УДК 621.785: 539.531: 544.032.65 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-172-177

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 30ХГСА ПРИ ФИНИШНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Кутепов С.Н., Плотников Р.В., Клементьев Д.С.
Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, Тула

Ключевые слова: лазерная очистка, лазерное шлифование, механическое шлифование, горячая прокатка, шероховатость, микротрещины, морфология.
Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния режимов комбинированной лазерной обработки (очистки и шлифования) на изменение параметров шероховатости поверхностного слоя стали марки 30ХГСА. Доказана высокая эффективность совмещения предварительного механического шлифования и комбинированной лазерной обработки, обеспечивающая формирование регулярного кольцевого микрорельефа, не имеющего трещин и обладающего малой шероховатостью.

THE INFLUENCE OF THE INITIAL STATE OF THE SURFACE LAYER ON THE FORMATION OF THE MORPHOLOGY OF THE SURFACE OF 30KHGSA STEEL DURING FINISH LASER TREATMENT

Kutepov S.N., Plotnikov R.V., Klementyev D.S.
Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy, Tula

Keywords: laser cleaning, laser grinding, mechanical grinding, hot rolling, roughness, microcracks, morphology.
Abstract. The article presents the results of an experimental study of the effect of combined laser processing modes (cleaning and grinding) on changes in the roughness parameters of the surface layer of 30KhGSA steel. The high efficiency of combining preliminary mechanical grinding with combined laser processing has been proven; this ensures the formation of a regular ring-shaped microrelief that is free of cracks and has low roughness.

Эксплуатационные свойства деталей машин (микротвердость, усталостная прочность, коррозионно- и износостойкость) напрямую зависят от геометрических характеристик поверхностного слоя и условий его формирования [1, 2]. Традиционные методы финишной механической обработки изделий (абразивное шлифование, полирование) в условиях современного автоматизированного производства сталкиваются с рядом ограничений, связанных с быстрым износом инструмента, риском деформационного повреждения тонких поверхностных слоев. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является разработка и внедрение прецизионных бесконтактных технологий локального термического воздействия, среди которых ведущее место занимают процессы импульсной лазерной очистки [3-5] путем контролируемого микрооплавления поверхности.

Однако формирования рельефа поверхности при лазерном оплавлении сопряжено с необходимостью строгого контроля нестационарных тепловых циклов, развивающихся в сверхмалых объемах материала поскольку локальный высокоинтенсивный нагрев и последующее быстрое охлаждение ванны расплава индуцируют значительный градиент термических напряжений, способный инициировать трещинообразование в модифицированном поверхностном слое.

В этой связи особую актуальность приобретает исследование влияния режимов импульсной лазерной обработки (очистка, шлифование) на изменение параметров шероховатости поверхностей, имеющих различное исходное состояние (горячекатаная, механически обработанная и др.), которое формирует характерную топографию поверхности с определенными значениями параметров шероховатости. Понимание закономерностей изменения этих параметров в зависимости от исходного состояния поверхности и режимов последующей лазерной обработки позволит оптимизировать технологические процессы, прогнозировать конечные характеристики поверхности и расширить область применения лазерной очистки и шлифования в различных отраслях промышленности.

Целью данной работы является исследование влияния режимов лазерной очистки и шлифования на изменение параметров шероховатости (R_a, R_z, R_{max}, S_m) и морфологии поверхностных слоев стали марки 30ХГСА имеющих различное исходное состояние поверхности.

В качестве объекта исследования была выбрана конструкционная среднелегированная сталь марки 30ХГСА в литом (пруток Ø8 мм) и горячекатаном (лист толщиной 6 мм) состояниях. Для исследования влияния импульсной лазерной обработки (очистка, шлифование) на изменение структуры и механических свойств деталей машин с использованием лазерной резки были изготовлены специальные образцы (рис. 1), обработка которых проводилась по режимам, представленным в таблице 1.

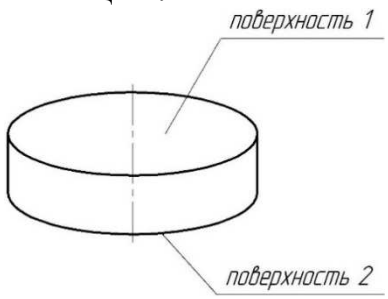


Рис. 1. Образец для исследования: 1 – поверхность после лазерной обработки; 2 – исходная поверхность/поверхность после механического шлифования

Измерение шероховатости (ГОСТ 71448-2024) исходных и обработанных поверхностей образцов исследуемых сталей проводили с целью определения количественной характеристики чистоты поверхности с использованием профилометра Time Group TR220.

В качестве основных контролируемых параметров шероховатости были выбраны: среднеарифметическое отклонение профиля (R_a, мкм); наибольшая высота профиля (R_z, мкм); полная высота профиля (R_{max}, мкм); средний шаг неровностей (S_m, мм). Исследование параметров шероховатости осуществляли на оценочной длине, которая была равна 5L (L – базовая длина, мм; L = 0,8 мм). По результатам трех измерений вычисляли среднее арифметическое значение.

Для изучения влияния импульсной лазерной обработки на изменение морфологии поверхностного слоя (наличие пор, включений, микротрещин, капель расплава, кратеров) с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEOL «JSM 6390» и детектора вторичных электронов (SEI) при ускоряющем напряжении 20 кВ выполняли сканирующую электронную микроскопию поверхности при 100, 200 и 500-кратном увеличении.

Табл. 1. Режимы импульсной лазерной обработки стали марки 30ХГСА

№	Состояние поверхности до лазерной обработки	*P*, Вт	*F*, кГц	*V*, мм/мин	*n*, кол-во проходов *x*-*y*
1	литая после механического шлифования	20	20	50	1/1
2	горячекатаная	20	20	50	1/1
3	горячекатаная после механического шлифования	30+15	20+20	50+50	1/1+1/1
4	горячекатаная	30+15	20+20	50+50	1/1+1/1

Примечание: в обозначениях 30+15 и прочих первое значение относится к режиму лазерной очистки, второе – к режиму лазерной шлифовки. Одинарное значение параметра в таблице относится к режиму лазерной очистки.

Результаты измерения шероховатости поверхностного слоя образцов до и после импульсной лазерной обработки представлены в таблице 2.

Табл. 2. Параметры шероховатости поверхности исследуемых образцов до и после импульсной лазерной обработки

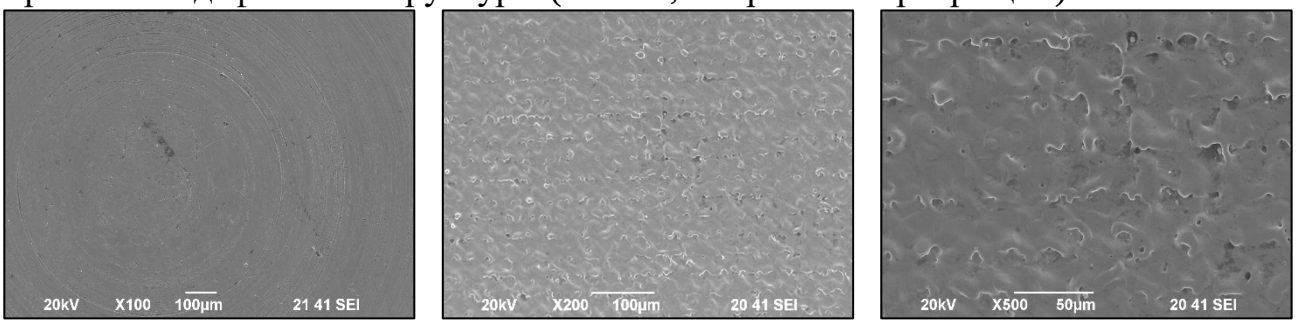
№	Состояние поверхности	Параметры шероховатости			
		R_a, мкм	R_z, мкм	R_{max}, мкм	S_m, мм
1	литая	0,309	2,097	2,858	0,036
	литая после МШ	0,217	1,473	1,875	0,029
	литая после МШ и ЛО	0,775	4,790	5,592	0,044
2	горячекатаная	1,454	6,962	9,479	0,141
	горячекатаная после ЛО	1,485	7,904	10,550	0,137
3	горячекатаная	1,871	7,841	9,323	0,211
	горячекатаная после МШ и КЛО	0,819	5,467	6,627	0,037
4	горячекатаная	2,630	10,233	21,910	0,249
	горячекатаная после КЛО	2,039	12,783	21,780	0,086

Примечание: МШ – механическое шлифование; ЛО – лазерная очистка; КЛО – комбинированная лазерная обработка, включающая предварительную лазерную очистку и последующую лазерную шлифовку обрабатываемой поверхности.

Исходная поверхность образца, вырезанного из литой заготовки и подвергнутая механическому шлифованию, характеризуется относительно упорядоченной макротекстурой (рис. 2, а). Среднеарифметическое отклонение профиля R_a = 0,309 мкм, в то время как наибольшая высота профиля R_z = 2,097 мкм, а полная высота профиля R_{max} = 2,858 мкм при среднем шаге неровностей S_m = 0,036 мм. Предварительное механическое шлифование обеспечивает уменьшению параметров шероховатости: величина R_a снижается на 30 % (до 0,217 мкм), а R_{max} падает до 1,875 мкм, что сопровождается уменьшением среднего шага неровностей до S_m = 0,029 мм. На поверхности зафиксирован полосчатый рельеф, являющийся следствием механической обработки (рис. 2, а).

После лазерной очистки происходит изменение морфологии поверхности, что сопровождается ухудшением шероховатости поверхностного слоя. Параметр R_a возрастает более чем в 3,5 раза (до 0,775 мкм), наибольшая высота профиля R_z увеличивается до 4,790 мкм, а полная высота профиля R_{max} достигает 5,592 мкм.

СЭМ обработанной лазером поверхности позволила выявить образование на ней регулярных волнообразных наплывов (рис. 2, б, в), сформированных в результате локального гидродинамического выплеска и последующей мгновенной кристаллизацией жидкого расплава под действием импульсного лазерного излучения. Данный физический процесс подтверждается увеличением среднего шага неровностей S_m до 0,044 мм. При этом на поверхности не зафиксировано образования дефектной структуры (сколов, макро- и микротрещин).

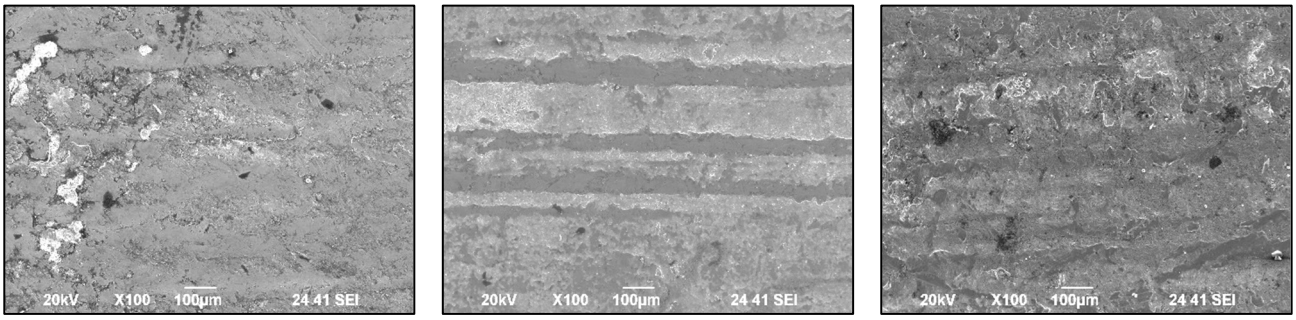


а б в

Рис. 2. Макростроение поверхности стали марки 30ХГСА до (а) и после (б, в) лазерной очистки: а) механическое шлифование, ×100; б) лазерная очистка механически шлифованной поверхности, ×200; в) лазерная очистка механически шлифованной поверхности, ×500

В исходном горячекатаном состоянии (образцы № 2-№ 4) среднеарифметическое отклонение R_a достигает 2,630 мкм, а полная высота профиля $R_{\max}$ фиксируется на критической отметке 21,910 мкм при крайне широком среднем шаге неровностей (S_m до 0,249 мм). Данное обстоятельство может быть обусловлено неравномерностью слоя окалины, которую наблюдали на необработанных поверхностях образцов (рис. 3).

Лазерная очистка поверхности без предварительного механической обработки (образец № 2) практически не изменяет среднеарифметическое отклонение профиля R_a (1,485 мкм против 1,454 мкм). Наилучший результат по снижению R_a зафиксирован на образце № 3 (предварительное механическое шлифование с последующей лазерной очисткой и лазерным шлифованием), где среднеарифметическое отклонение профиля снизилось более чем в 2,2 раза – до 0,819 мкм. На образце №4 комбинированная лазерная обработка горячекатаной поверхности (очистка с последующей шлифовкой) позволило снизить R_a лишь до 2,039 мкм.



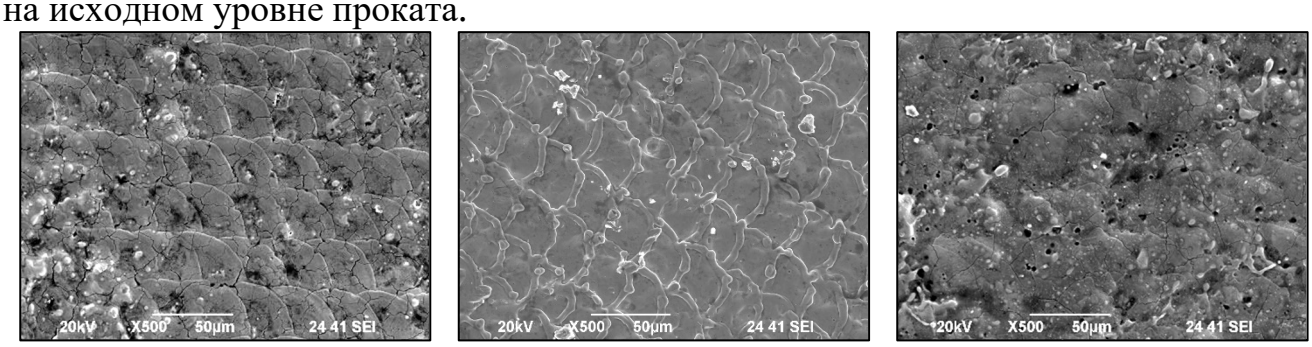
а б в

Рис. 3. Макростроение поверхности стали марки 30ХГСА до лазерной обработки, ×100: а) образец №2; б) образец №3; в) образец №4

Для образца № 2 после лазерной очистки наибольшая высота профиля R_z возрастает с 6,962 до 7,904 мкм. В случае образца №3 предварительное механическое шлифование и комбинированная лазерная обработка обеспечивают качественное сглаживание микропрофиля, снижая R_z до 5,467 мкм. Напротив, на образце № 4 зафиксирован аномальный рост R_z до 12,783 мкм, что указывает на появление глубоких локальных впадин, что подтверждается результатами измерения полной высоты профиля (табл. 2).

Также на поверхности образцов №2 и №4 после лазерной обработки наблюдали образование сетки микротрещин (рис. 4, а и в). На поверхности образца № 3 подвергнутой предварительной механической обработке шлифованием сетка микротрещин отсутствует (рис. 4, б). Это может быть обусловлено следующими причинами: так как контакт лазерного излучения с обрабатываемой поверхностью является весьма локальным и процессы нагрева-охлаждения происходят достаточно интенсивно в результате образуются термические напряжения, которые в сочетании с уже присутствующими растягивающими напряжениями после прокатки приводят к зарождению и развитию трещин. Применение же в качестве подготовительной операции шлифования способствует снятию внутренних растягивающих напряжений и как следствие получению более равновесной структуры.

Для образца №2 зафиксировано минимальное изменение среднего шага неровностей профиля S_m – после лазерной обработки значение данного параметра составило 0,137 мм, против 0,141 мм для исходной необработанной поверхности. С физической точки зрения такое поведение обусловлено тем, что при импульсной лазерной очистке без механического шлифования основная доля энергии расходуется на абляцию окалины, не создавая стабильной ванны расплава, способной уплотнить шаг. Возникающая сетка микротрещин *«разрывает»* регулярность профиля и удерживает пространственную периодичность текстуры на исходном уровне проката.



а б в

Рис. 3. Макростроение поверхности стали марки 30ХГСА после лазерной обработки, ×100: а) образец №2; б) образец №3; в) образец №4

Напротив, на бездефектном образце №3 средний шаг неровностей профиля S_m уменьшился более чем в 5,7 раза – до 0,037 мм. На образце №4 комбинированная обработка привела к уменьшению средней высоты неровностей S_m в 2,9 раза (до 0,086 мм). Это экспериментально доказывает, что финишное лазерное шлифование эффективно трансформирует крупношаговый хаотичный рельеф проката в высокочастотную регулярную микротекстуру.

Таким образом на основании проведенных исследований можно сделать **следующие выводы**:

1. Установлено, что импульсная лазерная очистка механически шлифованной поверхности литой стали (образец №1) приводит к увеличению высотных параметров шероховатости R_a, R_z, R_{max}, при одновременном увеличении среднего шага неровностей S_m.

2. Выявлено, что лазерная очистка горячекатаного проката без предварительной механической обработки вызывает растрескивание поверхностного слоя. Образующиеся микротрещины резко увеличивают высотные параметры шероховатости R_z и R_{max}, в то время как средний шаг неровностей профиля S_m сохраняет крупношаговый хаотичный характер исходного проката из-за отсутствия условий для капиллярного перераспределения расплава.

3. Показано, что применение комбинированной обработки на образце №3 (предварительное механическое шлифование с последующей лазерной очисткой и шлифовкой) обеспечивает наилучшие значение параметров шероховатости поверхностного слоя. Зафиксировано снижение среднеарифметического отклонения профиля R_a в 2,2 раза на фоне формирования бездефектной, высокочастотной кольцевой микротекстуры с минимальным пространственным шагом неровностей S_m = 0,037 мм.

4. Выявлено, что комбинированная лазерная обработка горячекатаной поверхности (образец №4), несмотря на уменьшение среднего шага неровностей профиля S_m в 2,9 раза (до 0,086 мм) и снижение R_a до 2,039 мкм, не способна эффективно снизить шероховатость поверхностного слоя.

Список литературы

1. Клепиков В.В., Порошин В.В., Голов В.А. Качество изделий: учебное пособие. 2-е изд., дополненное и переработанное. – М.: МГИУ, 2006. – 252 с.
2. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным рельефом. – Л.: Машиностроение, 1982. – 59 с.
3. Вейко В.П., Мутин Т.Ю., Смирнов В.Н., Шахно Е.А., Батище С.А. Лазерная очистка поверхностей металлов: физические процессы и применение // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Т. 51, №4. – С. 30-36.
4. Алисин В.В. Влияние лазерной обработки на качество поверхности черных металлов // Фундаментальные основы механики. – 2022. – №10. –С. 24-27.
5. 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.

Сведения об авторах:

Кутепов Сергей Николаевич – к.п.н., доцент, доцент кафедры «Технологии и сервиса»;

Плотников Руслан Вячеславович – аспирант;

Клементьев Денис Сергеевич – старший преподаватель кафедры «Технологии и сервиса».