

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ СКАНИРУЮЩИМ ЛУЧОМ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ СТАЛИ 40Х

*Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь*

*Результаты экспериментов, достигнутые в настоящий момент, позволили формировать прямоугольное пятно лазерного воздействия с градиентами плотности мощности как в поперечном, так и продольном направлении. Это позволяет значительно расширить технологические возможности лазерной обработки. Исходя из полученных экспериментальных результатов, исследованы закономерности формирования упрочненных слоев и точностных параметров боковых поверхностей зубчатых колес в зависимости от варьируемых технологических параметров лазерного сканирующего излучения. Анализ полученных регрессионных зависимостей свидетельствует о том, что на микрогеометрию поверхности зубчатого колеса после лазерной сканирующей обработки оказывают все параметры луча – ширина, скорость и амплитуда, но наибольшее управляющее влияние оказывает ширина луча.*

Повышение несущей способности, точности, чистоты поверхности, контактной и изгибной прочности зубчатых передач при снижении затрат на их производство является основой для разработки новых технологических процессов изготовления зубчатых колес, в том числе их технологии упрочнения.

Упрочнение и модифицирование поверхностей сканирующим лучом лазера за счет высокой частоты развертки и возможность управления при этом мощностью излучения позволяет получать так называемое «псевдопятно» лазерного воздействия с заданным распределением энергии по сечению лазерного пятна [1]. При изменении определенных эксплуатационных характеристик требуется оптимизация режимов упрочнения при разработке технологии для конкретных условий нагружения упрочняемой пары зубчатых колес.

Результаты, достигнутые в настоящий момент, позволили формировать прямоугольное пятно с градиентами плотности мощности как в поперечном, так и продольном направлении [2]. При этом технологические возможности лазерной обработки значительно расширяются. Исследованы закономерности формирования упрочненных слоев и точностных параметров боковых поверхностей зубчатых колес в зависимости от варьируемых технологических параметров лазерного сканирующего излучения, исходя из полученных экспериментальных результатов, и разработан процесс развертки сканирующего поля, который позволяет одновременно перемещаться в горизонтальном направлении и смещаться вниз в зависимости от скорости перемещения источника лазерного луча или детали. Лазерная закалка боковых поверхностей зубчатых колес с использованием сканирующего излучения позволит обеспечить оптимальный энерговклад в каждый элемент поверхности и, соответственно, оптимальное распределение свойств согласно распределению факторов износа по рабочей поверхности зубьев.

Все параметры лазерной обработки оказывают влияние на твердость: твердость повышается с увеличением скорости луча и уменьшается с увеличением ширины луча и амплитуды [2]. Также можно определить влияние параметров лазерной закалки на шероховатость поверхности зубчатых колес.

Была составлена матрица планирования (таблица данных), в которой определили пределы изменения основных входных параметров: ширина луча лазера ( $X_3$ ) 0,5–3 мм, амплитуда луча ( $X_2$ ) 4–8 мм и скорость луча лазера ( $X_1$ ) от 300 до 1000 мм/мин (табл. 1). Закалка образцов из стали 40Х сканирующим излучением на различных режимах проводилась на оптоволоконном иттербиевом лазере мощностью 2 кВт, эксперименты в каждой точке выполнялись трижды.

Таблица 1 – Исходные данные для планирования эксперимента

Входные параметры	$Z_3$ , ширина луча	$Z_2$ , амплитуда луча	$V$ , скорость
Размерность входных параметров	мм	мм	мм/мин
Кодовые значения	$X_3$	$X_2$	$X_1$
$X_{max}$	3	8	1000
$X_{осн}$	1,75	6	650
$X_{мин}$	0,5	4	300
$\Delta X$	1,25	2	350

Значения основного уровня переменной есть среднее значение выбранного интервала:

$$X_{осн} = \frac{X_{max} + X_{мин}}{2}, \quad (1)$$

где  $X_{max}$  – скорость максимальная, мм/мин, амплитуда и ширина луча максимальные, мм;  
 $X_{мин}$  – скорость минимальная, мм/мин, амплитуда и ширина луча максимальные, мм;  
 $X_{осн}$  – среднее значение скорости, мм/мин, амплитуда и ширина луча максимальные, мм.

Интервал варьирования  $\Delta X$  скорости и давления определяется как максимальное отклонение исследуемых параметров от основного уровня:

$$\Delta X = X_{max} - X_{мин}, \Delta X = X_{осн} - X_{мин}. \quad (2)$$

Кодовые значения переменных  $X_i$  и определяется по формуле:

$$X_i = \frac{\tilde{X} - X_{осн}}{\Delta X}. \quad (3)$$

В этом случае в нормированном виде все исследуемые параметры независимо от их размерности будут изменяться в интервале от  $-1$  до  $+1$ . Это дает возможность при получении зависимости  $P_x = (x_1, x_2)$  в виде полинома:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j \\ i < j}}^k b_{ij} x_i x_j. \quad (4)$$

По значениям коэффициентов ( $b_0, b_{ij}$ ) оценить влияние минимальной и максимальной скорости и минимальных и максимальных амплитуды и ширины.

Таблица 2 – Матрица планирования

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

В этой матрице величина (+1) соответствует максимальному значению независимой переменной, а величина (-1) – минимальному значению.

В соответствии с матрицей планирования была выполнена экспериментальная часть работы.

Экспериментальные данные также сводим в табл. 3.

Таблица 3 – Экспериментальные данные шероховатости (параметр  $R_a$ , мкм, для стали 40X, упрочненной лазером)

№ опыта	$P_{y1}$	$P_{y2}$	$P_{y3}$
1	4,48	4,70	4,39
2	4,84	4,93	5,11
3	3,76	3,94	3,85
4	4,48	4,79	4,66
5	3,40	3,16	3,58
6	4,13	3,85	4,21
7	3,40	3,04	3,31
8	3,49	3,76	3,67

Находим среднее значение величины  $P_y$  в каждой экспериментальной точке:

$$P_y = \frac{P_{y1} + P_{y2} + P_{y3}}{n} = \frac{4,48 + 4,70 + 4,39}{3} = 4,5233, \quad (5)$$

где  $n$  – число серий эксперимента.

Определяем дисперсию по строчкам матрицы, например:

$$S_1^2 = \frac{\sum_{m=1}^n (P_{ym_i} - \bar{P}_{y_i})^2}{n-1} = \frac{(4,5233 - 4,48)^2 + (4,5233 - 4,70)^2 + (4,5233 - 4,39)^2}{2} = 0,0254. \quad (6)$$

Проверяем гипотезу об однородности дисперсий с помощью критерия Кохрена по формуле:

$$G = \frac{S_i^2 \max}{\sum_{i=1} S_i^2} = \frac{0,0444}{0,2108} = 0,2106, \quad (7)$$

т. е. по отношению наибольшей из дисперсий по строчкам к сумме всех дисперсий. Так как для уровня значимости 5 % и числа степеней свободы  $f = n-1 = 2$  и  $f_2 = N = 8$ , ( $N$  – число опытов  $n - G_{\text{табл}} = 0,478 > 0,2106$ ), то гипотеза об однородности дисперсий принимается. Величина  $G$  найдена по таблице.

Дисперсия воспроизводимости равна:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} = \frac{0,2108}{8} = 0,0264.$$

Коэффициенты уравнения  $b_0, b_1, b_2, b_{12}$  определяем по формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N} = \frac{\ddot{Y}_1 + \ddot{Y}_2 + \ddot{Y}_3 + \dots + \ddot{Y}_8}{8} = 4,0388,$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^N X_i Y_i}{N} = \frac{(-1)\ddot{Y}_1 + (+1)\ddot{Y}_2 + (-1)\ddot{Y}_3 + \dots + (+1)\ddot{Y}_8}{8} = 0,2879,$$

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^N X_i Y_i}{N} = \frac{(-1)\ddot{Y}_1 + (-1)\ddot{Y}_2 + (+1)\ddot{Y}_3 + \dots + (+1)\ddot{Y}_8}{8} = -0,1929,$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i X_j Y_i}{N} = \frac{(-1)(-1)\ddot{Y}_1 + (+1)(-1)\ddot{Y}_2 + (-1)(+1)\ddot{Y}_3 + \dots + (+1)(+1)\ddot{Y}_8}{8} = -0,4554 \text{ и т. д.}$$

Далее определили дисперсию коэффициентов  $b$ , нашли величину критерия Стьюдента для коэффициентов уравнения, определили расчетные значения переменной  $Y_i = P_i$

$$Y = 4,0388 + 0,2879X_1 - 0,1929X_2 - 0,4554X_3.$$

Затем проверили гипотезу адекватности полученного уравнения результатам эксперимента по критерию Фишера. Перевели уравнение  $P_y = f(V, P)$  из нормализованного вида в натуральный. С помощью данной формулы рассчитали зависимость шероховатости от скорости, амплитуды и ширины луча. Полученные данные занесли в табл. 4 и 5.

Таблица 4 – Зависимость величины шероховатости от режимов лазерной обработки при ширине луча 0,5 мм

Амплитуда, мм	Шероховатость, $Ra$ , мкм					
	Скорость луча лазера, $V$ , мм/мин					
	125	300	475	650	825	1000
4	3,75521	3,89917	4,04313	4,18708	4,33104	4,47500
6	3,56229	3,70625	3,85021	3,99417	4,13813	4,28208
8	3,36938	3,51333	3,65729	3,80125	3,94521	4,08917
10	3,17646	3,32042	3,46438	3,60833	3,75229	3,89625

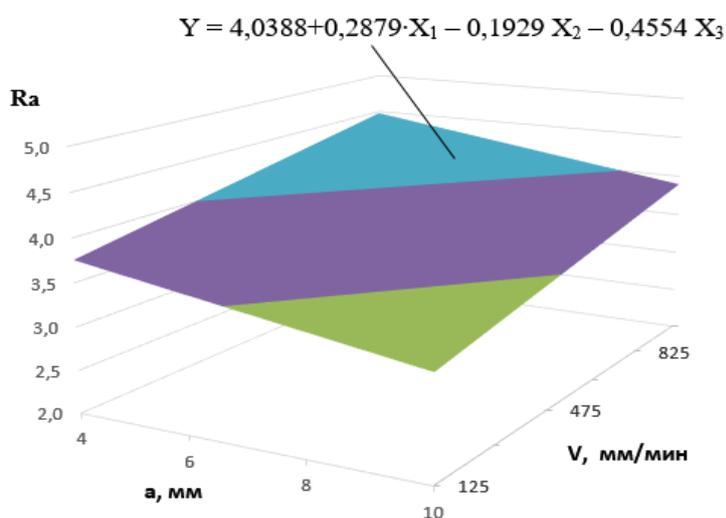


Рис. 1. Поверхность отклика влияния амплитуды и скорости на шероховатость при ширине луча 0,5 мм

Таблица 5 – Зависимость величины шероховатости от режимов лазерной обработки при ширине 3,0 мм

Амплитуда, мм	Шероховатость, $Ra$ , мкм					
	Скорость луча лазера, $V$ , мм/мин					
	125	300	475	650	825	1000
4	3,34438	3,48833	3,63229	3,77625	3,92021	4,06417
6	3,15146	3,29542	3,43938	3,58333	3,72729	3,87125
8	2,95854	3,10250	3,24646	3,39042	3,53438	3,67833
10	2,76563	2,90958	3,05354	3,19750	3,34146	3,48542

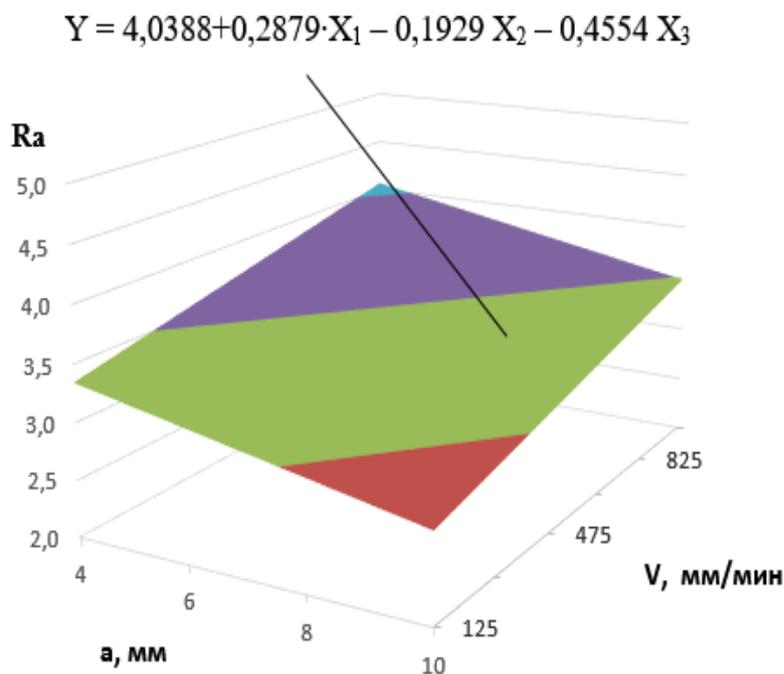


Рис. 2. Поверхность отклика влияния амплитуды и скорости на шероховатость при ширине луча 3,0 мм

Анализ полученных регрессионных зависимостей свидетельствует о том, что на микрогеометрию поверхности зубчатого колеса после лазерной сканирующей обработки оказывают все параметры луча – ширина, скорость и амплитуда, но наибольшее управляющее влияние оказывает ширина луча. Причем, чем больше ширина луча (рис. 1, 2), тем меньше параметр  $Ra$ . Скорость и амплитуда одинаково влияют на шероховатость в выбранных пределах, но у скорости прямая зависимость, а у амплитуды – обратная. Самая минимальная шероховатость (2,76 мкм) получена при следующих параметрах лазерной сканирующей обработки:  $V = 125$  мм/мин,  $A = 10$  мм,  $Z_3 = 3$  мм (табл. 3, рис. 1, 2).

Выявленные зависимости позволили сформировать лазерное пятно, исходя из особенностей адаптивной оптической системы, обеспечивающей реализацию сканирующей обработки, и рекомендовать лазерную закалку в качестве финишной операции при изготовлении зубчатых колес при введении коррекции геометрии зубьев в процессе их формообразования [2].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Девойно О. Г., Швец И. В. Обеспечение ресурсных параметров ответственных элементов механических трансмиссий с использованием поверхностных слоев, формируемых лазерными технологиями. Теоретическая и прикладная механика: межд. научно-техн. сб. – Мн.: 2019. – Вып. 34. – С. 266–270.

2. Швец И. В., Девойно О. Г., Кардаполова М. А. Оптимизация режимов упрочнения зубчатых колес лазерной закалкой сканирующим излучением / И. В. Швец, О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки. Технология – Оборудование – Инструмент – Качество: тезисы докладов 36-ой

Международной научно-технической конференции в рамках международной специализированной выставки «Машиностроение/Металлообработка–2022», (Минск, 7 апреля 2022 г.) / редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2022. – С. 93–95.

3. Швец И. В. Анализ происходящих при лазерной закалке фазовых превращений и их влияние на изменение геометрии эвольвентных профилей зубчатых колес. Инновации в машиностроении: 100-летний опыт в науке, производстве, образовании. Сборник материалов 18-й Междун. науч.-техн. конф. «Наука-образованию, производству, экономике». Электронное научное издание. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 33–38.

Поступила 23.11.2023

УДК 621.9.048: 621.373.8: 621.38

Шелег В. К., Шпакевич Д. А., Горбунов А. В., Лапковский А. С., Луцко Н. И.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ОТ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь

*В последние годы возросла потребность в автоматизации технологий, в частности, лазерных, для очистки металлоизделий от слоев окалины и ржавчины с целью улучшения энергоэффективности обработки. Для выполнения этого целесообразно проводить как расчеты интенсивности нагрева слоев, так и экспериментальную оптимизацию режимов лазерной очистки (ЛО). В данном исследовании проведено комбинированное определение параметров энергоэффективности ЛО от поверхностной окалины для широко используемого объекта – углеродистых сталей. Было установлено, что в диапазоне скоростей сканирования лазерного луча  $V$  от 0,4 до 2,0 м/с практически отсутствует влияние такого входного параметра, как частота импульсов лазерного излучения (ЛИ)  $f$ , на измеряемую производительность очистки. Как перспективные для дальнейшего использования изучены режимы ЛО при параметрах:  $V = 2,0$  м/с, диаметр пучка ЛИ на поверхности  $d_{\text{Л}} = 50$  мкм и частота  $f = 37$  кГц (что задает коэффициент скважности ЛИ  $S \approx 200$ ). При этом достигается высокая производительность очистки, при которой за один проход толщина удаляемого слоя близка к 6,5 мкм при средней длительности нагрева каждого участка слоя окалины  $t \approx 0,025$  мс. Сделанная кинетическая оценка скорости нагрева слоев окалины в воздушной среде в режиме проплавления окалины под пятном ЛИ (с допущением ее состава как  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) позволила провести анализ эмпирических параметров очистки и он выявил, что энергозатраты для оптимального экспериментального режима и одного из расчетных режимов (отличающегося тем, что рассмотрен стационарный лазер CW-типа) несколько различаются и равны 4,0 и 2,7 кВтч/(кг окалины), соответственно.*

**Введение и задача исследования.** Удаление окалины и ржавчины с помощью современных физико-технических методов, в частности, лазерных, как потенциально высокоэффективный и экологически чистый метод очистки корродированных металлических поверхностей, в последнее десятилетие активно изучается и постепенно внедряется в машиностроительной, судостроительной, горнодобывающей и других отраслях [1–10]. Однако пока эффективность данной группы технологий лазерной очистки (ЛО) признается сильно зависимой от эмпирических навыков операторов лазерных установок по распознаванию изменений в условиях удаления данных оксидных загрязнений, связанных с