицированного слоя определяется настройками параметров лазерной обработки. Некоторые параметры лазера включают:

- длину волны лазерного луча,

- временную мощность импульса (длительность импульса, пиковую мощность и форму импульса),

- частоту повторения,

- распределение энергии луча и геометрию луча, включая размер фокусного пятна и глубину фокуса [35].

Регулирование параметров также приводит к различным эффектам на измененных свойствах поверхности. Хотя в лазерной обработке поверхности использовались несколько типов лазеров, мощность лазера, скорость сканирования или время взаимодействия материала с лазером оказывали сильное влияние на получаемый температурный профиль, глубину модифицированного слоя, механические, коррозионные и трибологические свойства обработанной поверхности [36].

Уменьшение мощности лазера влияет на глубину расплава, изменение размера луча – на размеры бассейна расплава, а изменение скорости сканирования – на скорость покрытия [37]. Температура поверхности и скорость охлаждения линейно увеличиваются с ростом мощности лазера или плотности энергии. Увеличение мощности лазера повышает температуру поверхности, что влияет на скорость затвердевания расплавленной поверхности. Хотя высокая скорость охлаждения необходима для уточнения структуры зерен, обычно предпочтительнее сочетание высокой плотности

мощности (облученности) и короткого времени взаимодействия (времени экспозиции), чтобы обеспечить более высокую скорость охлаждения.

При обработке гауссовым лазерным лучом размер пятна определяется положением фокуса. В большинстве работ по лазерной модификации поверхности металлической поверхности для достижения большего размера пятна фокусное расстояние, лазерный луч производит аналогичный диаметр пятна на поверхности материалов, как показано на достигается как выше и ниже фокусного положения, выбор того, в каком положении поверхность размещается влияет на тепловой ввод. Таким образом, ширина и глубина модифицированной области изменяются из-за изменения количества лазерной энергии, поглощенной в поверхности материалов.

Плотность мощности или облученность лазерного пучка определяется мощностью используемого лазерного пучка и диаметром его фокусного пятна. Диаметр луча, который содержит почти 86,5% всей мощности лазера, определяется $1/e^2$ от пиковой интенсивности. Хотя уровни упрочнения поверхности достигаются при распределении интенсивности TEM_{01} , круговые профили лазерного пятна, создаваемые режимом TEM_{00} , обычно более подходят для большинства лазерных применений. Кроме того, бассейн расплава, сформированный в режиме TEM_{00} , имеет наибольшую глубину и ширину и быстрее развивается в процессе обработки по сравнению с другими режимами [33].

Существует два режима лазерной обработки: непрерывная и импульсная волны. Лазерное модифицирование поверхности ранее проводилось с использованием лазеров как непрерывной, так и импульсной волны [38]. По сравнению с импульсным лазером, преимущество использования непрерывного лазерного луча заключается в том, что модифицированный слой или аморфное состояние можно получить в непрерывном процессе [39]. В отличие от непрерывного режима работы, импульсный луч создает ряд проблем из-за большего числа изменяемых параметров работы. Циклическое изменение температуры при использовании импульсных лазерных источников было установлено в нескольких областях, таких как сварка, лазерное спекание и лазерная обработка поверхности, но очень мало работ было посвящено влиянию частоты импульсов на конечные механические свойства и микроструктуру материала, и они не были признаны согласованными [40]. Поэтому большой потенциал точного применения циклических температур в лазерной модификации поверхности еще не реализован

Можно выделить две основные положительные стороны импульсного режима лазерной обработки:

- временной контроль связи энергии с целью, что приводит к ограниченной глубине теплопроводности в поверхность;
- высокая пиковая мощность импульса и, следовательно, высокая интенсивность, получаемая, что приводит к улучшению связи света в некоторых материалах, особенно металлах и тем самым позволяет или улучшить обработку.

Таким образом, по сравнению с другими традиционными методами селективного поверхностного упрочнения, преимущества лазерной обработки поверхности включают мелкозернистые и однородные микроструктуры, низкое термическое повреждение подложки, уменьшение роста и искажения зерен, неравновесных и аморфных структур, а также расширение твердой растворимости легирующих элементов. Эти преимущества, в свою очередь, могут быть использованы для улучшения трибологических и других механических свойств, включая твердость, прочность, вязкость, усталость и коррозионную стойкость, в то время как основные свойства остаются неизменными.

2.2 Методы лазерной модификации поверхности

Существует несколько методов лазерного модифицирования поверхности:

- лазерное легирование;
- трансформационное упрочнение;
- лазерная полировка;
- лазерное глазурирование;
- лазерная наплавка;
- т.д. [31], [32].

Эти методы различаются по изменению состава на поверхности материала и скорости поглощения энергии. Среди них лазерное упрочнение, лазерная закалка и лазерная наплавка являются наиболее популярными и играют важную роль в современном промышленном производстве. Метод лазерного ударного упрочнения имеет много преимуществ, таких как бесконтактность, отсутствие зоны термического влияния, хорошая управляемость и значительный эффект упрочнения. Лазерная закалка обладает превосходными характеристиками, включая высокую скорость нагрева, небольшую зону термического воздействия, малую тепловую деформацию и частичную закалку. Полученная поверхностная прочность на 5 %-20 % выше, чем при обычной закалке, а глубина закалочного слоя после лазерной закалки может достигать 1 мм. Лазерная наплавка характеризуется низким уровнем разбавления, плотной структурой и отличным сцеплением между покрытием и подложкой [31].

Лазерные модификации поверхности имеют возможность контролировать количество тепловой энергии для обработки материала с высокой направленностью. Целью лазерного упрочнения поверхности является улучшение износостойкости деталей. Лазерное поверхностное упрочнение определяется как тепловая энергия лазерного луча, которая непосредственно нагревает поверхность детали за очень короткий промежуток времени без расплавления рабочего материала. Тепло, подводимое к поверхности детали, является причиной создания жесткой и мелкозернистой структуры в

закаленной поверхности. Риск образования трещин очень низок благодаря процессу самозакалки.

Для процессов лазерного ударного упрочнения, для которых необходимо испарение, лазер Nd:YAG обычно используется для обработки алюминиевого сплава 6061-T6 и латуни для улучшения износа, трения и твердости. При трансформационном упрочнении для повышения износостойкости и твердости широко используется поверхностный нагрев таких материалов, как углеродистая сталь, мартенситные высокоазотистые нержавеющие стали, хромомолибденовые сплавы и инструменты для холоднойковки с помощью CO₂ или диодных лазерных систем [41].

Трансформационная закалка достигается путем нагрева металла выше критической температуры расфокусированным лучом и последующей быстрой закалки вместо того, чтобы позволить равновесным фазам сформироваться при медленном охлаждении [31]. На рисунке 2 представлена схемы работы лазерной закалки.

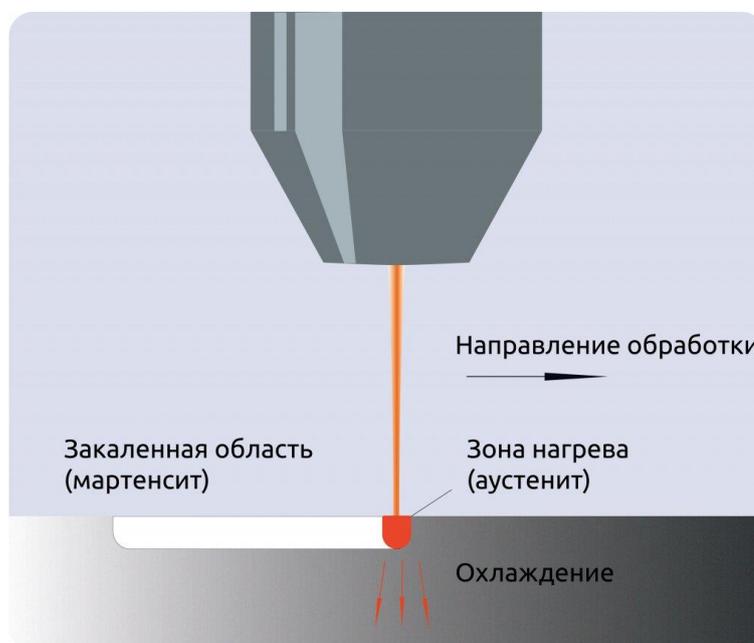


Рисунок 2 – Схема действия метода лазерной закалки

Плотность мощности в процессе закалки составляла 100 Вт/см², что создавало низкие термические искажения, позволяющие отказаться от повторной обработки детали [42]. Процессы легирования и наплавки подразумевают введение дополнительных элементов в наплавленную лазером поверхность. Элементы могут быть в виде газов, порошка, проволоки или листа.

При лазерном поверхностном плавлении (LSM) металл нагревается до температуры плавления с помощью мощного лазерного луча и быстро затвердевает. Целью LSM является уточнение микроструктуры поверхности, гомогенизация состава, растворение осадков. LSM также используется для

повышения коррозионной стойкости стали и железа. Минимизация межкристаллитной коррозии возможна с помощью LSM за счет предотвращения образования карбидов при последующей гомогенизации и сенсibiliзирующей обработке [31].

Лазерное поверхностное легирование (LSA) определяется как высокая тепловая энергия, используемая для расплавления металлического покрытия с помощью лазера и части подложки. Эта техника используется для формирования высокопрочных градиентных слоев на поверхности металла [43]. Основным преимуществом этой технологии является внезапный нагрев с последующим охлаждением, что позволяет улучшить свойства поверхности. При легировании изменяется состав поверхности, в то время как при наплавке происходит только склеивание с минимальным перемешиванием дополнительных элементов и расплавленной поверхности. Однако для обоих процессов используется одинаковый уровень плотности мощности - около 104 Вт/см^2 . Без дополнительных элементов для гомогенизации и упрочнения поверхности материала предпочтительно использовать поверхностное плавление, как при глазуировании.

Для уменьшения шероховатости поверхности часто используются методы шлифовки и полировки. Полировка с использованием лазерного излучения – это новая техника для получения таких высококачественных поверхностей. Полировка деталей/компонентов, изготовленных методом аддитивного производства, с помощью лазеров – устоявшийся метод, основанный на процессе плавления, происходящем в слое материала. Слой размером в несколько микрометров изменяется за счет плавления под воздействием тепла высокоинтенсивного лазера. Лазерную полировку иногда называют лазерным повторным плавлением поверхности. Она включает в себя плавление тонкого слоя материала, что позволяет материалу перетекать из пиков в долины из-за поверхностного натяжения.

Лазерная полировка – это процесс, в котором обрабатываемый материал не удаляется, а переводится в состояние расплавленного бассейна. Чтобы быстро расплавить крошечный слой подложки, используется лазерный луч с соответствующей плотностью энергии. Таким образом устраняются недостатки шероховатости поверхности [31]. Благодаря текучести расплавленного металла он легко перетекает в окружающую долину. После этого расплавленный металл вновь затвердевает и позволяет затвердевшему слою прикрепиться к поверхности подложки или детали. Таким образом, пики и долины асперити уменьшаются, что делает поверхность более гладкой [44].

Поскольку величина шероховатости поверхности компонентов аддитивного производства является одним из наиболее критичных ограничений, во многих исследованиях предпринимаются попытки уменьшить шероховатость. Изучаются различные факторы мощности луча и скорости сканирования, чтобы увидеть, как влияют возможности лазерной полировки (или лазерного повторного плавления поверхности).

В основном существует три вида процессов лазерной полировки:

- модификация поверхности/полировка по механизму абляции большой площади;
- модификация поверхности/полировка локализованной абляцией;
- модификация/полировка поверхности путем повторного плавления [31].

Модификация поверхности/полировка по механизму абляции большой площади. Материал расплющивается по всей поверхности. Это приводит к большей абляции вершин поверхности и уменьшению депрессии в долинах. Этот метод в основном используется при производстве алмазных пленок и пластин методом CVD. Используются эксимерные лазеры (ArF, KrF, XeCl). Лазерная полировка производится под углом падения до 85° по отношению к нормали к поверхности образца, чтобы гарантировать повышенное удаление материала на пиках профиля. Поворот образца во время обработки позволяет дополнительно снизить шероховатость. Продолжительность обработки составляет от нескольких минут до многих часов на квадратный сантиметр в зависимости от источника лазерного излучения, одного или двух этапов обработки и начальной шероховатости.

Модификация поверхности/полировка локализованной абляцией. Полировка локализованной абляцией основана на контролируемом удалении пиков профиля с помощью импульсного лазерного излучения. Для определения местоположения пиков профиля необходимо сложное и дорогостоящее оборудование для измерения профиля. Для измерения исходного профиля поверхности необходим точный измерительный прибор. После сравнения номинального и фактического значения только пики профиля привязываются к регулируемому лазерному шаблону [45].

Модификация/полировка поверхности путем повторного плавления. Тонкий слой поверхности расплавляется, и поверхностное натяжение приводит к перетеканию материала из пиков в долины. Материал не удаляется, а перемещается в течение всего процесса расплавления. Это способ автоматической полировки 3D-поверхностей. Существует два типа полировки путем повторного расплавления, в зависимости от вариаций процесса, а именно макрополировка и микрополировка.

Макрополировка выполняется с использованием непрерывного лазерного излучения (CW). В зависимости от материала и исходной шероховатости поверхности необходимо определить ширину луча и глубину повторного плавления. Обычно используются лазеры Nd:YAG с волоконной связью. Достигнутая шероховатость зависит от многих факторов:

- начальная шероховатость поверхности и, в частности, боковые структурные размеры поверхности;
- теплофизические свойства включают теплопроводность и теплоемкость, коэффициент поглощения, вязкость, поверхностное натяжение, температуру плавления и испарения;
- однородность материала: сегрегации, в том числе снижающие качество поверхности;

- мелкое зерно рекомендуется иметь среднего размера и статистического распределения.

Исследователи [46] провели тщательное изучение финишной обработки CO²-лазером. Они проводили операции с изменением мощности лазера при постоянной скорости сканирования 3000 мм/мин на различных сплавах. Когда интенсивность луча была слишком высокой, а фокусное расстояние слишком коротким, качество поверхности ухудшалось. Также было показано, что эффективность лазерной полировки улучшается с увеличением исходной шероховатости поверхности. Возможность полировать выбранный небольшой участок (0,1 мм²) на подложке с помощью SLP (селективной лазерной полировки) была достигнута другой группой [47]. Было продемонстрировано, что SLP не только улучшает качество поверхности, но и создает однородную поверхность (однородный состав элементов сплава) и снижает шероховатость поверхности до 50%. Необходим соответствующий выбор параметров процесса, например мощности лазера, чтобы получить воздушную шероховатость полированной поверхности, более незначительную, чем полученная.

Другая группа исследователей [48] снизила шероховатость поверхности (Ra) с 7,5 мкм до 1,2-1,3 мкм нержавеющей стали AISI 420, спеченной с бронзовой подложкой. Другая группа [49] исследовала возможность улучшения качества поверхности титановых сплавов с помощью наносекундного импульсного волоконного лазера. Плотность мощности лазера была постоянной и составляла 1,21 Вт/см², а скорость сканирования - 200 мм/с. Шероховатость поверхности уменьшилась с 5 мм до 1 мм, но вместе с этим повысились микротвердость и износостойкость.

Аддитивные технологии производства в настоящее время широко используются благодаря их способности сокращать количество необходимого материала и повышать точность изготовления деталей сложной геометрии. Лазерное наплавление – это один из методов, при котором для расплавления и осаждения материала используется удельная мощность лазерного луча. Порошки в основном используются для аддитивного производства металлов, которые затем расплавляются с помощью лазерного излучения и образуют новый объем за счет слоистой структуры.

Существует два подхода: в первом случае используется так называемый порошковый слой, при котором материал наносится на поверхность, а лазерный луч затем переплавляет только заданную форму для каждого слоя. Этот метод, известный как селективное лазерное плавление (SLM), обеспечивает более высокую точность, но процесс очень медленный. При втором подходе используется устройство подачи порошка, который направляется в лазерный луч; расплавленный металл затем затвердевает и образует новый наплавленный слой. Этот метод, называемый лазерной наплавкой или иногда лазерным осаждением металла (LMD), менее точен, но скорость наплавки в несколько раз выше, чем УУЗР [31].

Объект исследования горячекатаная инструментальная сталь AISI H13 является одним из наиболее распространенных материалов для изготовления штампов и пресс-форм, используемых в литейной промышленности. В течение срока службы штампы могут повреждаться из-за трения и износа. Поэтому ранее были исследованы различные методы его ремонта, чтобы снизить затраты на изготовление нового. Еще одна попытка заключается в использовании штампов с конформным охлаждением, где каналы охлаждения могут быть расположены ближе к поверхности и, таким образом, лучше контролировать скорость охлаждения.

Сложные каналы охлаждения не могут быть созданы обычными методами, такими как сверление [31]. Большим преимуществом лазерной наплавки в этой области является высокая скорость получения нового объема практически любой формы в 3D с минимальным тепловым воздействием благодаря низкому тепловыделению окружающего материала. Меньшая тепловая нагрузка уменьшает деформацию штампа или ухудшение свойств материала из-за отпуска. Таким образом, лазерное наплавление позволяет производить и ремонтировать изделия без дополнительной термической обработки до и после наплавки.

Экспериментальное исследование использования лазерной наплавки инструментальной стали H13 для ремонта зубчатых колес было описано в работе [50]. Однако при многослойной наплавке предыдущие слои подвергаются термическому воздействию, что может существенно изменить их микроструктуру и механические свойства [51]. По этой причине на результирующую микроструктуру влияет не только скорость охлаждения, но и температура, достигаемая при наплавке дополнительных слоев. Поэтому важно наблюдать и понимать микроструктурные изменения по толщине вновь сформированного материала. Эти знания могут быть использованы для разработки стратегии нанесения покрытия лазерным лучом на большие объемы.

Лазерное глазурование. Глазурование – это процесс получения тонкого аморфного или нанокристаллического слоя поверх материала подложки, при котором поверхностный материал твердого тела расплавляется с помощью сфокусированного лазерного луча, а затем быстро охлаждается [32]. Энергия лазера, поглощенная поверхностью, расплавляет материал на глубину, определяемую количеством переданной энергии и тепловыми свойствами материала [31]. Глазурование проводится при высокой плотности мощности и малом времени взаимодействия лазера с материалом, что позволяет создать нанокристаллическую или аморфную структуру с превосходными механическими свойствами по сравнению с обычными кристаллическими сплавами.

Благодаря улучшенным свойствам лазерные глазурованные поверхности могут удовлетворять требованиям многих износостойких и высокотемпературных применений, таких как литейные штампы, термобарьерные покрытия, рельсы для железных дорог и другие компоненты

подшипников. Лазерное глазурирование способно уплотнить тепловые зазоры, образующиеся на поверхностях штампов, и обеспечить релаксацию поверхностных напряжений [33].

В термобарьерных покрытиях напыленные композитные покрытия очень пористые, и для улучшения их износостойкости была применена обработка мощным CO₂-лазером. Также были улучшены плотность композитного покрытия и металлургическое сцепление между основой и покрытием [53]. Глазурирование железнодорожных рельсов привело к снижению коэффициента трения на 40 % при измерении прототипичных нагрузок на рельсы [33]. Поперечное сечение поверхности железнодорожного рельса с лазерным остеклением состояло из остекления, переходной зоны и зоны основного металла. В переходной зоне наблюдалось плотное сцепление между глазурированной зоной и основным металлом, что обеспечивало градиент микротвердости между глазурированной зоной и основным металлом.

2.3 Свойства поверхности, модифицированные лазером

Свойства материала, такие как отражательная способность поверхности, тепловая диффузия, температура плавления и фазовое поведение, важны для определения влияния лазера в процессе модификации поверхности. Основным недостатком CO₂-лазера является очень высокая отражательная способность света на длине волны 10,6 мкм, что затрудняет поглощение лазерной энергии металлами, включая стали [54]. Однако высокоэнергетические CO₂-лазерные системы просты в изготовлении, обслуживании и относительно распространены, поэтому широко используются для большинства видов обработки, несмотря на их низкую эффективность.

Поглощение поверхности – доля поглощенного лазерного излучения – зависит от свойств лазера, температуры, типа материала и качества его поверхности. Поверхности материалов могут легко поглощать лазеры с более короткой длиной волны, такие как Nd:YAG (1064 нм) и рубин (694,3 нм), по сравнению с лазерными системами с большей длиной волны. Большинство металлических поверхностей, включая сталь, могут поглотить менее 15 % энергии при обработке лазером с длиной волны CO₂.

При лазерном остеклении для эффективного расплавления поверхности важно достаточное поглощение материала при определенной длине волны лазера. Хотя поглощение поверхности может увеличиться до 40 % при обработке при высокой температуре, большинство сталей имеют высокую отражательную способность поверхности при обработке CO₂-лазером при комнатной температуре. Было обнаружено, что отражательная способность стали AISI 4340 при обработке CO₂-лазером снижается с 93,1 до 88,3 % при увеличении температуры поверхности с 20 до 500 °С в атмосфере аргона [55].

Такие полезные методы, как нанесение абсорбирующего покрытия, химическое травление и придание шероховатости поверхности, улучшают

поглощение излучения стальной поверхностью в инфракрасном диапазоне длин волн лазера [56]. На рисунке 3 показано поглощение фотонов различными типами поверхностей.

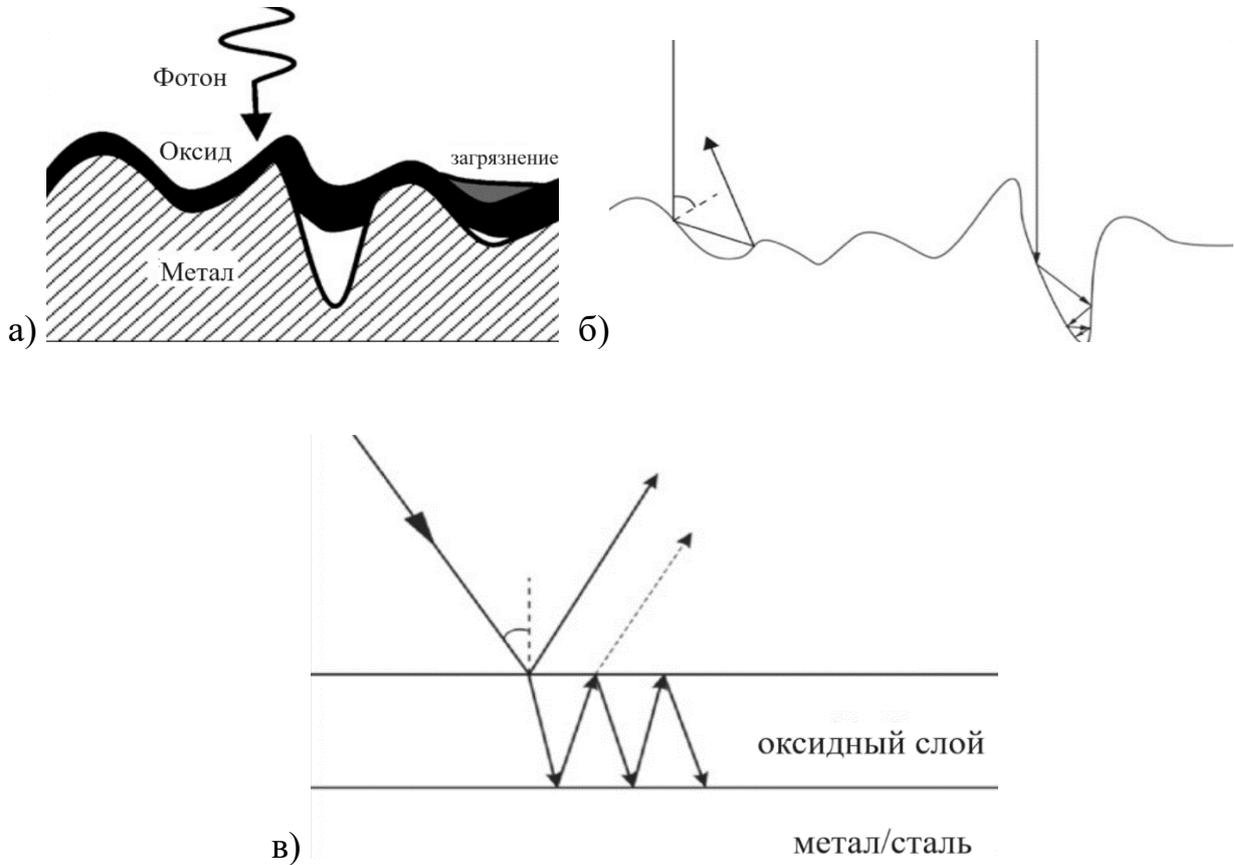


Рисунок 3 – Некоторые механизмы, увеличивающие поглощательную способность реальных инженерных поверхностей: (а) типичное поперечное сечение инженерной поверхности; (б) высокий (Брюстер) угол поглощения и многократные отражения из-за шероховатости поверхности; (в) многократные отражения в оксидном слое [57].

Для инженерных поверхностей, показанных на рисунке 3(а), такая поверхность имеет характерную шероховатость и обычно покрыта оксидным слоем, который способствует поглощению фотонов поверхностью. Как показано на рисунке 3(б), шероховатость поверхности может привести к многократному отражению, которое также влечет за собой многократное поглощение. Шероховатости поверхности, которые создают больше возможностей для изменения угла падения, меньшего или равного углу Брюстера, обеспечивают очень высокие уровни локального поглощения, в то время как на рисунке 3(в) оксидный слой может поглощать или вызывать множественные отражения

Образцы, покрытые абсорбирующими слоями на поверхности, не были переведены в аморфное состояние с помощью лазерной обработки, поскольку

некоторые примеси углеродных зерен были смешаны в расплавленной ячейке при локальном расплавлении поверхности. Однако подготовка образцов путем измельчения, очистки спиртом и травления ниталем также оказалась эффективной для снижения отражательной способности лазерного луча [58]. По сравнению с более гладкими поверхностями поверхность образца, обработанная пескоструйной обработкой с определенным уровнем шероховатости, может снизить отражательную способность лазерного луча для различных материалов [56]. Было замечено, что без абсорбирующего покрытия увеличение средней шероховатости поверхности инструментальной стали H13 примерно до 3,0 мкм увеличивает поглощающую способность поверхности при длине волны CO₂-лазера на целых 60%.

Свойства твердости. Лазерный луч используется для обработки поверхности с целью повышения механических свойств путем поверхностного модифицирования конструкционных и легированных сталей AISI H13. Поверхность стали может быть быстро расплавлена (выше температуры аустенита) и быстро закалена. Обработанный слой может демонстрировать высокую твердость за счет более мелких зерен, вторичного карбида и твердых неравновесных микроструктур, которые тесно связаны с подложкой и самой модифицированной областью [59].

Лазерная модифицированная поверхность состоит из трех зон: расплавленной зоны, зоны термического влияния (HAZ) и основного металла или подложки. В наплавленной зоне твердость повышается за счет образования хрупкой мартенситной структуры при быстром охлаждении и может быть более чем на 200% тверже, чем подложка [38], [39], [60]. Твердость поверхности стали H13, покрытой лазерной глазурью, уменьшалась тем больше, чем глубже в поверхность был сделан проход [60]. Снижение твердости также происходило при термообработке поверхности, модифицированной лазером, при температурах 500 и 600 °C в результате закалки мартенсита.

На твердость влияют такие параметры лазера, как:

- плотность мощности;
- частота следования импульсов;
- скорость сканирования.

На рисунке 4 показано, что средняя твердость образцов чугуна с никелевым покрытием, обработанных лазером, увеличивается с ростом плотности мощности.

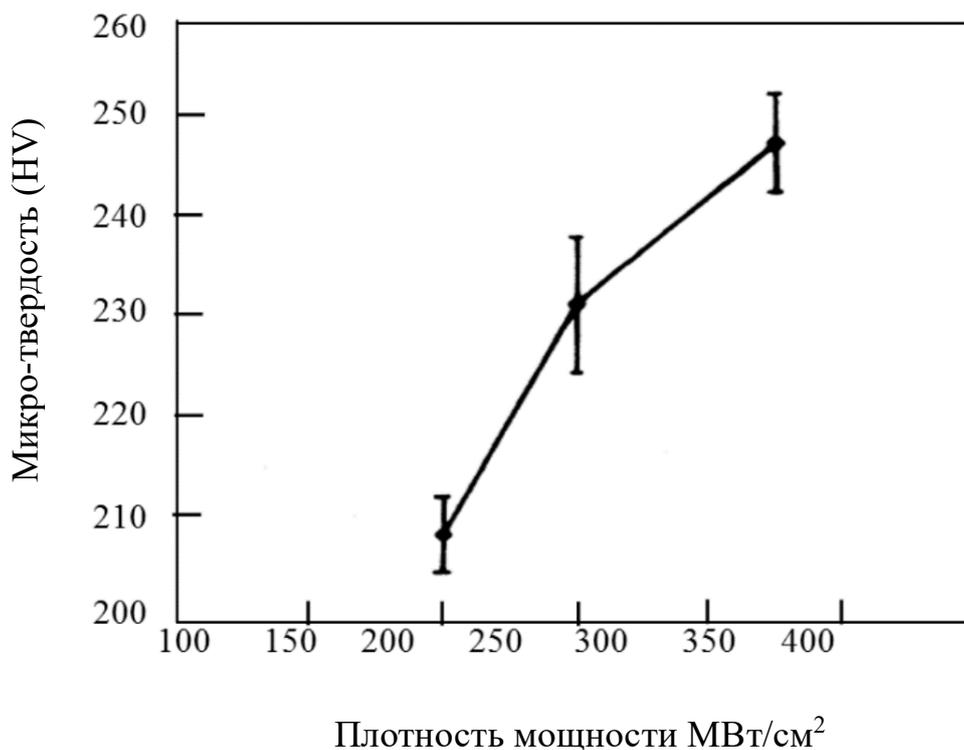


Рисунок 4 – Влияние плотности мощности лазерного излучения на среднюю твердость чугуна с никелевым покрытием.

При высокой плотности мощности образование твердых растворов между железом и никелем привело к увеличению средней твердости никеля, поскольку образовавшиеся твердые растворы были тверже и прочнее, чем чистые металлы. Для металлических образцов, обработанных при различной частоте повторения импульсов, твердость увеличивалась с ростом частоты импульсов. При более высокой частоте импульсов энергия импульса была ниже и вызывала более высокую скорость охлаждения. Общие результаты также показали, что непрерывный лазер создает модифицированную поверхность с более низкой твердостью, как показано на рис.

Частота сканирования также влияет на распределение твердости стали Н13, модифицированной лазером. В зоне оплавления твердость была увеличена по крайней мере в два раза по сравнению с основным металлом, что происходило при каждой скорости сканирования. При высоких скоростях сканирования 219,6 мм/с и более наблюдались более высокие показатели твердости из-за быстрого времени взаимодействия материала и лазера. Более быстрое время взаимодействия обеспечивает более высокую скорость охлаждения поверхности.

Шероховатость поверхности. Было обнаружено, что влияние шероховатости поверхности на аналитическую точность зависит от энергии лазерного луча [61]. Энергию луча можно регулировать, изменяя интенсивность лазерного излучения, количество импульсов или частоту повторения импульсов, а также длительность импульса. Экспериментальные результаты показывают шероховатость поверхности как функцию лазерного

излучения, количества импульсов, длительности импульса и периода импульса. На рисунке 5 показана нелинейная зависимость между шероховатостью поверхности и увеличением интенсивности лазерного излучения.

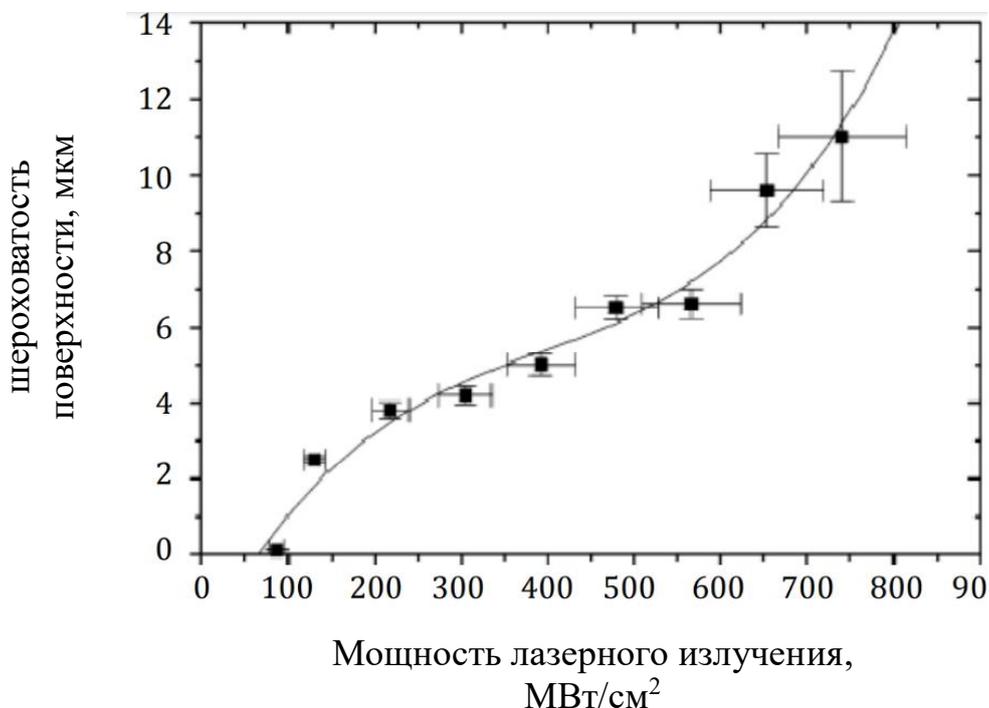


Рисунок 5 – Зависимость шероховатости поверхности от интенсивности лазерного излучения при лазерной абляции карбида вольфрама, цементированного кобальтом, с помощью эксимерного лазера при длительности импульса 20 нс и энергии импульса 450 мДж [62].

Значительная скорость увеличения шероховатости поверхности была измерена при низком уровне облучения в диапазоне 80 и 200 МВт/см² и высоком уровне облучения более 500 МВт/см². Высокое облучение создавало высокую энергию импульса, который аблатировал поверхность материала, особенно при обработке с низкой скоростью сканирования. При увеличении скорости сканирования и перекрытия пучка шероховатость поверхности, соответственно, увеличивается [60]. Что касается преимущества снижения шероховатости поверхности для термобарьерных покрытий, то в одной из работ были отмечены успешные результаты процесса лазерного остекления: улучшение Ra с 9 мкм до 4 мкм.

Пинкертон и Ли [63] рассмотрели зависимость шероховатости поверхности от ширины импульса и периода импульса при лазерной обработке стали 316L. При периоде импульса 20 мс шероховатость поверхности была выше, чем при обработке с периодом импульса 80 мс. Соотношение ширины импульса указывает на настройку рабочего цикла во время обработки, где при соотношении ширины импульса 0,5 время взаимодействия материала с

лазером составляло 50 % от фиксированного периода импульса. При более высоких значениях коэффициента шероховатость поверхности увеличивается, так как поверхность образца облучается в течение более длительного времени взаимодействия. Шероховатость поверхности, достигнутая для образцов, обработанных при 100 %-ном рабочем цикле для обоих периодов импульсов, составила максимальное значение 0,07 мкм. Низкий диапазон шероховатости поверхности был достигнут в ходе исследования благодаря большому размеру пятна пучка 1,7 мм и низкой интенсивности пучка 198 Вт/мм².

Термическая усталость. Такие детали машиностроения, как тормозные барабаны, газовые турбины, пресс-формы и штампы, испытывают попеременное нагревание и охлаждение своей рабочей поверхности при повышенных температурах и механических нагрузках. Термические напряжения, возникающие при циклическом изменении температуры, вызывают термическое усталостное разрушение поверхностей деталей. Трение в тормозных барабанах тормозной системы может создавать температуру до 900°C, которая приводит к образованию и распространению трещин [64].

В области полутвердой обработки металлов была проведена большая работа по увеличению срока службы штампов путем обработки поверхности и нанесения покрытий с термобарьерным эффектом. Термическое усталостное разрушение при полутвердой обработке металлов происходит из-за циклического воздействия расплавленного металла на штамп при высокой температуре в течение тысяч циклов. Повышение твердости поверхности может улучшить термоусталостные свойства машиностроительных деталей, подвергающихся высокотемпературному воздействию [65]. Было показано, что лазерная обработка поверхности с использованием Nd:YAG-лазера при мощности 100 Вт и скорости перемещения 0,88 мм/с эффективна для защиты поверхностей от преждевременного термоусталостного разрушения [65].

При испытаниях на термическую усталость поверхность образца расширяется при нагреве и сжимается при охлаждении. Термические напряжения от градиента температур между внешней и внутренней поверхностью образца инициируют появление трещин, чему способствует снижение прочности материала, происходящее при более высоких температурах [66]. В испытаниях на термическую усталость было применено несколько методов высокотемпературного нагрева и охлаждения, включая использование импульсного лазера для нагрева поверхности, магнитно-индукционный нагрев и охлаждение силиконовым маслом, нагрев в вакуумной камере и резистивный нагрев с эффектом Джоуля и водяным охлаждением спреями.

Однако для моделирования термического усталостного разрушения в условиях полутвердой обработки металлов давлением часто используется устройство для испытаний на термическую усталость. Образцы подвергаются циклическому нагреву в ванне с расплавленным алюминиевым сплавом (например, при 690°C) и охлаждению в ванне со смазкой на водной основе, при

этом образцы также непрерывно охлаждаются изнутри, а воздействие холодной воды на внешние и внутренние поверхности создает высокие температурные градиенты в образцах, и контролируемая термическая усталость

Образование метастабильных фаз Аморфные, квазикристаллы и мартенсит – все это метастабильные фазы, возникающие в металлических сплавах в результате расширения растворимости атомов растворенного вещества при высокой скорости охлаждения [67]. Аморфные сплавы характеризуются критическими скоростями охлаждения, обычно превышающими 105 К/с, и часто имеют толщину менее 60 мкм. Аморфная фаза имеет некристаллическую структуру с уникальными свойствами, сочетающими высокую прочность, жесткость и твердость. Квазикристаллическое состояние – это метастабильное состояние между аморфной и кристаллической фазами с высокими механическими свойствами, такими как твердость и жесткость. В отличие от аморфного состояния, квазикристаллическая фаза имеет дальний вращательный порядок, но не имеет дальнего трансляционного порядка и не является по-настоящему периодической [67].

При формообразовании современных металлических материалов, включая литье под давлением, штамповку, ковку и прокатку, срок службы инструмента ограничен из-за очень сложных условий работы. К ним относятся механические, термические и ударные нагрузки. В таких сложных условиях работы, включающих высокие контактные напряжения, а также абразивный и адгезионный износ, поверхности инструмента подвергаются воздействию различных механизмов износа и усталости. В связи с современными требованиями по уменьшению массы и размеров деталей, снижению расхода топлива и выбросов CO₂, увеличению объемов переработки и повышению общей прочности и безопасности – особенно если речь идет о транспорте и энергетическом секторе – к инструментам предъявляются новые, более жесткие требования и запросы. Это касается конструкции инструмента, выбора материала и термообработки, а также обработки поверхности, где подготовка подложки имеет большое значение [31].

Повышение требований означает ужесточение требований к свойствам материала инструмента, включая термостойкость, прочность, ударную и усталостную прочность, сопротивление ударному и скользящему износу и т. д. Пластичность и вязкость разрушения являются одними из основных свойств инструмента, необходимых для большинства видов обработки давлением и влияющих на стойкость инструмента. Свойства основного материала инструмента, т.е. инструментальной стали, зависят от его химического состава и процесса производства, но в первую очередь от параметров термической обработки.

Таким образом, штамповые стали широко используются там, где требуются износостойкость, высокая прочность, вязкость и коррозионная стойкость. Микроструктура может быть изменена или скорректирована с помощью лазерной обработки. Лазерная наплавка, легирование, глазурирование – наиболее важные виды обработки, которые часто используются для изменения микроструктуры стали и достижения желаемых механических свойств. Лазерная обработка может применяться до, во время или после производства. Например, при изготовлении инструмента исходный материал подвергается мягкому отжигу, чтобы сделать его легко обрабатываемым, в процессе производства производится лазерная обработка для снятия напряжений, чтобы уменьшить напряжения, возникающие в материале.

3 Экспериментальная часть

3.1 Воздействие лазерного излучения на параметры штамповых сталей

Материалом, исследованным в данном исследовании, была штамповая сталь AISI H13 с химическим составом, приведенным в таблице ниже.

Таблица 3 – Химический состав штамповой стали AISI H13

Материал	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Cu	S	P	Fe
H13	0.32-0.45	0.20-0.60	0.80-1.25	4.75-5.50	0.30	1.10-1.75	0.80-1.20	0.25	0.03	0.03	сбал

Химический состав был измерен с помощью спектроскопии искрового излучения SpectroMax CCDLMX03. Полученные прутки были подвергнуты отжигу с максимальной твердостью 280 HV (27 HRC). Характеристики штамповой стали H13 приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Характеристики штамповой стали AISI H13

Штамповая сталь AISI H13		Свойства
Плотность		7000 кг/м ³
Твердость	Оттоженная	285 HV
	закаленный	544 HV
Температура ликвидуса		1454°C
Теплопроводность		28 Вт/мК
Удельная теплоемкость		447 Дж/кг
Скрытая теплота плавления		2.8 x 10 ⁵ Дж/кг
Коэффициент теплопередачи		40 N/s/mm/°C

Поглощающая способность поверхности материалов при лазерной обработке поверхности имеет решающее значение, поскольку большинство металлов обладают высокой светоотражающей способностью в диапазоне длин волн CO₂-лазера. Поглощающая способность поверхности инструментальной стали H13 была улучшена за счет шероховатости поверхности путем химического травления. Образцы погружали в раствор нитрата (8-10%) на 10 минут перед лазерной обработкой. Исходный раствор (8-10%) готовили путем смешивания 8-10 мл азотной кислоты с 90-92 мл метанола в вытяжном шкафу.

Полученные образцы инструментальной стали H13 диаметром 10 мм и длиной 120 мм были обработаны на токарном станке с числовым программным управлением (ЧПУ) для получения средней шероховатости поверхности $R_{cp} 2,90 \pm 0,2$ мкм. Конечный диаметр образцов после

шероховатости составил 9,4 мкм. Нитал-травитель вступил в реакцию с поверхностью и затемнил поверхность образца Н13 в исходном состоянии. Затемненная поверхность снижает отражательную способность при взаимодействии лазерного луча с материалом. На рисунке 6 показан профиль поверхности обработанного образца, измеренный двумерным профилометром TR-200.



Рисунок 6 – Профиль поверхности обработанного образца толщиной $R_{cp} 2,90 \pm 0,2$ мкм.

В результате пяти измерений, проведенных на разных участках длины образца, среднее значение шероховатости составило 2,90 мкм. Перед обработкой образцы были обработаны этанолом. Образцы были обработаны лазером в исходном состоянии после химического травления поверхности и придания шероховатости поверхности до средней шероховатости $2,90 \pm 0,2$ мкм, R_{cp} и химического травления.

Для модификации стальной поверхности была использована система CO₂-лазера Rofin DC- 015 с диффузионным охлаждением и длиной волны 10,6 мкм. Технические характеристики системы приведены на таблице 5.

Таблица 5 – Технические характеристики лазерной системы Rofin DC-015 с диффузионным охлаждением CO₂ slab-лазера

Параметры лазера	Технические характеристики
Длина волны, λ	10.6 мкм
Максимальная мощность, P_{max}	1520 Вт
Режим работы	Непрерывный и импульсный
Частота следования импульсов	2 до 5000 Гц
Длительность импульса τ	от 0,026 до 125 мс
Пространственный режим луча	TEM ₀₀
Коэффициент качества луча, K	>0.9
Параметр распространения луча, M ²	1.11

Лазерная система была настроена на минимальный размер лазерного пятна на поверхности образца – 90 мкм. Схема лазерного излучения и траектория подачи луча в этой системе CO₂-лазера показана на рисунке 7. Во время лазерной обработки поддерживался постоянный поток газообразного аргона под давлением 0,1 МПа (1 бар), чтобы избежать окисления поверхности образца.

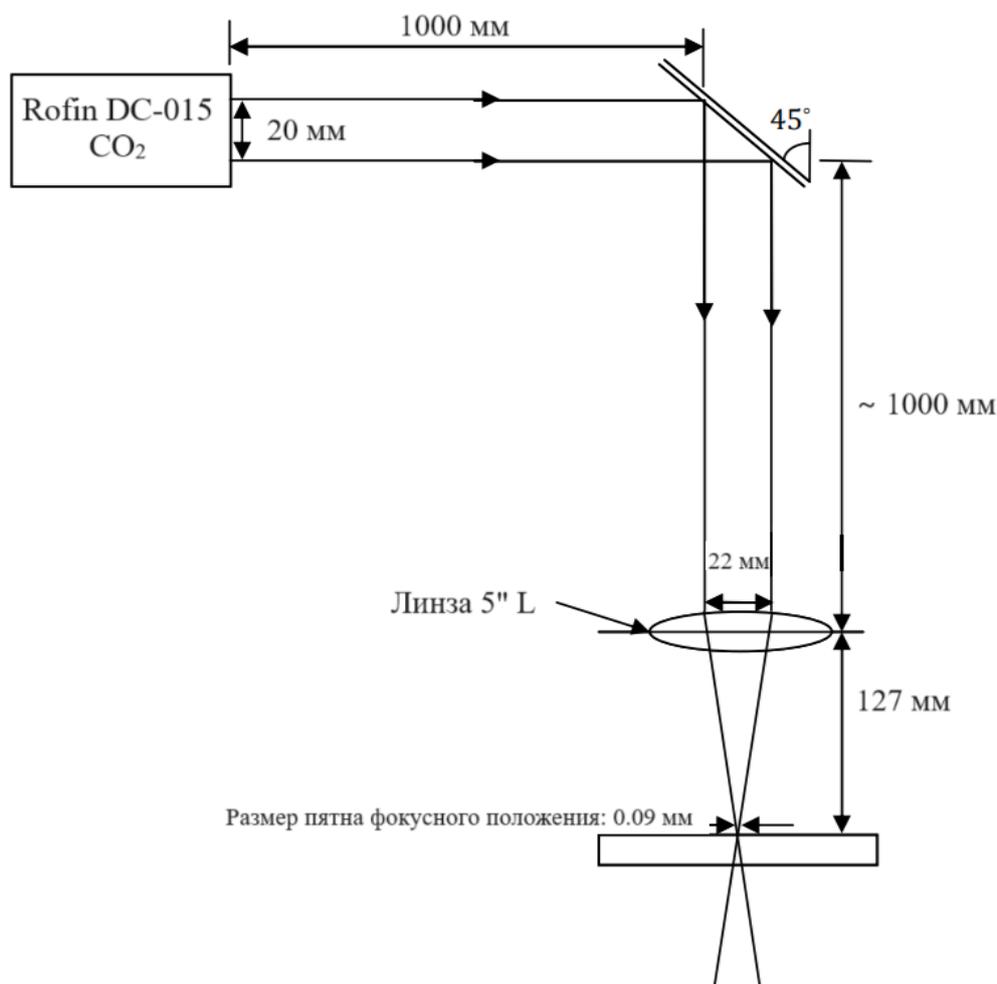


Рисунок 7 – Схема лазерного излучения (подачи луча) в CO₂-лазерной системе

На рисунке 8 показана установка для лазерной модификации поверхности. Образец был закреплен в патроне на переводном столике. Поверхность образца устанавливалась нормально к лазерной головке. Окружная поверхность образца обрабатывалась путем ее вращения перпендикулярно направлению лазерного обжига. Образец также линейно перемещался для обработки предварительно заданного перекрывающегося спирального узора в продольном направлении, что позволяло полностью обработать всю площадь поверхности.

Максимальная окружная скорость и скорость линейного перемещения составляли 3 000 об/мин и 5 000 мм/мин (83,33 мм/с) соответственно.

Контролируемыми параметрами обработки были пиковая мощность лазера, рабочий цикл, частота повторения импульсов, линейная скорость и скорость вращательного перемещения.

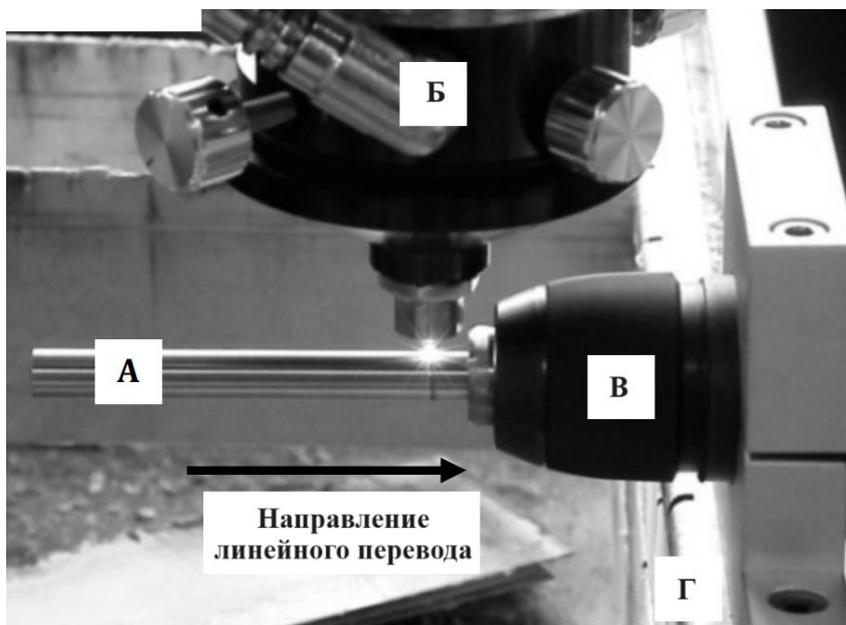


Рисунок 8 – Настройка процесса лазерной модификации поверхности
А) образец Н13 диаметром 9,4 мм; Б) лазерная головка; В) вращающийся патрон; Г) Платформа для линейного перемещения.

Образец вращался с помощью двигателя постоянного тока (Bodine® Small Motor type-32A5BERM с 2500 об/мин), который был закреплен на специализированной лазерной платформе, перемещающейся перпендикулярно направлению лазерного обстрела. Скорость вращения образца задавалась контроллерами входного напряжения, а линейная скорость перемещения и параметры лазерной обработки – контроллером лазера Rofin. В результате настройки параметров лазерной обработки были изменены размер зерна на поверхности, механические свойства, морфология поверхности, фазовый и структурный состав. Независимые параметры вычислялись для получения взаимосвязи двух или более параметров лазера. Параметры, полученные в результате выбранных настроек, такие как период импульса, ширина импульса, время пребывания, средняя мощность, энергия импульса, флюенс и облученность, позволяют точно контролировать лазерную обработку.

Представление результатов начинается с данных по зерновому составу и твердости инструментальной стали AISI H13. Затем последовательно представлены проекты лазерного модифицирования поверхности. Начиная с эксперимента №1, представлено влияние параметров лазера на глубину модифицированной поверхности. Для эксперимента №2 представлены результаты влияния протравленной поверхности на глубину

модифицированной поверхности и геометрию перекрытия, полученную с помощью пятна диаметром 0,4 мм. В эксперимента №2 представлены характеристики твердости и шероховатости поверхности.

3.2 Влияние технологических параметров на глубину модифицированного слоя

Основной целью эксперимента №1 было получение модифицированного поверхностного слоя, причем глубина модификации зависела от настроек параметров лазера. Образцы, обработанные лазером, были подготовлены для металлографического исследования. Микрофотографии поперечного сечения поверхности, модифицированной лазером, были записаны для измерения глубины обработанной поверхности. Фазовый анализ поверхности, модифицированной лазером, проводился для измерения фазовых превращений в обработанной поверхности. Эти первоначальные результаты характеризации были направлены на получение максимальной глубины лазерно-модифицированного слоя и снижение интенсивности пика фазы α -Fe по данным металлографического и рентгеноструктурного анализа соответственно.

В эксперименте №1 было проведено металлографическое исследование для анализа глубины модифицированного слоя, сформированного на подложке из инструментальной стали Н13 при различных настройках параметров. В этой работе было определено влияние режима импульсного лазера, лазерной облученности, времени пребывания и фокусного положения лазерного пятна на глубину модифицированной поверхности.

Металлографическое исследование. Влияние лазерного облучения и времени пребывания. Наблюдалось влияние лазерного облучения и времени пребывания на глубину модифицированного слоя. На микрофотографиях, представленных на рисунке 9 видны три области:

- зона модифицированного слоя;
- зона термического влияния;
- зона подложки.

Глубина модифицированного слоя увеличивалась с ростом интенсивности лазерного излучения, как показано на рисунке ниже (а)-(ж). На рисунке (а) и (б) показаны образцы, обработанные при высоком времени пребывания 0,38 мс; микрофотографии на рисунке (в) и (г) получены из образцов, обработанных при 0,34 мс; а микрофотографии на рисунке (д) и (ж) получены из образцов, обработанных при времени пребывания 0,31 мс. Образец с минимальным эффектом плавления наблюдался на рисунке (д), как и ожидалось, при наименьшем времени выдержки и облучении.

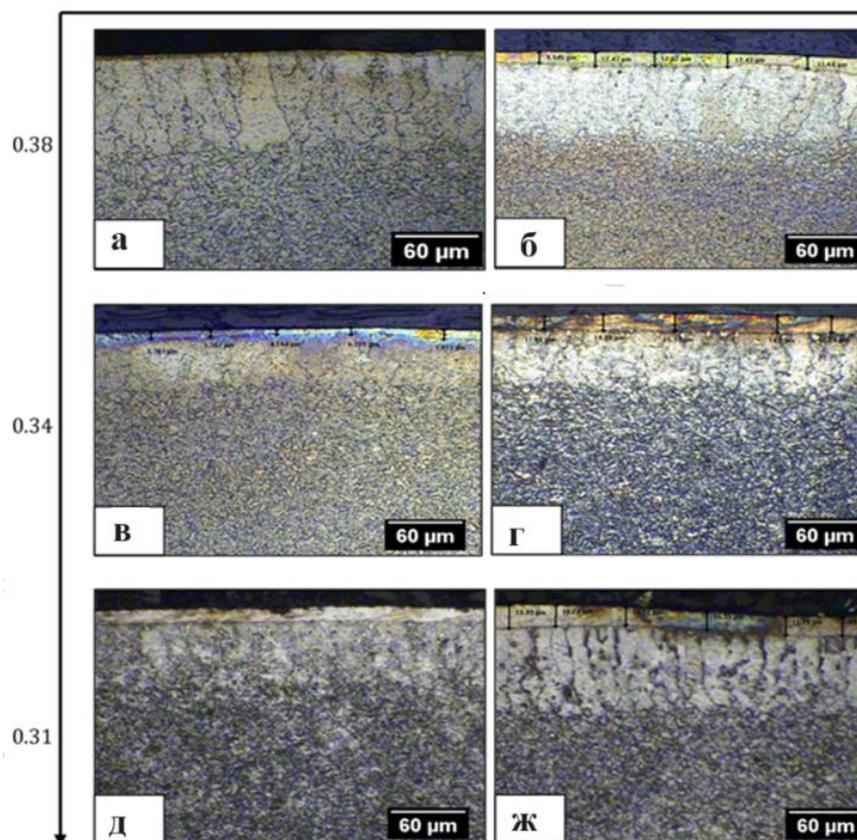


Рисунок 9 – Глубина модифицированного слоя в образцах эксперимента №1 при времени пребывания и облучении (а) 0,38 мс и 3 973 Вт/мм² (б) 0,38 мс и 5 576 Вт/мм²; (в) 0,34 мс и 3 951 Вт/мм²; (г) 0,34 мс и 5503 Вт/мм²; (д) 0,31 мс и 3 881 Вт/мм², и (ж) 0,31 мс и 4 607 Вт/мм² соответственно.

На рисунке 10 показано поперечное сечение образца из эксперимента №1, где были измерены глубины модифицированных слоев.

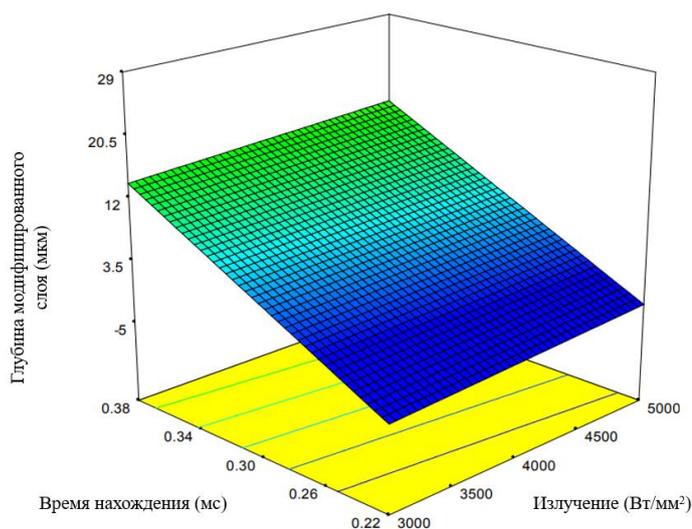


Рисунок 10 – Трехмерный график влияния лазерного излучения и времени пребывания на глубину модифицированной поверхности при размере пятна, сфокусированного на поверхности образца.

Глубина модифицированного слоя, измеренная на микрофотографиях, представлена на трехмерном графике, соответствующем лазерному облучению и времени пребывания, как показано на рисунке 10. Диапазон глубины модифицированного слоя, полученного в 27 образцах, подвергнутых лазерной модификации, составил от 0 до 29 мкм. Модифицированный слой не был достигнут в образцах, обработанных при времени пребывания менее 0,31 мс. Оказалось, что время пребывания вносит наибольший вклад в глубину модифицированного слоя. При любом заданном значении интенсивности лазерного излучения большее время пребывания увеличивало глубину модифицированного слоя.

Таким образом, измеренная глубина модифицированной поверхности в эксперименте №1 составляла от 0 до 29 мкм из-за низкого поглощения энергии. Микрофотографии образцов свидетельствуют о неэффективной обработке поверхности инструментальной стали Н13 из-за фокусного положения лазерного пятна, отражательной способности поверхности при длине волны CO₂-лазера и низкой интенсивности лазерного излучения, которая возникла из-за расфокусировки диаметра луча. Хотя фокусировка лазерного пятна как над, так и под поверхностью может обеспечить диаметр пятна 0,4 мм, фокусировка над поверхностью приводит к меньшему поглощению энергии в поверхности материала во время обработки.

Отражательная способность поверхности металлов при длине волны CO₂-лазера является проблемой при обработке поверхности. Теоретически стальная поверхность обычно поглощает менее 15 % энергии при обработке CO₂-лазером. Облучение было небольшим из-за расфокусировки луча диаметром 0,4 мм в эксперименте №1. Эти факторы объясняют, почему нерасплавленная поверхность привела к тому, что образцы обрабатывались при времени пребывания менее 0,31 мс.

Влияние фокусного положения. При фокусном положении -2,6 мм и +2,6 мм размер лазерного пятна на поверхности образца составил 0,4 мм. При отрицательном фокусном положении поверхность образца находится выше положения фокусного расстояния, в то время как при положительном фокусном положении она находится ниже положения фокусного расстояния. На рисунке 11 показано влияние фокусного положения на образцы, обработанные при времени пребывания 0,29 мс и лазерном излучении 3 946 Вт/мм².

На микрофотографиях поперечных сечений образцов, модифицированных лазером, видны три важные зоны: «зона глазури», зона термического воздействия и зона подложки или зона, не подверженная воздействию. На микрофотографии, представленной на рисунке (а), видны только два основных слоя: зона термического воздействия и подложка, образовавшиеся в результате обработки при положительном фокусном положении. На микрофотографии на рисунке (б) показан отчетливый модифицированный слой, наблюдаемый в зоне теплового воздействия и подложке в этом образце, обработанном при отрицательном фокусном

положении. Область, обозначенная А, представляет собой зону лазерного модифицирования, Б – зону термического воздействия, а В – подложку.

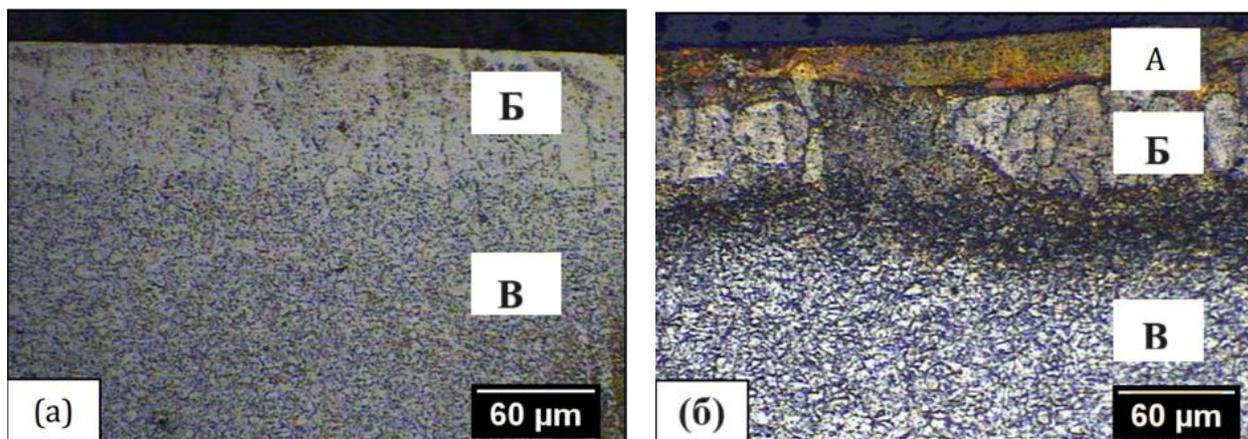


Рисунок 11 – Микрофотографии образцов, обработанных расфокусированным лучом (а) +2,6 мм и (б) -2,6 мм соответственно, где А – зона лазерного воздействия, Б – зона термического воздействия, В – подложка.

Образцы, исследованные при различном времени пребывания для этих двух фокусных положений, показаны на микрофотографиях на рисунке 12.

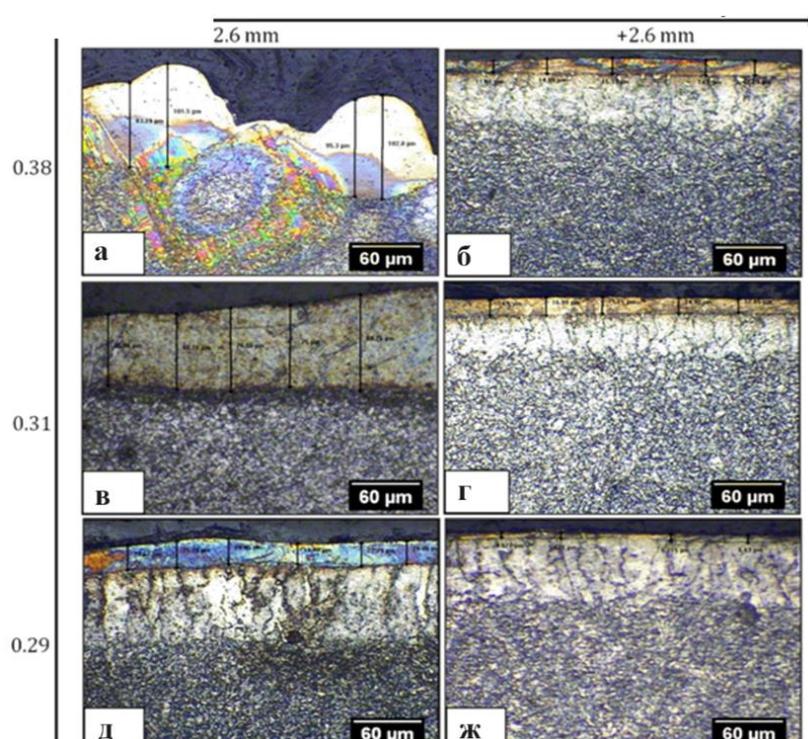


Рисунок 12 – Влияние положения фокуса на глубину модифицированного слоя при (а) и (б) 0,38 мс; (в) и (г) 0,31 мс; и (д) и (ж) 0,29 мс.

Эти образцы были обработаны при лазерном облучении 3881, 3946 и 3973 Вт/мм² и при времени пребывания 0,31, 0,29 и 0,38 мс соответственно с постоянным 50%-ным перекрытием. На рисунке 12 (а) (в) и (д) представлены микрофотографии модифицированных лазером образцов, обработанных в фокусном положении -2,6 мм. Микрофотографии на рисунке (б), (г) и (ж) представляют собой поперечные сечения образцов, обработанных при тех же настройках параметров лазера, за исключением того, что луч был сфокусирован в фокусном положении +2,6 мм.

На рисунке 13 показано сравнение максимальной глубины модифицированных поверхностей, обработанных при облучении 3881, 3946 и 3973 Вт/мм² и различном времени пребывания и фокусном положении.

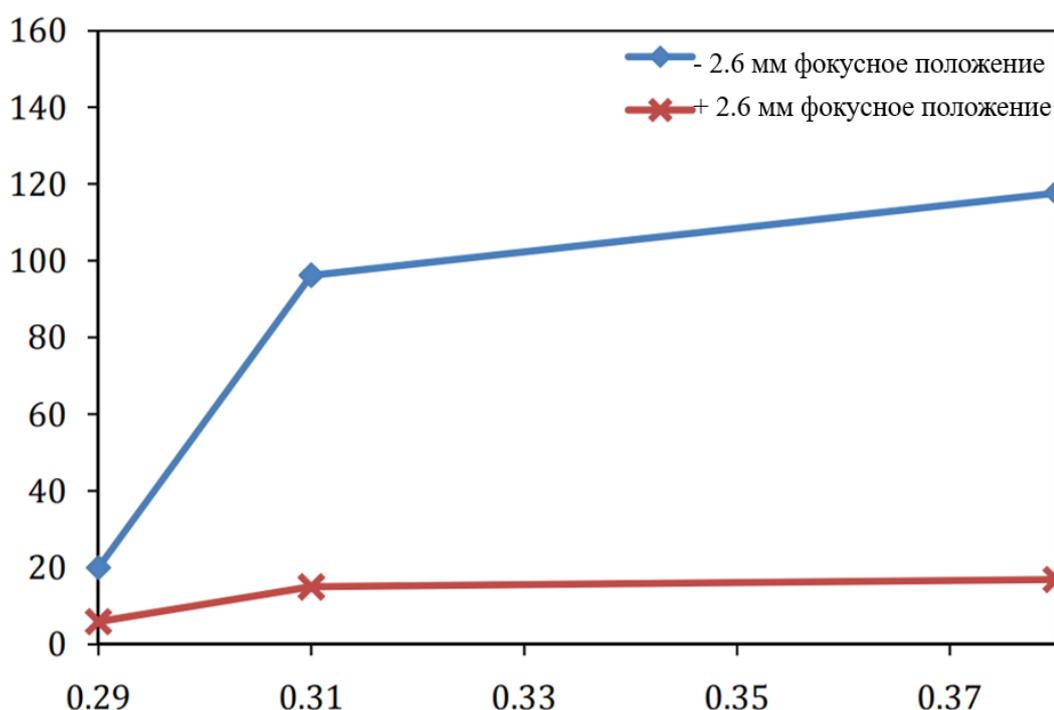


Рисунок 13 – Глубина модифицированного слоя в зависимости от времени пребывания при положительном и отрицательном фокусе.

Образцы, обработанные при фокусном положении -2,6 мм, дали в восемь раз более глубокий модифицированный слой, чем образцы, обработанные при фокусном положении +2,6 мм. Глубина модифицированной поверхности увеличивалась с увеличением времени выдержки. Разница в глубине модифицированной поверхности между двумя фокусными позициями также увеличивалась с увеличением времени выдержки.

Таким образом, можно сделать выводы о том, что фокусное положение влияет на эффективность взаимодействия материала и лазера. Хотя морфология поверхности с глубиной модифицированного слоя была неоднородной, формирование модифицированного слоя, указывающее на плавление поверхности, улучшалось, когда положение фокуса было ниже

поверхности. Снижение поглощения энергии при фокусировке над поверхностью приводило к образованию широких и неглубоких бассейнов расплава. Этот вывод в целом согласуется с результатами других работ [68]. Результаты работы, представленные в данной диссертации, показывают, что время пребывания является основным фактором, контролирующим коэффициенты потери энергии и глубину модифицированной поверхности в исследуемом диапазоне облученности от 3000 до 5000 Вт/мм².

3.3 Влияние технологических параметров на твердость и шероховатость поверхности

В эксперименте №2 металлография и твердость были исследованы для анализа глубины модифицированного слоя, образовавшегося на поверхности инструментальной стали H13, подвергнутой химическому травлению, при различных настройках параметров лазера. Геометрия наложения модифицированной поверхности с размером пятна 0,4 мм показана на микрофотографиях. Влияние химического травления на глубину модифицированного слоя, зерновой состав и твердость представлено для различных значений лазерного облучения, перекрытия и времени пребывания.

Влияние химического травления на абсорбцию поверхности стали. Оценка поглощающей способности поверхности образца была первоначально рассчитана по геометрическим размерам сварочной ванны. На рисунке ниже показана геометрия сварочной ванны, полученного одним лазерным импульсом с энергией импульса 0,17 Дж и временем пребывания 0,29 мс, полученным при частоте PRF 3810 Гц, рабочем цикле 85 % и средней мощности 646 Вт.

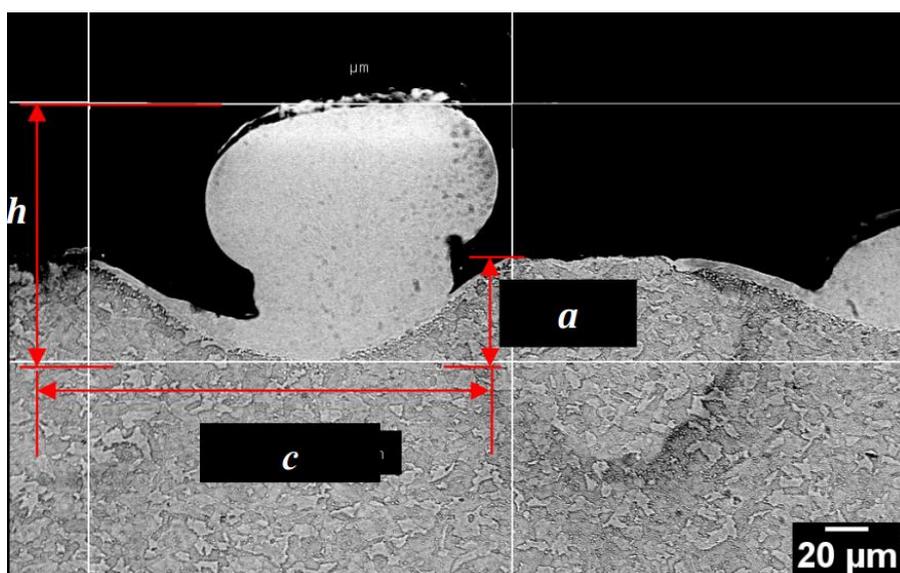


Рисунок 14 – Геометрия сварочной ванны образца E14, представленная глубиной бассейна, *a*, зазором между бассейнами, *b*, шириной бассейна, *c*, и высотой модифицированного слоя, *h*.

Измерения геометрии включали глубину сварочной ванны (а), зазор сварочной ванны (b), ширину сварочной ванны (с) и высоту модифицированного слоя, h. Глубина сварочной ванны (а) измеренная от поверхности, указывает на величину проникновения энергии лазерного импульса. При улучшенном поглощении поверхности средняя высота модифицированного слоя, h, варьировалась от 46 до 180 мкм.

Было проведено сравнение между диаметром лазерного луча 0,4 мм и полученной шириной сварочной ванны (с). Разница между диаметром луча и шириной расплавленного бассейна была определена как процент поглощения поверхности. Также была измерена высота модифицированного слоя, h, чтобы определить максимальную толщину слоя, полученного в результате процесса. Поверхностное поглощение, измеренное по соотношению ширины бассейна расплава (с) и диаметра лазерного пятна, было построено на графике.

Образцы, обработанные в эксперименте №2, на 10% перекрывают полученные области с различной глубиной поверхности благодаря гауссову профилю луча, используемому при обработке. Ссылаясь на Дикки и др. ученых, эффект облучения гауссовым пучком определяется областью I, где материал может быть обработан, в то время как область II и область III могут не обладать достаточной освещенностью для модификации поверхности [69]. На рисунке ниже представлено теоретическое и экспериментальное разделение гауссова пучка.

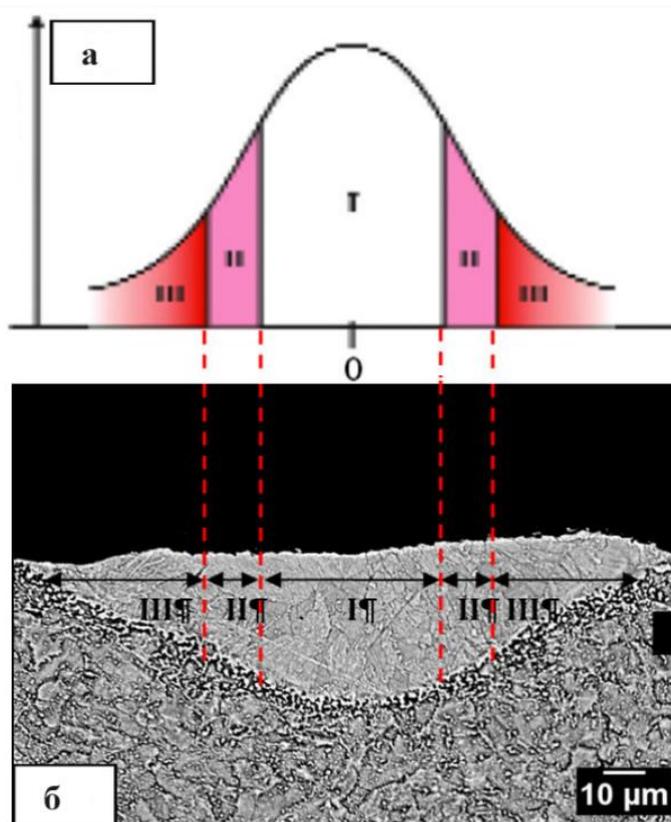


Рисунок 15 – (а) Теоретическое [69] и (б) экспериментальное разделение гауссова пучка на области на модифицированном поперечном сечении поверхности образца.

Во время обработки примерно 80% диаметра пятна было взято в качестве области обработки с требуемой интенсивностью луча. Таким образом, ожидаемый размер ванны расплава составил 0,32 мм при размере пятна лазерного луча 0,4 мм. Однако среднее значение ширины ванны расплава составило 0,23 мм, что соответствует среднему эффективному диаметру луча, составляющему 57% от размера сфокусированного пятна. Наличие зазоров между ваннами расплава, установленных с перекрытием в 10%, указывает на то, что эффективный процент перекрытия как для кругового, так и для линейного перемещения должен быть установлен на уровне не менее 30% для размера пятна 0,4 мм и интенсивности лазерного излучения 5510, 5548 и 5592 Вт/мм², времени выдержки 0,32, 0,34 и 0,38 мс, а также 2857 и настройки PRF частотой 3200 Гц. При 30%-ном перекрытии импульсы перекрывались в областях II и III. На рисунке 15 (а) и (б) из образца E8 показано соответствующее влияние гауссова пучка на размер ванны расплава, где самая глубокая область была сформирована в области I. Глубина ванны расплава уменьшилась в пределах областей II и III.

Увеличение глубины модифицированной поверхности в эксперименте №2 произошло за счет улучшения впитывающей способности поверхности в результате предварительной обработки химическим травлением. Результаты, полученные в эксперименте №2, позволили определить количество лазерной энергии, требуемой в процессе модификации поверхности инструментальной стали H13. В эксперименте №2 для получения большего количества перекрытий была увеличена PRF. В этой технологии увеличение энергии импульса при более высоком проценте перекрытия требовало более высоких настроек PRF для контроля температуры поверхности. Настройки PRF выше 5000 Гц создают эффект непрерывного режима обработки, который создает дефекты на поверхности.

Низкая энергия импульса (0,23 Дж) при высоком PRF (5000 Гц) не привела к возникновению перекрывающихся импульсов. При высокой энергии импульса и времени выдержки температура образца повышается, а отражательная способность поверхности снижается [55]. Поглощающая способность поверхности увеличивается, но профиль расплавленной ванны на верхней поверхности у большинства образцов, изготовленных в эксперименте №2, был неравномерным. Это произошло в результате сочетания высокой энергии импульса и времени выдержки, когда жидкость скапливалась над поверхностью и покидала края ванны во время затвердевания.

Поверхность из химически измененной инструментальной стали H13 стала менее отражающей и поглощала больше энергии. Геометрия сварочной ванны, образовавшейся при высокой энергии импульса, была неглубокой из-за потери тепла во время обработки. При обработке с высокой энергией импульса образцы подвергались испарению, и было обнаружено, что потери тепла из-за испарения элементов уменьшают подвод тепла к поверхности образца. Изменения глубины сварочной ванны и толщины слоя указывают на то, что параметры лазера и скорость перемещения образца могут быть установлены в

широком диапазоне технологических параметров для минимизации температуры перегрева поверхности.

Свойства твердости. На рисунке 16 показана измеренная твердость модифицированного слоя для образцов эксперимента №2. Максимальная и минимальная твердость составили 1017 и 724 HV_{0,1} соответственно. При низком рабочем цикле максимальная твердость достигалась в диапазоне от 10 до 20% перекрытия, тогда как при высоком рабочем цикле свойства твердости были максимальными в диапазоне от 40 до 50% перекрытия.

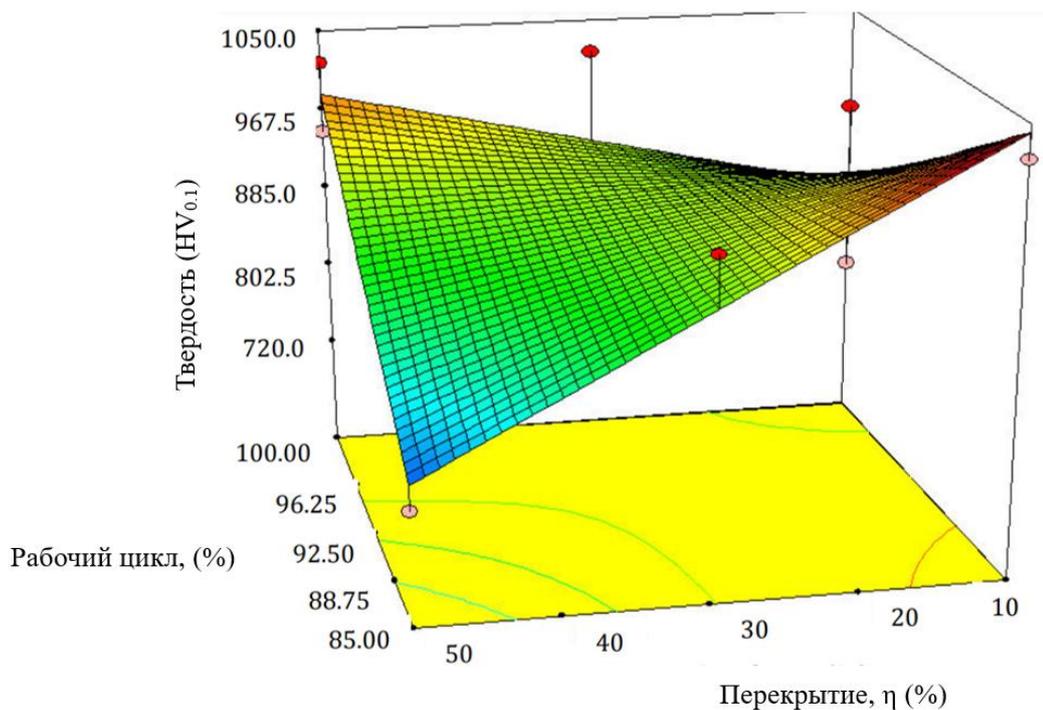


Рисунок 16 – Трехмерный график микротвердости для образцов эксперимента №2.

Настройки параметров лазера в эксперименте были разработаны таким образом, чтобы обеспечить различные скорости нагрева и охлаждения, что позволило получить различные составы и размеры зерен. Твердость образцов, модифицированных лазером, соответствует различным механизмам упрочнения. В результате металлографического исследования были выявлены два основных механизма упрочнения: измельчение зерен и образование метастабильной фазы. В сталях измельчение зерен феррита является важным методом повышения прочности и вязкости, поскольку феррит является стабильной фазой при температуре окружающей среды.

Ультрамелкозернистые материалы обладают превосходными механическими свойствами по сравнению с обычными мелкозернистыми или крупнозернистыми материалами [59]. В таблице 6 показан диапазон средней твердости, измеренной в полученных и модифицированных образцах проведенного эксперимента.

Таблица 6 – Показатели твердости готовых и модифицированных лазером стали Н13 при различных скоростях нагрева и периодах охлаждения

Образец	Как получено Н13	Модифицированная лазером инструментальная сталь Н13
Диапазон твердости HV _{0,1}	280	724-1017
Диапазон H _R (10 ⁶ К/с)	-	3,69-4,81
Диапазон t _{охл.} (мс)	-	≤0.026
Диапазон C _R (106 К/с)	-	≥54.69

Повышению твердости образцов эксперимента №2 способствовало измельчение зерен наряду с наличием мартенситной фазы, что согласуется с предыдущей работой [61]. Было обнаружено, что смещение размера зерен в зависимости от микротвердости при изменении с 30 мкм (до лазерной обработки) до 200 нм (после лазерной обработки) соответствует соотношению Холла и Петча. Поведение Холла–Петча можно наблюдать для низкоуглеродистой стали с зернистостью, изменяющейся от микрона до субмикрона, независимо от способа производства, и оно справедливо для изменения размера зерна в диапазоне двух порядков величины.

Свойства твердости образцов эксперимента №2 соответствуют различным рабочим циклам и перекрытиям, что указывает на двойной эффект энергии импульса и времени выдержки. Благодаря разработанной конструктивной модели модифицированная поверхность высокой твердости может быть получена при высокой энергии импульса 0,23 Дж с перекрытием менее чем на 20% и при меньших рабочих циклах от DOE2 в диапазоне от 85 до 88%. При использовании импульсов с меньшей энергией от 0,17 до 0,19 Дж требуется высокий рабочий цикл более чем на 97% и перекрытие не менее чем на 35%.

Комбинация энергии импульса и времени выдержки определяет скорость нагрева поверхности и скорость закалки переохлажденного аустенита. При 100%-ном рабочем цикле образцы охлаждались медленнее, что приводило к накоплению тепла на поверхности и изменениям скорости переохлаждения и эффекта. Скорость охлаждения при 85%-ном рабочем цикле была достаточной при малом перекрытии для значительного переохлаждения и получения ультрадисперсного феррита. При высоких рабочих циклах от 98 до 100% твердость была максимальной при перекрытии 40% и 50% из-за меньшей интенсивности используемого лазерного излучения (за счет установки более высокого PRF), что позволяло добиться большего переохлаждения. Более низкая освещенность приводила к более высокой скорости охлаждения, вызванной более высокой степенью переохлаждения.

Шероховатость поверхности. Была обнаружена линейная зависимость между рабочим циклом, перекрытием и средней шероховатостью поверхности. Средняя шероховатость поверхности образцов эксперимента №2 при различных перекрытиях и процентах рабочего цикла показана на рисунке ниже.

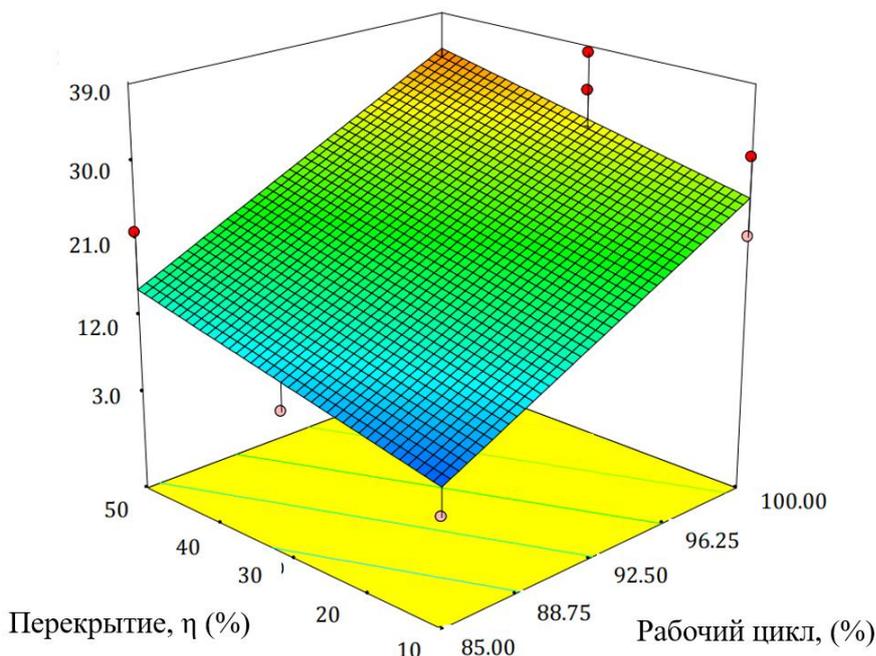


Рисунок 17 – Трехмерный график средней шероховатости поверхности для образцов эксперимента №2 при различных настройках перекрытия и рабочего цикла.

Средняя шероховатость поверхности варьируется от 3,5 до 38,2 мкм. Минимальная шероховатость поверхности в 3,5 мкм была достигнута в образцах, обработанных при 10 % перекрытии и 85 % рабочем цикле. При максимальном рабочем цикле и перекрытии шероховатость поверхности была самой высокой - 38,2 мкм Ra. Следующее уравнение может быть использовано для расчета R_{cp} по результатам эксперимента №2 в пределах испытанных параметров.

$$R_{cp} = 20.68 + 9.61A + 4.25B, \text{ где } A - \text{рабочий цикл, а } B - \text{перекрытие.}$$

Таким образом, в эксперименте №22 был достигнут диапазон средней шероховатости поверхности (R_{cp}) от 3,5 до 38,2 мкм с учетом двух важных факторов, таких как перекрытие и рабочий цикл, которые не согласуются с предыдущими работами [63]. Минимальная шероховатость поверхности была достигнута в образцах, обработанных с минимальным перекрытием в 10% и рабочим циклом в 85%. Это было достигнуто за счет меньшего количества импульсов при перекрытии в 10% по сравнению с перекрытием в 30%. Увеличение как числа импульсов, так и рабочего цикла приводит к увеличению времени взаимодействия материала с лазером, что приводит к более высокому

поглощению лазерной энергии [60]. При поглощении большего количества лазерной энергии температура поверхности повышалась и формировались неровные геометрические формы, которые увеличивали шероховатость поверхности [61].

3.4 Влияние скорости нагрева и охлаждения на твердость

Профили нагрева и охлаждения, полученные с помощью модели, показаны на рисунке 17. На рисунке 17 смоделирована номинальная температура в зависимости от времени для образца Н13, обработанного при мощности 1138 Вт, рабочем цикле 24 % и скорости траверсы 261 мм/с. При частоте 2900 Гц время, необходимое для полного импульса, составило 0,35 мс. В определенной точке $Y=70,6$ мкм было построено распределение номинальной температуры по глубине расплавленного бассейна. Время, необходимое для достижения максимальной номинальной температуры на поверхности (где $Z = 0$), составило 0,121 мс.

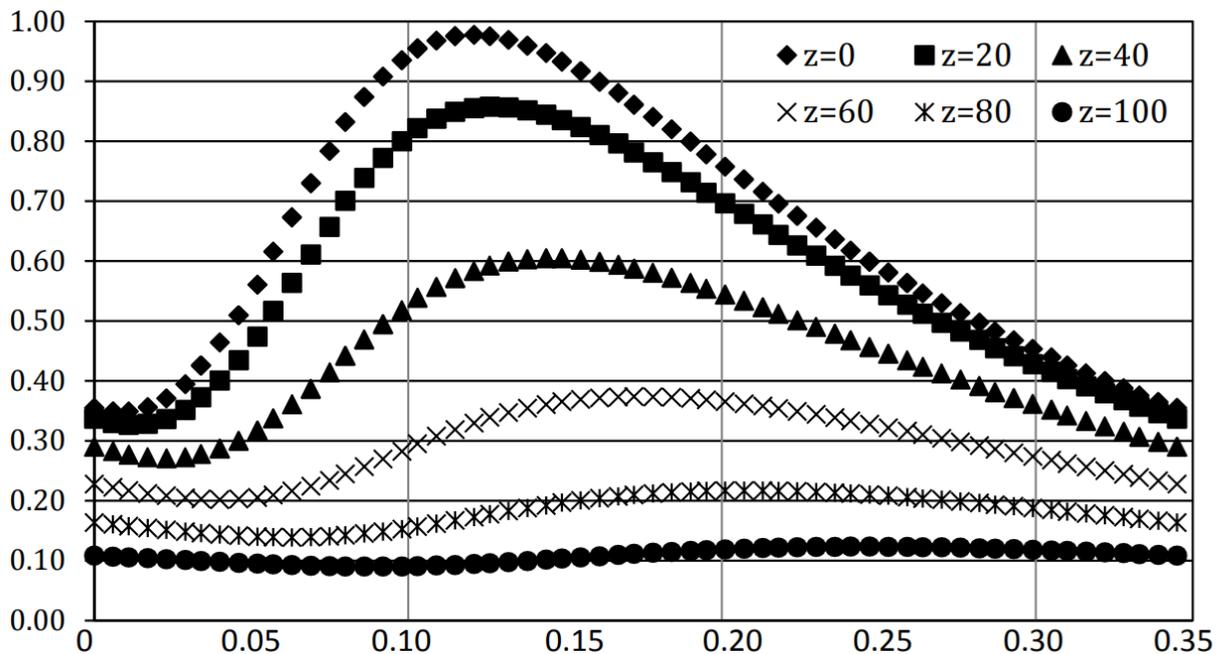


Рисунок 17 – Номинальная температура как функция времени в позиции $Y=70,6$ мкм для различных глубин.

Начальная и максимальная достигнутые температуры уменьшались с увеличением глубины. Время достижения этих температур в более глубоких положениях Z также было больше по сравнению с более мелкими областями. Скорость охлаждения, зарегистрированная в центре бассейна расплава, была в двадцать раз выше скорости охлаждения на расстоянии 100 мкм от центра в направлении Y для шести положений Z (0, 20, 40, 60, 80 и 100 мкм).

Моделирование температурного профиля в модифицированной поверхности было косвенно проверено экспериментально. Обработка проводилась при одинаковых настройках параметров лазера и уровне поглощающей способности поверхности образца для достижения максимальной твердости. Было исследовано семь наборов параметров. Они включали:

- пиковую мощность 1138 Вт;
- частоту PRF 2900 Гц;
- длительность импульса 0,083 мс;
- скорость перемещения 261 мм/с;
- теплопроводность инструментальной стали Н13 $5,35 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
- теплопроводность инструментальной стали Н13 $28,6 \text{ Вт}/\text{м}^\circ\text{С}$;
- коэффициент поглощения 0,6.

Значения микротвердости, измеренные на различных расстояниях в пределах обработанной поверхности, представлены на рисунке 18.

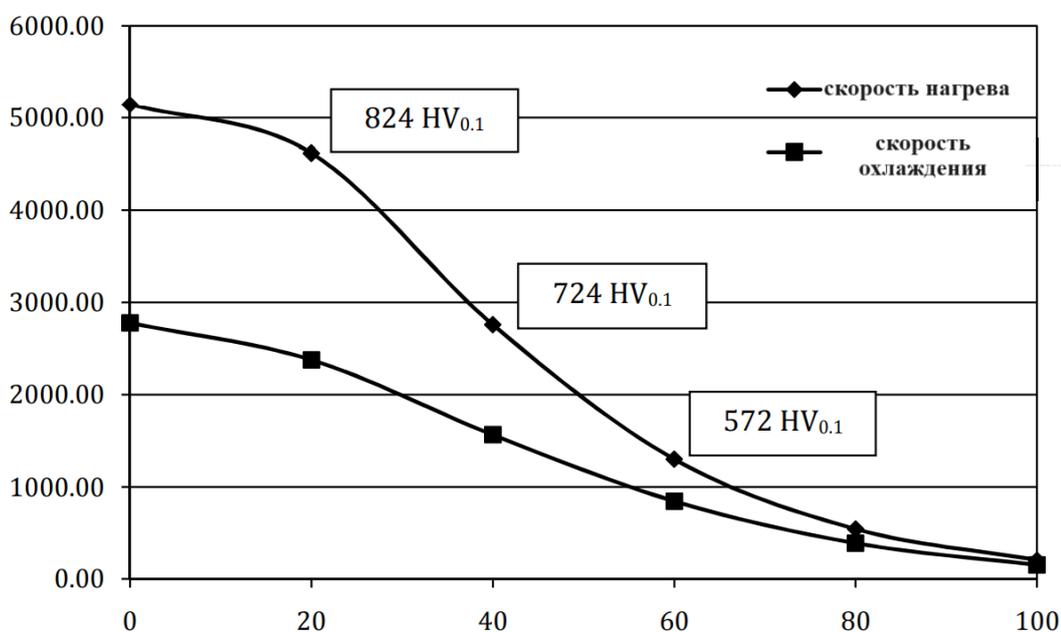


Рисунок 18 – Микротвердость модифицированной поверхности соответствует номинальной скорости нагрева и охлаждения расплавленной ванны на модифицированной поверхности образца по глубине.

Максимальная твердость $824 \text{ HV}_{0.1}$ была достигнута при номинальной скорости охлаждения 2377 с^{-1} и номинальной скорости нагрева 4618 с^{-1} при глубине модифицированной поверхности 20 мкм. При микротвердости 724 и $572 \text{ HV}_{0.1}$ номинальное отношение скорости нагрева к скорости охлаждения составляло 1,76 и 1,54 соответственно. По мере уменьшения отношения скорости нагрева к скорости охлаждения микротвердость также уменьшалась.

Моделирование распределения температуры на глазурованной импульсным лазером поверхности позволяет предсказать скорость нагрева и охлаждения в определенных точках расплавленного бассейна. Уменьшение

скорости охлаждения от центра к краю расплавленного бассейна при моделировании было связано с падением температуры на границе раздела жидкость-твердое тело. Скорость охлаждения на переходной границе жидкость-твердое тело в расплавленном бассейне определяет процесс затвердевания и микроструктуру. Скорости нагрева и охлаждения коррелировали с твердостью обработанных образцов.

Максимальная твердость 824 HV_{0.1} была достигнута при номинальном соотношении скоростей нагрева и охлаждения 1,94. При более высоких значениях Z более низкие скорости нагрева и охлаждения приводили к соответствующему снижению микротвердости. По сравнению с твердостью подложки 280 HV_{0.1}, лазерная модификация поверхности дала чрезвычайно твердую поверхность, которая по крайней мере в три раза превосходила подложку. Существует сильная связь между уменьшением микротвердости и снижением скорости нагрева и охлаждения. Поэтому результаты моделирования могут быть использованы для прогнозирования твердости, измеренной экспериментально. Эта модель оказалась полезной и важной для составления карт процессов модификации поверхности при использовании импульсного лазерного режима.

Таким образом, проведенный эксперимент подтверждает, что лазерное облучение оказывает существенное влияние на микроструктуру, механические свойства и свойства поверхности штампованных сталей. Эти результаты подчеркивают важность понимания влияния лазерного излучения на материалы, потенциально применимые в современных технологиях металлообработки и производства. Полученные данные являются основой для дальнейших исследований и оптимизации лазерной обработки сталей с целью улучшения их функциональных свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований в ходе выполнения диссертационной работы были сделаны следующие выводы и предложения:

1) Штамповая сталь – это легированная инструментальная сталь, предназначенная для использования в областях применения, где температура поверхности обычно превышает 200°C. Во время обработки штамп соприкасается с горячим материалом, температура которого значительно превышает 200°C. Помимо длительной тепловой нагрузки, возникает дополнительное напряжение из-за периодического изменения температуры от температуры. Горячекатаные штамповые стали для таких применений должны быть способны выдерживать не только универсальные механические и абразивные нагрузки, обычно возникающие в штамповых сталях, но и выдерживать тепловые нагрузки.

2) Стали для штампов были разработаны для того, чтобы выдерживать комбинации тепла, давления и абразивного износа, связанные с такими операциями. В настоящее время существует несколько типов штамповых сталей, но желание повысить их эксплуатационные характеристики все еще сохраняется. Стали H1 - H19 – на основе хрома, H20 - H39 – на основе вольфрама, а H40 - H59 – на основе молибдена. Объект исследования горячекатаная инструментальная сталь AISI H13 является одним из наиболее распространенных материалов для изготовления штампов и пресс-форм, используемых в литейной промышленности.

3) Традиционные методы упрочнения поверхности, такие как индукционная закалка, напыление, упрочнение и прокатка, не могут удовлетворить требованиям. Лазерные технологии демонстрируют выдающийся потенциал для улучшения свойств поверхности металлических материалов и преодоления ограничений применения традиционных технологий модификации; поэтому они рассматриваются как универсальный инструмент обработки и общий метод обработки для будущих производственных систем в современной промышленности. Применение лазерной технологии для модификации поверхности металлов позволяет использовать тепловую энергию лазерного луча для изменения свойств поверхности материалов. Лазерная обработка имеет больше преимуществ по сравнению с традиционными методами, которые включают локальный нагрев поверхности без изменения свойств материала подложки, точность и высокую скорость работы, а также низкую стоимость

4) Существует несколько методов лазерного модифицирования поверхности: лазерное легирование; трансформационное упрочнение; лазерная полировка; лазерное глазурирование; лазерная наплавка и т.д. Эти методы различаются по изменению состава на поверхности материала и скорости поглощения энергии. Среди них лазерное упрочнение, лазерная закалка, глазурирование и лазерная наплавка являются наиболее популярными и играют важную роль в современном промышленном производстве.

5) Свойства материала, такие как отражательная способность поверхности, тепловая диффузия, температура плавления и фазовое поведение, важны для определения влияния лазера в процессе модификации поверхности. Лазерный луч используется для обработки поверхности с целью повышения механических свойств путем поверхностного модифицирования конструкционных и легированных сталей AISI H13. Поверхность стали может быть быстро расплавлена (выше температуры аустенита) и быстро закалена. Обработанный слой может демонстрировать высокую твердость за счет более мелких зерен, вторичного карбида и твердых неравновесных микроструктур, которые тесно связаны с подложкой и самой модифицированной областью

6) На твердость влияют такие параметры лазера, как: плотность мощности; частота следования импульсов; скорость сканирования. Влияние шероховатости поверхности на аналитическую точность зависит от энергии лазерного луча. Энергию луча можно регулировать, изменяя интенсивность лазерного излучения, количество импульсов или частоту повторения импульсов, а также длительность импульса. Экспериментальные результаты показывают шероховатость поверхности как функцию лазерного излучения, количества импульсов, длительности импульса и периода импульса.

7) Представление результатов начинается с данных по зерновому составу и твердости инструментальной стали AISI H13. Затем последовательно представлены проекты лазерного модифицирования поверхности. Начиная с эксперимента №1, представлено влияние параметров лазера на глубину модифицированной поверхности. Для эксперимента №2 представлены результаты влияния протравленной поверхности на глубину модифицированной поверхности и геометрию перекрытия, полученную с помощью пятна диаметром 0,4 мм. В эксперимента №2 представлены характеристики твердости и шероховатости поверхности

8) Основной целью эксперимента №1 было получение модифицированного поверхностного слоя, причем глубина модификации зависела от настроек параметров лазера. Образцы, обработанные лазером, были подготовлены для металлографического исследования. Микрофотографии поперечного сечения поверхности, модифицированной лазером, были записаны для измерения глубины обработанной поверхности. В эксперименте №1 было проведено металлографическое исследование для анализа глубины модифицированного слоя, сформированного на подложке из инструментальной стали H13 при различных настройках параметров. В этой работе было определено влияние режима импульсного лазера, лазерной облученности, времени пребывания и фокусного положения лазерного пятна на глубину модифицированной поверхности.

9) В эксперименте №2 металлография и твердость были исследованы для анализа глубины модифицированного слоя, образовавшегося на поверхности инструментальной стали H13, подвергнутой химическому травлению, при различных настройках параметров лазера. Геометрия

наложения модифицированной поверхности с размером пятна 0,4 мм показана на микрофотографиях. Влияние химического травления на глубину модифицированного слоя, зерновой состав и твердость представлено для различных значений лазерного облучения, перекрытия и времени пребывания.

10) Моделирование распределения температуры на глазурованной импульсным лазером поверхности позволяет предсказать скорость нагрева и охлаждения в определенных точках расплавленного бассейна. Уменьшение скорости охлаждения от центра к краю расплавленного бассейна при моделировании было связано с падением температуры на границе раздела жидкость-твердое тело. Скорость охлаждения на переходной границе жидкость-твердое тело в расплавленном бассейне определяет процесс затвердевания и микроструктуру. Скорости нагрева и охлаждения коррелировали с твердостью обработанных образцов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Metal Forming Machine Tools Market, 2019-2032, <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/metal-forming-tools-market-101841>
2. Automotive Metal Stamping Market Size and Growth Share 2024 : Future Trends and Developments to 2032, <https://www.linkedin.com/pulse/automotive-metal-stamping-market-size-qoiyc/?published=t>
3. Позняк Л.А. Инструментальные стали. – М., «Металлургия», 1977. – 168 с.
4. Staia M. H., Pérez-Delgado Y., Sancho C., Castro A., Le Bourhis E., Pucho Cabrera E. Hardness properties on high-temperature wear behavior of nitrided AISI D2 tool steel, prior and after PAPVD coating // *Wear*. – 2019. – 267. – pp. 1452–1461.
5. Брезинова Ю., Винас Ю., Гузанова А., Живчак Ю., Брезина Ю., Зайлер А., Войд К.А. Некоторые свойства наплавленных слоев, созданных по технологии PDA // *Металлы*. – 2021. – 13. – С. 257-269.
6. Tóth L. Reduction of Retained Austenite in Tool Steels // *МТК*. – 2022. – 16. – pp. 52–57.
7. Bala P. The Kinetics of Phase Transformations During Tempering of Tool Steels With Different Carbon Content // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2009. – 2(54). – pp. 491–498
8. Bostjan A., Bojan P., Jaka B. Electro slag Remelting: A Process Overview // *Materials Technology*. – 2016. – 50. – pp. 971-979.
9. Система классификации инструментальных сталей Американским институтом черной металлургии, <https://www.steel.org>
10. Околович Г. А.. Штамповые стали для холодного деформирования металлов. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – 202 с.
11. Коротков А.Н., Короткова Л.П., Лацинина С.В. Влияние технологии производства на структуру и свойства порошковых быстрорежущих сталей // *Материаловедение и инженерия*. – 2020. – 9. – С. 22-31.
12. Davis J.R. *Tool Materials*, ASM. – London, 1995. – 505 p.
13. Wilson R. *Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steels*. – London, 1975. – 203 p.
14. Артингер И. Инструментальные стали и их термическая обработка. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
15. Roberts G. et al. *Tool steels*. – London, 1998. – 341 p.
16. Позняк Л.А., Скрынченко Ю.М., Тишаев С.И. Штамповые стали. – М., 1980. – 244 с.
17. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике, справочник, М. – Л., изд-во. «Энергия», 1967. – 240 с.
18. Кушнер В.С., Верещака А.С., Схиртладзе А.Г., Негров Д.А., Бургонова О.Ю. *Материаловедение: учеб. для студентов вузов*. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. – 232 с

19. Курдюмов Л.Н. *Материаловедение*. – М.: Машиностроения, 2020. – 54 с.
20. Шестопалова Л.П., Лихачёва Т.Е. *Металловедение: макро- и микроскопический анализ металлов*. – М.: МАДИ, 2017. – 56 с.
21. Podgornik B., Leskovšek V. Experimental evaluation of tool and high-speed steel properties using multi functional K_{IC}-test specimen // *Steel Res. Int.* – 2013. – 84. – pp. 1294-1301.
22. Pérez M., Belzunce F.J. The effect of deep cryogenic treatments on the mechanical properties of an AISI H13 steel // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2015. – 624. – pp. 32-40.
23. Shanbhag V.V., Rolfe B.F., Griffin J.M., Arunachalam N., Pereira M.P. Understanding galling wear initiation and progression using force and acoustic emissions sensors // *Wear.* – 2019. – 426-437 pp.
24. Eller T., Greve L., Andres M., Medricky M., Meinders V.T. Determination of strain hardening parameters of tailor hardened boron steel up to high strains using inverse FEM optimization and strain field matching // *J. Mater. Process. Technol.* – 2016. – 228. – pp. 43-58.
25. Подгорник Б., Лесковшек В. Механизмы изнашивания и разработка поверхности формовочных инструментов // *Матер. Технология*. – 2021. – 49. – С. 313-324.
26. Li J.-Y., Chen Y.-L., Huo J.-H. Mechanism of improvement on strength and toughness of H13 die steel by nitrogen // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2015. – 640. – pp. 16-23.
27. Groche P., Christiany M. Evaluation of the potential of tool materials for the cold forming of advanced high strength steels // *Wear* 2013. – 302. – pp. 1279-1285.
28. Telasang G., Majumdar J.D., Padmanabham G., Manna I. Structure–property correlation in laser surface treated AISI H13 tool steel for improved mechanical properties // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2018. – 599. – pp. 255-267.
29. Салимианризи А., Форузмер Э., Бадроссамай М. и др. Влияние лазерного ударного упрочнения на свойства поверхности и остаточное напряжение Al6061-T6 // *Оптика и лазеры в машиностроении*. – 2022. – 77. – С. 112-117.
30. Zhang Q., Wang L., Mei X., Yao J. Development of Laser Surface Modification Technology // *Strategic Study of CAE.* – 2020. – 22(3).
31. Григорьянц А.Г. *Основы лазерной обработки материалов*. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
32. Верещагин М.Н., Целуева С.Н., Целуев М.Ю. Модифицирование поверхностных слоев высокоэнергетической обработкой // *Литьё и металлургия*. – 2019. – 2. – С. 109-116.
33. Верещагин М.Н., Целуева С.Н., Целуев М.Ю. Модифицирование поверхностных слоев металлических деталей импульсной лазерной обработкой // *Литьё и металлургия*. – 2020. – 1. – С. 99-109.

34. Шальнова С.А. Аддитивные технологии и лазерная поверхностная обработка как альтернатива классическим методам производства и обработки деталей // *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты*. – 2016. – 26(2). – С. 38-42.
35. Olsen F.O., Alting L. Pulsed Laser Materials Processing, Nd-YAG versus CO2 Lasers // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. – 1995. – 44(1). – pp. 141-145.
36. Mondal A.K., Kumar S., Blawert C., Dahotre N.B. Effect of laser surface treatment on corrosion and wear resistance of ACM720 Mg alloy // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – 202(14). – pp. 3187-3198.
37. Paschotta R. Laser Surface Modification // *RP Photonics Encyclopedia*. – 2024. – 7. – pp 218-226.
38. Brabazon D., Naher S., Biggs P. Glazing of tool dies for semi-solid steel forming // *International Journal of Material Forming*. – 2008. – 1(0). – pp. 985-988.
39. Brabazon D., Naher S., Biggs P. Laser surface modification of tool steel for semi-solid steel forming // *Solid State Phenomena*. – 2008. – 141. – pp. 255-260.
40. Pinkerton A.J., Li L. An investigation of the effect of pulse frequency in laser multilayer cladding of stainless steel // *Applied Surface Science*. – 2023. – 208. – pp. 405-410.
41. Mioković T., Schulze V., Vöhringer O., Löhe D. Influence of cyclic temperature changes on the microstructure of AISI 4140 after laser surface hardening // *Acta Materialia*. – 2017. – 55(2). – pp. 589-599.
42. Хохлов В.С. Повышение эксплуатационных характеристик изделий из чугуна методом лазерной закалки // *Вестник магистратуры*. – 2018. – 12-4 (87). – С. 19-21.
43. Шлякова Е.В., Соловьёв А.А., Толмачева Н.А. Исследование влияния лазерной термообработки и лазерного легирования на микротвердость жаропрочных сталей и сплавов // *Национальные приоритеты России*. – 2014. – 2 (12). – С. 226-233.
44. Шальнова С.А. Аддитивные технологии и лазерная поверхностная обработка как альтернатива классическим методам производства и обработки деталей // *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты*. – 2016. – 26(2). – С. 38-42.
45. Wissenbach K. *Surface Treatment*. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. – 239 p.
46. Lamikiz A., Sánchez J.A., de Lacalle L.N.L., del Pozo D., Etayo J.M. Surface Roughness Improvement Using Laser-Polishing Techniques // *Wear*. – 2016. – 19. – pp. 526-531.
47. Temmler A., Willenborg E., Wissenbach K. Laser polishing // *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM)*. – 2012. – 8243. – pp. 171-183.
48. Lamikiz A., Sánchez J. A., López de Lacalle L. N., Arana J. L. Laser polishing of parts built up by selective laser sintering // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2017. – 47(12). – pp. 2040-2050.

49. Ma C.P., Guan Y.C., Zhou W. Laser polishing of additive manufactured Ti alloys // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2017. – 93. – pp. 171-177.
50. Zhu L., Wang S., Pan H., Yuan C., Chen X. Research on remanufacturing strategy for 45 steel gear using H13 steel powder based on laser cladding technology // *J. Manuf. Process*. – 2020. – 49. – pp. 344–354.
51. Zhao X., Lv Y., Dong S., Yan S., He P., Liu X. The effect of thermal cycling on direct laser-deposited gradient H13 tool steel: Microstructure evolution, nanoprecipitation behaviour, and mechanical properties // *Mater. Today Commun.* – 2020. – 25. – pp. 101-109.
52. Робертс Г.А., Кеннеди Р., Краусс Г. Инструментальные стали. – Огайо: ASM International, 1998. – 107 с.
53. Рыкалин Н.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
54. Hirogaki T., Nakagawa H., Hayamizu M., Kita Y., Kakino Y. In-situ heat treatment system for die steels using YAG laser with a machining center // *Precision Engineering*. – 2021. – 25(3). – pp. 212-217.
55. Fung C., Peng K., Doong J. Study of surface temperature on laser cutting and welding power absorption // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 1990. – 17(2). – pp. 147-154.
56. Сельван Дж. С., Субраманьян К., Нат А.К. Влияние лазерного поверхностного упрочнения на сталь стандарта EN18 (AISI 5135) // *Журнал технологии обработки материалов*. – 2019. – 91(1-3). – С. 29-36.
57. Bergström D., Powell J., Kaplan A.F.H. The absorptance of steels to Nd:YLF and Nd:YAG laser light at room temperature // *Applied Surface Science*. – 2007. – 253(11). – pp. 5017-5028.
58. Abboud J.H., Benyounis K.Y., Olabi A.G., Hashmi M.S.J. Laser surface treatments of ironbased substrates for automotive application // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2017. – 182(1-3). – pp. 427-431.
59. Hua M., Shao T.M., Tam H.Y. Surface modification of DF-2 tool steel under the scan of a YAG laser in continuously moving mode // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2019. – 209(10). – pp. 4689-4697.
60. Jiang W., Molian P. Nanocrystalline TiC powder alloying and glazing of H13 steel using a CO2 laser for improved life of die-casting dies // *Surface and Coatings Technology*. – 2001. – 135(2-3). – pp. 139-149.
61. Кабал Л.М., Ромеро Д., Баэна Дж.М., Ла Серна Дж. Влияние рельефа поверхности на характеристики нержавеющей стали с помощью лазерно-индуцированной спектроскопии разрушения // *Анализ поверхности и интерфейса*. – 2019. – 27(9). – С. 805-810.
62. Li T., Lou Q., Dong J., Wei Y., Liu J. Modified surface morphology in surface ablation of cobalt-cemented tungsten carbide with pulsed UV laser radiation // *Applied Surface Science*. – 2021. – 172(3-4). – pp. 331-344.

63. Pinkerton A.J., Li L. The effect of laser pulse width on multiple-layer 316L steel clad microstructure and surface finish // *Applied Surface Science*. – 2018. – 208-209. – pp. 411-416.

64. Тихомирова Е.А., Будиновский С.А., Живушкин А.А., and Сидохин Е.Ф. Особенности развития термической усталости в деталях из жаропрочных сплавов с покрытием // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – 3 (48). – С. 20-25.

65. Zhou H., Tong X., Zhang Z., Li X., Ren L. The thermal fatigue resistance of cast iron with biomimetic non-smooth surface processed by laser with different parameters // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – 428(1-2). – pp. 141-147.

66. Tong X., Li F., Liu M., Dai M., Zhou H. Thermal fatigue resistance of non-smooth cast iron treated by laser cladding with different self-fluxing alloys // *Optics & Laser Technology*. – 2010. – 42(7). – pp. 1154-1161.

67. Medeiros S.N., Cadore S., Pereira H.A., Santos I.A., Colucci C.C., Paesano Jr. A. Quasicrystalline phase formation in the mechanically alloyed Al70Cu20Fe10 // *Hyperfine Interacts*. – 2020. – 13. – pp. 213-217.

68. Lee J., Jang J., Joo B., Son Y., Moon Y. Laser surface hardening of AISI H13 tool steel // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2019. – 19(4). – pp. 917-920.

69. Dickey F.M., Weichrnan L.S., Shagam R.N. Laser Beam Shaping Techniques // *High-Power Laser Ablation*. – 2000. – 4065. – pp. 1054-1071.