

## ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

*Кутепов С.Н., Клементьев Д.С., Спиридонова М.М.*

*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, Тула*

**Ключевые слова:** лазерная резка, лазерное микроструктурирование, шероховатость, макрофрактографический анализ, поверхность реза.

**Аннотация.** В статье выполнена многопараметрическая оптимизация процессов газолазерной резки и лазерного микроструктурирования. Рассчитаны средние значения шероховатости в каждой зоне, дисперсии и средние квадратические отклонения. Проведена проверка равнозначности измерений в разных зонах и значимости различия средних значений. С помощью пакета прикладных программ доказано отсутствие разницы между шероховатостями в разных зонах поверхности реза. Показано, что использование лазерного микроструктурирования как дополнительной (финишной) обработки, после газолазерной резки, положительно влияет на изменение шероховатости поверхностного слоя и позволяет снизить её в 5-15 раз.

## FORMATION OF QUALITATIVE INDICATORS OF THE SURFACE LAYER OF MACHINE PARTS BY LASER PROCESSING METHODS

*Kutepov S.N., Klementyev D.S., Spiridonova M.M.*

*Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy, Tula*

**Keywords:** laser cutting, laser microstructuring, roughness, macrofractographic analysis, cutting surface.

**Abstract.** The article provides a multiparametric optimization of the processes of gas laser cutting and laser microstructuring. The average values of roughness in each zone, variance and mean square deviations are calculated. The equivalence of measurements in different zones and the significance of the difference in average values were verified. With the help of an application software package, the absence of a difference between roughness in different areas of the cutting surface has been proven. It is shown that the use of laser microstructuring as an additional (finishing) treatment, after gas laser cutting, has a positive effect on the change in the roughness of the surface layer and reduces it by 5-15 times.

Лазер и лазерные технологии являются перспективными методами получения и обработки изделий различного назначения, в связи с чем они нашли широкое применение в различных отраслях промышленности [1]. Одним из основных результатов воздействия лазерного излучения является изменение температурного поля обрабатываемого вещества. Характер нагрева, определяющийся скоростями изменения температуры, температурных градиентов, временем достижения температур структурных и фазовых переходов и другими параметрами процесса, оказывается различным в зависимости от свойств обрабатываемого материала и условий обработки [2, 3].

К числу перспективных технологических процессов разделения металлических материалов следует отнести газолазерную резку металлических сплавов, основанную на процессах нагрева, расплавления материала, химических реакциях горения, испарения, вымывания и удаления расплава и продуктов

разрушения зоны резки, остывания и перекристаллизации материала после окончательного лазерного воздействия [3-5].

Хорошо известно, что физико-химические свойства поверхности (механические, химические, оптические и др.) в значительной мере определяются ее микрогеометрией (шероховатостью) [6]. Сравнительно новым методом формирования микрорельефа поверхности, который исследуется и применяется во всем мире в самых различных областях промышленности, является лазерная микрообработка [7]. Перспективно микроструктурирование поверхностей трения и создание микрорельефа с заданным уровнем шероховатости [4]. Однако в большинстве работ рассматривается задача оптимизации конкретной поверхности для решения определенной проблемы [8]. При этом решение каждой иной задачи требует проведения полного цикла трудоемких исследований. Более перспективно установить универсальные закономерности формирования различных регулярных рельефов под действием лазерного излучения, что позволило бы значительно сократить период экспериментального формирования определенной микрогеометрии.

Цель работы – исследование влияние режимов газолазерной резки (ГЛР) и лазерного микроструктурирования на изменение показателей шероховатости поверхностного слоя деталей машин, изготовленных из листовых легированных сталей марок 30ХГСА и 40Х.

Из указанных сталей с применением технологии ГЛР по разным режимам, указанным в таблице 1, вырезали образцы размером 40×40 мм. В каждом эксперименте меняли параметры лазерной резки таким образом, чтобы разрезать стальной лист без получения гратов.

Табл. 1. Режимы лазерной резки листовых конструкционных легированных сталей [9]

Марка стали / толщина листа, мм	№ режима	Мощность излучения $W$ , Вт	Скорость резки $V$ , мм/мин	Давление вспомогательного газа $P$ , атм	Фокусное расстояние $F$ , мм
30ХГСА/8	1	1100	700	0,8	301
	2	1400	1100	0,8	300
	3	900	1100	0,1	300
	4	800	900	0,1	301
	5	700	800	0,1	299
40Х/8	1	1350	1000	0,8	301
	2	1600	1000	0,8	301
	3	1300	1000	0,8	300
	4	1300	1100	0,8	302

Макрофрактографический анализ выполняли для определения ширины зон лазерного воздействия (зона 1) и дополнительного воздействия газовой струи (зона 2) на поверхности канала реза (рис. 1), а также для подтверждения отсутствия грата. Использовали стереоскопический микроскоп, цифровой фотоаппарат и мерительный инструмент (для измерения ширины разных зон на поверхности реза). Данные о ширине зон поверхности реза представлены в таблице 2.



Рис. 1. Поверхность реза с характерными зонами:  
1) зона плавления металла; 2) зона удаления расплава газом

Табл. 2. Ширина зон поверхности реза [9]

Марка стали / толщина листа, мм	№ режима	Зона 1, мм	Зона 2, мм	Соотношение размеров зон, мм (зона 2 / зона 1)	Соотношение зоны 1 и толщины листа
30ХГСА/8	01	1,0	7,0	7,0	0,12
	02	1,0	7,0	7,0	0,12
	03	1,0	7,0	7,0	0,12
	04	1,2	6,8	5,7	0,15
	05	1,2	6,8	5,7	0,15
	06	1,5	6,5	4,3	0,15
40Х/8	01	1,2	6,8	5,7	0,15
	02	1,5	6,5	4,4	0,19
	03	1,2	6,8	5,7	0,15
	4	1,2	6,8	5,7	0,15

Из таблицы 2 следует, что для сталей марок 30ХГСА и 40Х с увеличением мощности возрастает ширина зоны 1. Для стали марки 30ХГСА характерно увеличение ширины зоны 1 с уменьшением мощности резки. Для образцов всех объектов исследования независимо от режимов ЛР толщина зоны лазерного воздействия не превышает 30% толщины листа, из которого образцы были вырезаны.

Измерение шероховатости рабочей (обработанной) поверхности образцов исследуемых сталей проводили с целью определения количественной характеристики чистоты поверхности с использованием профилометра Time Group TR220. По полученным экспериментальным данным с помощью пакета прикладных программ «Statgraphics Centurion XV», были рассчитаны средние значения шероховатости в каждой зоне, дисперсии и средние квадратические отклонения (СКО). Полученные средние значения представлены в таблице 3.

На первый взгляд кажется, что средние значения  $R_z$  в зоне лазерного воздействия меньше, чем в зоне дополнительного воздействия газовой струи, однако разброс значений шероховатости в зоне 2 выше, чем в зоне 1. Такое соотношение статистических параметров требует проверки равнозначности измерений в разных зонах и значимости различия средних значений. Данную задачу решали с помощью пакета прикладных программ «Statgraphics Centurion XV» (табл. 4, 5). При оценке равнозначности измерений выдвигались следующие гипотезы: нулевая гипотеза – отношение дисперсий равно 1; альтернативная

гипотеза – дисперсии не равны. Объемы выборок равны 8. Уровень значимости ( $\alpha$ ) принимаем равным 0,05. Согласно данным столбца б таблицы 5 принимаем нулевую гипотезу о равенстве дисперсий, т.е. считаем измерения равноточными, так как вероятность принятия нулевой гипотезы (столбец б) больше 0,05 ( $\alpha$  – уровень значимости).

Табл. 3. Шероховатость поверхности реза сталей марок 30ХГСА и 40Х

№ режима	Среднее значение		Дисперсия		СКО	
	Лазер	Газ	Лазер	Газ	Лазер	Газ
Сталь марки 30ХГСА (толщина листа 8 мм)						
01	52,66	60,29	65,85	79,52	8,12	8,92
02	42,87	54,98	65,01	190,02	8,06	13,78
03	36,58	46,04	52,1	103,55	7,22	10,18
04	39,26	44,68	44,11	11,66	6,64	3,41
05	42,32	46,98	12,02	35,54	3,47	5,96
06	47,58	53,30	14,46	51,78	3,80	7,2
Сталь марки 40Х (толщина листа 8 мм)						
01	29,97	35,89	26,42	70,03	5,14	8,37
02	37,10	40,83	8,32	20,04	2,88	4,48
03	28,35	37,63	32,21	115,42	5,68	10,74
04	42,85	37,33	11,07	41,96	3,33	6,48

Табл.4. Проверка равноточности измерений

Марка стали	№ режима	СКО		Эмпирическое значение критерия Фишера (Computed F statistic)	Вероятность принятия нулевой гипотезы (P-Value)
		Лазер	Газ		
30ХГСА (8 мм)	01	8,92	8,12	1,20752	0,809897
	02	13,78	8,06	2,922699	0,180409
	03	10,18	7,22	1,987715	0,384884
	04	3,41	6,64	3,783792	0,100206
	05	5,96	3,47	2,957126	0,175895
	06	7,2	3,80	3,580359	0,114214
40Х (8 мм)	01	8,37	5,14	2,650905	0,221689
	02	4,48	2,88	2,409762	0,268672
	03	10,74	5,68	3,582903	0,114024
	04	6,48	3,33	3,790461	0,099784

Табл.5. Проверка равенства средних значений шероховатости

Марка стали	№ режима	Среднее значение $R_z$ , мкм		Эмпирическое значение критерия Стьюдента (Computed t statistic)	Вероятность принятия нулевой гипотезы (P-Value)
		Лазер	Газ		
30ХГСА (8 мм)	01	52,66	60,29	1,788719	0,095312
	02	42,87	54,98	2,144821	0,049997
	03	36,58	46,04	2,145233	0,049959
	04	39,26	44,68	2,050398	0,059536
	05	42,32	46,98	1,910651	0,076747
	06	47,58	53,30	1,989947	0,066494
40Х (8 мм)	01	29,97	35,89	1,704319	0,110404
	02	37,10	40,83	1,981855	0,06748
	03	28,35	37,63	2,160259	0,048579
	04	42,85	37,33	2,1445	0,050027

Согласно данным столбца 6 таблицы 5 принимаем нулевую гипотезу о равенстве средних, т.е. оцениваемые выборки взяты из одной генеральной совокупности так, как вероятность принятия нулевой гипотезы (столбец 6) больше 0,05 ( $\alpha$  – уровень значимости).

Для исследуемых сталей установлено, что при всех использованных режимах выборочные дисперсии совокупностей равны, т.е. подтверждается равнозначность измерений шероховатости в обеих зонах поверхности реза. Сравнение средних значений шероховатости разных зон показало, что наблюдаемая между ними разница случайна. Надо отметить, что некоторые средние значения принимаются равными между собой на уровне вероятности близком к критическому равному 0,05.

Таким образом, на основании проведенных оценок равнозначности измерения и различия шероховатости в двух зонах, установлено, что разница между шероховатостями в разных зонах поверхности реза не наблюдается.

Далее с целью уменьшения шероховатости поверхности было проведено лазерное микроструктурирование (ЛМ) образцов, изготовленных из стали марки 30ХГСА по режимам, представленным в таблице 6.

Результаты измерения шероховатости поверхности после ЛМ представлены в таблице 7.

Табл. 6. Режимы лазерного микроструктурирования образцов из стали марки 30ХГСА

Параметры лазерной обработки	Сторона обработки			
	1	3	1	3
	Режим № 1		Режим № 2	
Мощность, Вт	1400	1200	1400	1200
Частота колебаний гальваносканатора, Гц	200	50	200	50
Плотность заливки (покрытие, в %):	83	96	83	96
Ширина развертки, мм	50	50	50	50
Скорость подачи, мм/мин	1000	250	1000	250
Число проходов по плоскости x, шт.	1	1	1	1
Число проходов по плоскости y, шт.	–	–	1	1

Табл. 7. Шероховатость поверхностного слоя образцов из стали марки 30ХГСА после ЛМ

Номер режима обработки	Среднее значение $R_z$ , мкм	
	Сторона 1	Сторона 3
1	4,49	6,12
2	3,14	8,55

Из анализа экспериментальных результатов (см. табл. 5 и 7) видно, что дополнительное ЛМ поверхности реза позволяет в 5-15 раз снизить ее шероховатость. В то же время можно утверждать, что изменение режимов ЛМ (уменьшение мощности лазерного излучения, частоты колебаний гальваносканатора, скорости подачи и увеличение плотности заливки) приводит к незначительному возрастанию шероховатости поверхностного слоя (табл. 7).

Полученные результаты позволяют рекомендовать использовать технологию ЛМ поверхности в качестве финишной операции при изготовлении деталей из конструкционных легированных сталей методом ГЛР.

**Финансирование.** Работа выполнена за счет средств внутреннего гранта в области научно-исследовательской деятельности ТГПУ им. Л.Н. Толстого по научному проекту: «Формирование качественных характеристик на рабочих поверхностях деталей машин из конструкционных легированных сталей методом лазерного микроструктурирования» (договор № 6 НИР/24/07 от 11.07.2024 г.).

### Список литературы

1. Коваленко В.С., Головки Л.Ф., Меркулов Г.В., Стрижак А.И. Упрочнение деталей лучом лазера / под общ. ред. В.С. Коваленко. – Киев: Техника, 1981. – 131 с.
2. Верещагин М.Н., Целуева С.Н., Целуев М.Ю. Модифицирование поверхностных слоев металлических деталей импульсной лазерной обработкой // Литье и металлургия. – 2020. – №1. – С. 99-109.
3. Минаев И.В., Кутепов С.Н., Клементьев Д.С., Агеев Е.В. Влияние режимов лазерной обработки на изменение структуры и механических свойств поверхностного слоя деталей из стали марки 30ХГСА // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2023. – Т. 13, №1. – С. 73-86. – doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-1-73-86.
4. Минаев И.В., Кутепов С.Н., Клементьев Д.С., Агеев Е.В., Журба Д.В. Формирование упрочненного поверхностного слоя при комплексном лазерном воздействии на кромку реза деталей из конструкционных углеродистых сталей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2023. – Т. 13, №2. – С. 55-69. – doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-55-69.
5. Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н., Гвоздев А.Е., Грашкин И.П., Минаев И.В., Полосин С.И., Тихонова И.В., Чеглов А.Е., Хонелидзе Д.М. Комплекс научно-технических, проектно-конструкторских и технологических разработок по созданию, изготовлению и внедрению высокоточного импортозамещающего оборудования качественной лазерной и газоплазменной обработки листового проката: монография / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Н.Н. Сергеева. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – 188 с.
6. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным рельефом. – Л.: Машиностроение, 1982. – 59 с.
7. Васильев О.С., Вейко В.П., Горный С.Г., Рузанкина Ю.С. Лазерная установка для микроструктурирования поверхности металла с использованием волоконного лазера // Оптический журнал. – 2015. – Т. 82, №12. – С. 70-77.
8. Шастин В.И., Каргапольцев С.К. Лазерное модифицирование сопрягаемых поверхностей трения // Вестник СамГУПС. – 2016. – №3(33). – С. 27-33.
9. Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Тихонова И.В., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н., Комарова М.Ю., Гвоздев А.Е. Основы лазерной и газоплазменной обработки конструкционных сталей: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – 283 с.

### Сведения об авторах:

*Кутепов Сергей Николаевич* – к.п.н., доцент, доцент кафедры «Технологии и сервиса»;  
*Клементьев Денис Сергеевич* – старший преподаватель кафедры «Технологии и сервиса»;  
*Спиридонова Мария Максимовна* – студент.