

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт интеллектуального станкостроения города Нинбо, ООО «Китайская национальная группа машиностроительных институтов», г. Нинбо, Китайская Народная Республика

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОВ (ОБЗОР)

В данном обзоре приведена оценка влияния параметров режима лазерной закалки на шероховатость и твердость поверхности, глубину упрочненного слоя, степень деформации, величину и знак остаточных напряжений, износостойкость. Представлено как скорость обработки, мощность излучения, температура нагрева поверхности, количество проходов при осуществлении лазерной закалки влияют на геометрические параметры зоны лазерного воздействия, шероховатость, твердость и износостойкость поверхности, деформацию, величину и знак остаточных напряжений в поверхностном слое. Сделано заключение в виде рекомендаций по подбору параметров режима лазерной закалки для получения заданного качества поверхности и поверхностного слоя деталей станков.

**Ключевые слова:** лазерная закалка, мощность излучения, зона лазерного воздействия, шероховатость, твердость, остаточные напряжения, износостойкость.

**1. Введение.** Основная тенденция современного машиностроения — это растущая потребность в повышении надежности и долговечности различного рода деталей машин, в том числе и станочных деталей. Для станочных деталей, к которым относятся линейные направляющие и ходовые винты, высокие требования к качеству поверхности и поверхностного слоя связаны, прежде всего, с высокой точностью их изготовления и возможностью сохранения рабочего состояния в течение длительного срока их эксплуатации.

Характерная особенность работы линейных направляющих и ходовых винтов — это неравномерное изнашивание вдоль рабочих поверхностей контактирующих деталей, которое вызывается неравномерностью нагрузки, скоростью перемещения, повторными нагрузками, попаданием в зону контакта посторонних частиц, что приводит к дополнительным деформациям, усталостному разру-

шению, возникновению процессов микрорезания и задирам.

Обеспечить высокую износостойкость и другие эксплуатационные свойства можно за счет применения современных методов поверхностного упрочнения. Одним из наиболее перспективных является лазерная закалка.

**2. Анализ влияния основных параметров режима лазерной закалки на качество поверхности и поверхностного слоя.** Лазерная закалка (ЛЗ) — это процесс термической обработки, в котором используется лазер с плотностью мощности 10–100 МВт/м<sup>2</sup> в локализованной зоне нагрева [1, 2]. Применение этого процесса к стальным деталям и соединение его с технологией быстрой закалки, называемой мартенситной закалкой, позволяют повысить усталостную долговечность и ограничить деформацию стальных деталей [3–5]. Лазерный луч способен быстро повышать температуру поверх-

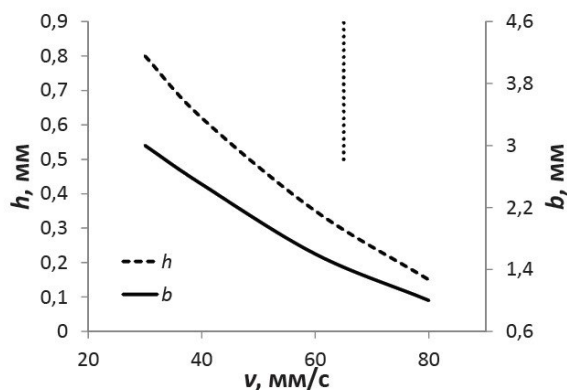


Рис. 1. Зависимость геометрических размеров ЗЛВ для стали 45 от скорости обработки

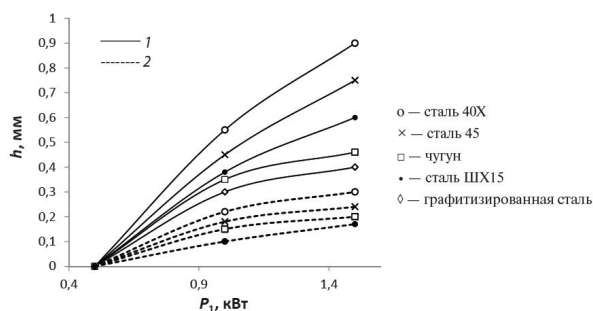


Рис. 2. Зависимость глубины ЗЛВ от мощности излучения: 1 —  $v = 25$  мм/с; 2 —  $v = 83$  мм/с

ности до температуры, превышающей температуру аустенизации. Этот интенсивный процесс нагрева позволяет преобразовать существующую микроструктуру поверхности до аустенита, а затем для получения очень тонкой мартенситной микроструктуры с твердостью 62–64 HRC [6]. Для получения однородного по своей твердости поверхностного слоя на деталях со сложной геометрией требуется специальная настройка параметров процесса лазерной закалки, таких как мощность лазера и скорость обработки [7–9]. Однородный по своей твердости поверхностный слой рекомендуется для равномерного распределения механических нагрузок. Этот слой получается за счет равномерного мартенситного слоя на поверхности закаленной детали. Однородный упрочненный слой позволяет избежать концентрации напряжений на твердом поверхностном слое деталей и ограничивает распространение трещин при периодических нагрузках, что повышает усталостную стойкость деталей [10–12].

В случае линейных направляющих и ходовых винтов однородный по своей твердости поверхностный слой может эффективно уменьшить износ, вызванный истиранием [13].

Основные результаты исследований зарубежных ученых, посвященных лазерной закалке, отражены в работах [1–18, см. также 19–40].

Из российских ученых, которые занимались оптимизацией технологического процесса лазерной закалки, можно выделить таких ученых, как Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н., Майоров В. С., Майоров С. В. и др. [41–48].

Анализируя многие из вышеперечисленных работ, следует устанавить, что наиболее значимыми

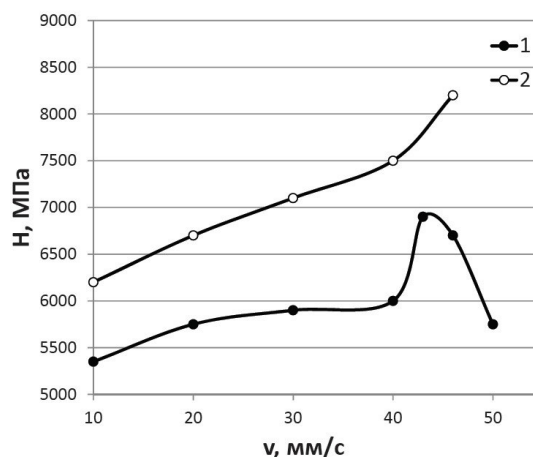


Рис. 3. Влияние скорости лазерной обработки на микротвердость различных слоев ЗЛВ нормализованной стали марки 35: 1 — верх, 2 — низ

параметрами режима лазерной закалки являются мощность излучения, Вт (с возможностью контроля температуры на поверхности, °C) и скорость обработки, м/мин.

В работе [48] представлено, как мощность и скорость обработки влияет на размеры зоны лазерного воздействия (ЗЛВ). В качестве источника лазерной энергии применялся газоразрядный  $\text{CO}_2$  лазер. Результаты исследований представлены на рис. 1, рис. 2.

Основные выводы по этой работе такие:

- глубина и ширина ЗЛВ уменьшаются при увеличении скорости обработки и возрастают при увеличении мощности излучения;
- изменение глубины от скорости нелинейно;
- глубина ЗЛВ увеличивается при увеличении мощности излучения;
- для уменьшения возможности оплавления рекомендуется обработка с меньшей плотностью мощности при большем диаметре сканирующего пятна.

В этой же работе проиллюстрировано влияние скорости лазерной обработки на микротвердость различных слоев ЗЛВ нормализованной стали 35 (рис. 3).

Как видно из рис. 3, в интервале скоростей обработки от 10 до 40 мм/с (от 0,6 до 2,4 м/мин) имело место оплавление поверхности стали и видно, что при этом микротвердость в зоне оплавления непрерывно увеличивается. При увеличении скорости обработки (свыше 40 мм/с (2,4 м/мин)) оплавление исчезает и микротвердость возрастает до 7500 МПа. При дальнейшем увеличении скорости микротвердость верхней части ЗЛВ понижается. Очевидно, в этом случае в поверхностном слое образуется мартенсит с трооститной сеткой. Микротвердость мартенсита в нижней части ЗЛВ при увеличении скорости обработки непрерывно возрастает.

Особенно заметный рост микротвердости мартенситных участков наблюдается при увеличении скорости до 46 мм/с (2,76 м/мин), т.к. с увеличением скорости обработки диффузионное перераспределение углерода между избыточным ферритом и перлитными колониями замедляется. В результате при высокой скорости обработки мартенсит, образующийся на месте перлитных колоний, может иметь концентрацию углерода, близкую к эв-

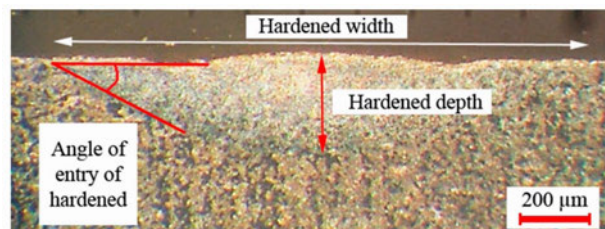


Рис. 4. Оптическое изображение ЗЛВ стали AISI 4130 после лазерной закалки с применением сканирующего луча

тектоидной. Это обуславливает его высокую твердость.

В случае лазерной закалки с применением сканирующего излучения, источником которого выступил Nd:YAG лазер модели IQL10, Raya Parto, научным коллективом авторов [19] изучалось влияние расположения фокальной плоскости, длительности импульса на ширину, глубину, угол входа ЗЛВ. Оптическое изображение микроструктуры ЗЛВ представлено на рис. 4. В результате проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

— длительность импульса оказывает существенное влияние на процесс импульсного лазерного упрочнения поверхности;

— с увеличением длительности импульса глубина ЗЛВ увеличивается;

— при уменьшении положения фокальной плоскости увеличивается плотность лазерной энергии, что приводит к оплавлению поверхности и увеличению ширины, глубины и угла входа ЗЛВ.

Изучением влияния температуры нагрева обрабатываемой поверхности и скорости обработки занимались D. A. Lesyk, S. Martinez, V. V. Dzhemelinskyy, A. Lamikiz, B. N. Mordyuk, G. I. Prokopenko [20, 21]. В своих работах они анализировали, каким образом данные параметры режима ЛЗ влияют на глубину, ширину и твердость поверхности при обработке различных сталей.

Так, для стали AISI D2 [20] наиболее эффективными параметрами режима являются: удельная скорость закалки 90 мм/мин (0,09 м/мин); ширина сканирующей дорожки 10 мм; температура самозакалки  $T_{hard} = 1270$  °С.

Для поиска оптимальных параметров режима ЛЗ стали AISI 1045 авторами работы [21] были получены уравнения регрессии для функции отклика глубины упрочнения ( $h_h$ ), ширины упрочнения ( $b_h$ ), угла упрочнения ( $\alpha_h$ ) и твердости поверхности (HRC):

$$h_h = 177,5 + 120A - 57,76B - 33,55AB + 45,83A^2 + 10B^2, \quad (1)$$

$$b_h = 9850,0 + 600,0A - 318,42B + 26,32AB - 83,33A^2 - 150,0B^2, \quad (2)$$

$$\alpha_h = 4,55 + 1,92A - 1,31B - 0,79AB + 0,03A^2, \quad (3)$$

$$HRC = 55,33 + 3,68A + 2,01B - 0,36AB - 3A^2 - 0,82B^2, \quad (4)$$

где  $A$  — температура нагрева, °С;  
 $B$  — скорость обработки, мм/мин [20].

Используя данные уравнения регрессии, можно при заданных значениях глубины упрочнения ( $h_h$ ), ширины упрочнения ( $b_h$ ), угла упрочнения ( $\alpha_h$ ) и твердости поверхности (HRC) рассчитать оптимальные параметры режима ЛЗ.

К примеру, для повышения производительности обработки рекомендуется вести обработку на более высоких скоростях без ущерба для качества обработанной поверхности.

Сами авторы работы [21] утверждают, что оптимальные режимы лазерной поверхностной закалки углеродистой стали AISI 1045 в отожжённом состоянии под действием сканирующего лазерного луча могут быть определены как находящиеся в диапазоне температур нагрева 1200–1300 °С и скорости обработки 70–90 мм/мин (0,07–0,09 м/мин). Эти оптимальные режимы процесса ЛЗ позволяют увеличить твердость в приповерхностном слое более чем в два раза по сравнению с необработанной поверхностью, обеспечивая увеличение глубины закалки до  $h_h \approx 350$  мкм.

Режимы обработки для тел вращения, в частности для шлицевых валов, можно встретить в работе [22]. Авторы данной публикации применили статистический анализ для поиска оптимальных режимов закалки стали AISI 4340.

Авторы выбрали пять параметров, в которых варьируемыми факторами являются: мощность лазера ( $P$ ), скорость сканирования лазерным лучом ( $S$ ), скорость вращения шлицевого вала в процессе лазерного нагрева ( $R$ ), угол наклона боковых поверхностей шлицев ( $A$ ) и высота зубьев шлицев ( $D$ ) (табл. 1). Полученные результаты показывают, что глубина закаленного слоя минимальна при параметрах режима обработки, представленного в опыте № 2:  $P = 1900$  Вт,  $S = 4$  мм/с,  $R = 2000$  об/мин и  $A = 15^\circ$ ) и максимальна при параметрах режима обработки (опыт № 9):  $P = 2500$  Вт,  $S = 2$  мм/с,  $R = 2500$  об/мин и  $A = 20^\circ$ ). Глубина закаленного слоя составляет 0,05 мм при вершине и 0,05 мм у корня зуба шлица (опыт № 2), в то время как глубина закаленного слоя составляет 0,95 мм при вершине и 0,45 мм у корня зуба шлица (опыт № 9).

Чтобы оценить глубину закаленного слоя у вершины ( $HT$ ) и корня ( $HR$ ) в зависимости от мощности лазера ( $P$ ), скорости сканирования ( $S$ ), скорости вращения ( $R$ ), угла наклона боковой поверхности ( $A$ ) и высоты зуба ( $D$ ), авторы использовали метод линейной регрессии для определения адекватных коэффициентов уравнения в полиномиальной функции. После исключения несущественных коэффициентов полученные уравнения регрессии глубины закаленного слоя при вершине ( $HT$ ) и корне ( $HR$ ) зуба могут быть представлены в виде формул:

$$HT = -3,122 + 0,001717P + 0,3953S + 0,000065R + 0,00625A + 0,1373D + 0,03906S^2 - 0,000319PS - 0,0452SD, \quad (5)$$

$$HR = -0,981 + 0,000649P + 0,0680S + 0,000023R + 0,00375A + 0,01406S^2 - 0,000103PS. \quad (6)$$

Анализируя полученные уравнения регрессии, авторы сделали вывод, что увеличение мощности лазера и уменьшение скорости сканирования приводят к увеличению глубины закаленного слоя независимо от угла наклона зуба шлица ( $15^\circ$  или  $20^\circ$ ).

Результаты экспериментальных исследований в отношении изменения значений факторов в каждом опыте

№ опыта	$P$ [Вт]	$S$ [мм/с]	$R$ [об/мин]	$A$ [°]	$D$ [мм]	$HT$ [мм]	$HR$ [мм]
1	1900	2	1500	15	2,5	0,20	0,15
2	1900	4	2000	15	3,0	0,05	0,05
3	2200	6	2500	15	3,0	0,05	0,10
4	2500	4	1500	15	3,5	0,20	0,20
5	2200	2	2000	15	3,5	0,60	0,30
6	2500	4	1500	15	3,0	0,25	0,20
7	1900	6	1500	15	3,0	0,05	0,05
8	1900	4	2500	15	2,5	0,05	0,05
9	2500	2	2500	20	3,0	0,95	0,45
10	2200	4	1500	20	2,5	0,15	0,15
11	1900	6	1500	20	3,5	0,05	0,10
12	1900	4	2000	20	3,0	0,05	0,10
13	1900	2	1500	20	3,0	0,20	0,15
14	1900	4	2500	20	3,5	0,05	0,10
15	2500	6	2000	20	2,5	0,10	0,15
16	2200	4	1500	20	3,0	0,15	0,15

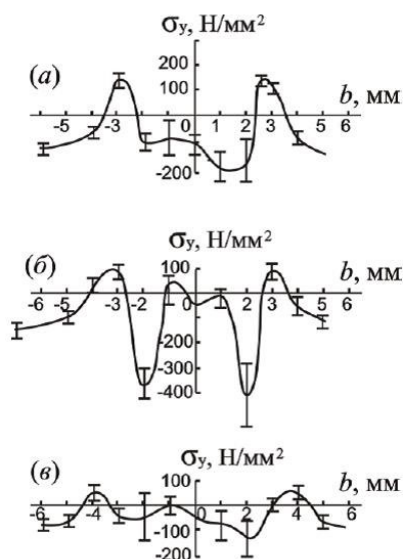


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_y$  на поверхности стали У8 в зависимости от расстояния от центра полосы при обработке со скоростью  $v = 2$  м/мин и различной мощностью: (а) — 1 кВт; (б) — 2 кВт; (в) — 3 кВт

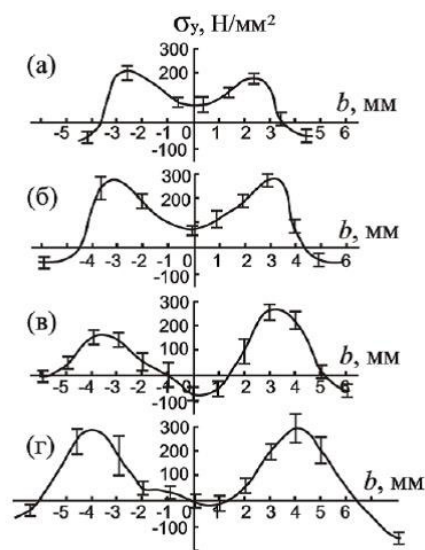


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_y$  на поверхности технического железа в зависимости от расстояния от центра полосы при обработке со скоростью  $v = 2$  м/мин и различной мощностью: (а) — 0,9 кВт; (б) — 1,3 кВт; (в) — 2 кВт; (г) — 3 кВт

Полученные уравнения регрессии вполне могут быть применены для определения оптимальных режимов ЛЗ деталей типа тел вращения.

Исследованию многопроходной ЛЗ посвящена работа [23]. Авторы исследовали поведение стали марки AISI 4140 с различными условиями термообработки. Научным коллективом была проведена многопроходная ЛЗ с 1, 2, 4, 8 и 16 проходами для изучения влияния многоциклового теплового нагружения на модификацию материала. Были реализованы две схемы многопроходного лазерного упрочнения путем применения лазера мощностью 1500 Вт для поддержания постоянной максимальной температуры поверхности 1170 °С.

Авторами было установлено:

— с увеличением количества проходов возрастает максимальная температура обрабатываемой поверхности;

— существует тенденция к повышению твердости в упрочненной зоне и глубины упрочненного слоя после 16 проходов;

— остаточные напряжения на поверхности уменьшаются с увеличением количества проходов.

Изучением деформаций и остаточных напряжений на поверхности сталей, закаленных непрерывным лазерным излучением, занимались такие ученые, как В. С. Майоров и др. [45–47]. При лазерной обработке сплавов наблюдается большая

неравномерность распределения температуры, что приводит к значительной структурной неоднородности по толщине и ширине ЗЛВ. Это может вызвать значительную неоднородность распределения остаточных напряжений по толщине и ширине ЗЛВ и привести к деформации изделий.

Анализ результатов исследования показал, что при повышении мощности излучения изменяется не только величина напряжений в центре полосы, но и характер их распределения в поперечном направлении. Так, при мощности излучения  $P = 1$  кВт распределение остаточных напряжений на стали У8 (рис. 5) подобно их распределению для технического железа (рис. 6в). При  $P = 2$  кВт форма кривой распределения остаточных напряжений сильно усложняется: в центре полосы оплавления напряжения практически равны нулю, по краям наблюдаются минимумы, соответствующие  $\sigma_y = -370 \dots -410$  Н/мм<sup>2</sup>, а на границе ЗЛВ с необлученной поверхностью вновь наблюдаются участки с небольшими растягивающими напряжениями. Возникновение максимума в центре оплавленной полосы можно связать с возможностью самоотпуска, а также с увеличением количества остаточного аустенита. При  $P = 3$  кВт зона оплавления имеет большие геометрические размеры, а кривая распределения остаточных напряжений поперек полосы проходит около нулевых значений с небольшим отклонением по обе стороны.

Величина и знак остаточных напряжений на поверхности упрочненных лазером полос зависят от соотношения объемных изменений, обусловленных чисто тепловым воздействием, и структурных превращениями.

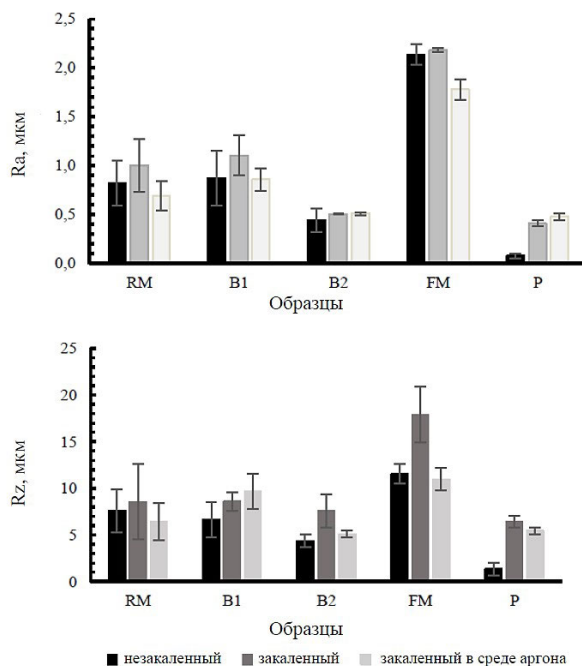
Образование в процессе охлаждения достаточно насыщенного углеродом мартенсита приводит к формированию в центре полосы сталей 45, 40Х, У8 сжимающих остаточных напряжений. Уменьшение содержания углерода в мартенсите приводит к уменьшению объемного эффекта при охлаждении и доли сжимающих напряжений на поверхности. В структуре легированных сталей ХВГ и Р18 наблюдается большое количество остаточного аустенита, и объемный эффект за счет мартенситного превращения понижается. Это приводит к тому, что на поверхности этих сталей после лазерной обработки преобладают растягивающие напряжения.

Все это, по мнению авторов, приводит к деформации длинномерных образцов и требует подбора режимов ЛЗ, обеспечивающих минимально допустимые значения деформации в каждом конкретном случае.

Результаты исследований влияния процесса ЛЗ на износостойкость можно найти в работах [24–40]. Основное заключение из этих работ то, что ЛЗ приводит снижению износа рабочих поверхностей образцов в 1,5–2 раза и снижению коэффициента трения на 20–25 % по сравнению с исходными образцами.

Влияние ЛЗ на шероховатость поверхности описано в работе [49].

Исследования шероховатости на профилометре были проведены на необработанных и обработанных зонах до и после использования газа аргона. Для каждого образца были получены параметры шероховатости. На рис. 7 представлены результаты определения шероховатости, полученные для различных образцов. Параметр шероховатости  $Ra$  является одним из наиболее анализируемых и соответствует



**Рис. 7. Параметры шероховатости образцов:**  
**RM — грубое фрезерование, B1 — обработка щеткой за один проход; B2 — обработка щеткой за три прохода, FM — чистовое фрезерование, P — полирование**

среднему арифметическому высот поверхности образца.  $Rz$  — максимальная высота профиля шероховатости.

Исходя из результатов, приведенных на рис. 7, можно сделать вывод, что параметр шероховатости  $Ra$  увеличивается на поверхности всех образцов после ЛЗ без применения защитной среды. Такое же поведение наблюдается и для параметра шероховатости  $Rz$ , все образцы показали незначительное увеличение шероховатости.

Сравнивая результаты, полученные в экспериментах с применением защитной среды — аргона и без него, можно сделать вывод, что в целом увеличение шероховатости наблюдается не во всех образцах, за исключением образцов после ЛЗ с применением защитной среды.

**3. Заключение.** Параметры режима лазерной закалки оказывают значительное влияние на состояние поверхности и поверхностного слоя после данного вида упрочняющей обработки. В значительной степени на качество поверхности и поверхностного слоя оказывают влияние параметры режима лазерной закалки, такие как скорость обработки, мощность излучения.

В качестве рекомендаций по подбору параметров режима лазерной закалки можно предложить режимы, обеспечивающие снижение шероховатости, получение высокой твердости и глубины упрочненного слоя, минимальные деформации обработанных деталей.

Так, для получения минимальных значений шероховатости необходимо проводить лазерную закалку с применением защитной среды в виде инертных газов, что практически исключает появление оксидных пленок на закаленной поверхности.

Для повышения твердости и глубины упрочненного слоя необходимо проводить лазерную закалку с оптимальной скоростью обработки и возможно большими значениями мощности излучения, избегая при этом оплавления поверхности.

Максимальное снижение деформации обеспечивается подбором значений скорости и мощности излучения в каждом конкретном случае и во многом зависит от сечения обрабатываемой заготовки.

### Благодарности

Благодарим компанию Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. за поддержку при проведении экспериментов, приведенных в данной статье.

### Библиографический список

- Zhang T., Li L., Liang F., Yang B. Parameter optimization of laser die-surface hardening using the particle swarm optimization technique // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008. Vol. 36. P. 1104–1112. DOI: 10.1007/s00170-007-0929-8.
- Sun P., Li S., Yu G. [et al.]. Laser surface hardening of 42CrMo cast steel for obtaining a wide and uniform hardened layer by shaped beams // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 70. P. 787–796. DOI: 10.1007/s00170-013-5292-3.
- Yilbas B. S., Akhtar S. S., Keles O. Laser cutting of small diameter hole in aluminum foam // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 79. P. 101–111. DOI: 10.1007/s00170-015-6789-8.
- Alvarenga H. D., van de Putte T., van Steenberghe N. [et al.]. Influence of carbide morphology and microstructure on the kinetics of superficial decarburization of C-Mn steels // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2015. Vol. 46. P. 123–133. DOI: 10.1007/s11661-014-2600-y.
- Fakir R., Barka N., Brousseau J. Case study of laser hardening process applied to 4340 steel cylindrical specimens using simulation and experimental validation // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018. Vol. 11. P. 15–25. DOI: 10.1016/j.csite.2017.12.002.
- Erdem M., Altug M., Karabulut M. Investigation of mechanical, microstructural, and machining properties of AISI 420 martensitic stainless steel welded by laser welding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 85. P. 481–492. DOI: 10.1007/s00170-015-7924-2.
- Barka N., Bocher P., Brousseau J. Sensitivity study of hardness profile of 4340 specimen heated by induction process using axisymmetric modeling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 69. P. 2747–2756. DOI: 10.1007/s00170-013-5212-6.
- Safeen W., Hussain S., Wasim A. [et al.]. Predicting the tensile strength, impact toughness, and hardness of friction stir-welded AA6061-T6 using response surface methodology // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 87. P. 1765–1781. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.12.025.
- Fakir R., Barka N., Brousseau J. Servo-control applied to the parameters of the laser hardening process for a regular case depth of 4340 steel cylindrical specimen // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2019. Vol. 19, № 3. DOI: 10.1115/1.4042918.
- Nassef G. A., Elkhatib A., Yakout M. Analysis of a failed rocker arm shaft of a passenger car engine // *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 5–6. P. 10–14. DOI: 10.1016/j.csefa.2016.01.001.
- Rafi H. K., Starr T. L., Stucker B. E. A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti–6Al–4V and 15-5 PH stainless steel parts made by selective laser melting // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 69. P. 1299–1309. DOI: 10.1007/s00170-013-5106-7.
- Fakir R., Barka N., Brousseau J. [et al.]. Analysis of the mechanical behavior of AISI 4340 steel cylindrical specimens heat treated with fiber laser // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 55. P. 41–56. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.03.039.
- Prime M. B., Sebring R. J., Edwards J. M. [et al.]. Laser surface-contouring and spline data-smoothing for residual stress measurement // *Experimental Mechanics*. 2004. Vol. 44. P. 176–184. DOI: 10.1007/BF02428177.
- Sun Y., Hao M. Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd:YAG laser // *Optics and Lasers in Engineering*. 2012. Vol. 50. P. 985–995. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2012.01.018.
- Lambiase F., di Ilio A. M., Paoletti A. Prediction of laser hardening by means of neural network // *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 12. P. 181–186. DOI: 10.1016/j.procir.2013.09.032.
- Bailey N. S., Shin Y. C. Optimization of laser hardening processes for industrial parts with complex geometry via predictive modeling // In *Proceedings of the ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, October 4–7, 2009. West Lafayette, USA, 2009. P. 647–656.
- Babu P. D., Buvanashakaran G., Balasubramanian K. R. Experimental studies on the microstructure and hardness of laser transformation hardening of low alloy steel // *Transactions-Canadian Society for Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 36. P. 241–258. DOI: 10.1139/tcsme-2012-0018.
- Lusquinos F., Conde J. C., Bonss S. [et al.]. Theoretical and experimental analysis of high power diode laser (HPDL) hardening of AISI 1045 steel // *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 254. P. 948–954. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.07.200.
- Giuseppe C., Mahmoud M., Mojtaba K. M. [et al.]. Experimental and Numerical Study of AISI 4130 Steel Surface Hardening by Pulsed Nd:YAG Laser // *Materials*. 2019. Vol. 12 (19). DOI: 10.3390/ma12193136.
- Lesyk D. A., Martinez S., Dzhemelinskyy V. V. [et al.]. Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 278. P. 108–120. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.07.049.
- Lesyk D. A., Martinez S., Mordyuk B. N. [et al.]. Effects of laser heat treatment combined with ultrasonic impact treatment on the surface topography and hardness of carbon steel AISI 1045 // *Optics & Laser Technology*. 2019. Vol. 111. P. 424–438. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.09.030.
- Barka N., Sattarpanah Karganroudi S., Fakir R. [et al.]. Effects of Laser Hardening Process Parameters on Hardness Profile of 4340 Steel Spline – An Experimental Approach // *Coatings*. 2020. Vol. 10, no. 4. DOI: 10.3390/coatings10040342.
- Lu Y., Meyer H., Radet T. Multi-cycle phase transformation during laser hardening of AISI 4140 // *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 94. P. 919–923. DOI: 10.1016/j.procir.2020.09.073.
- Zhikai C., Qinghai Z., Jing W. [et al.]. Behaviors of 40Cr steel treated by laser quenching on impact abrasive wear // *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 103. P. 118–125. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.01.039.
- Ozan Y., Suat Y. Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels // *Tribology International*. 2017. Vol. 119. P. 222–229. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.11.006.
- Baykara T., Keskin N. Effects of Laser Hardening Treatment on the Wear Properties of the Vanadis 4 Extra and Vanadis 10 Tool Steels // *Int. J. Metall. Met. Phys*. 2019. Vol. 4. DOI: 10.35840/2631-5076/9229.
- Martinez S., Lamikiz A., Ukar E. [et al.]. Analysis of the regimes in the scanner-based laser hardening process // *Optics and Lasers in Engineering*. 2017. Vol. 90. P. 72–80. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.005.
- Li M., Chen X., Beibei Z., Rui Y. [et al.]. Comparison on the microstructure, bending properties and tribological behaviors of rail materials treated by laser dispersed quenching and induction assisted laser dispersed quenching // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 410. 126936. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126936.

29. Bakhtiari M., Fayazi K. A., Farnia A. Improving the Wear Properties of AISI 4130 Steel Using Laser Surface Hardening Treatment // Arab. J. Sci. Eng. 2023. Vol. 48. P. 11801–11818. DOI: 10.1007/s13369-022-07551-5.
30. Park C., Kim J., Sim A. [et al.]. Influence of diode laser heat treatment and wear conditions on the fretting wear behavior of a mold steel // Wear. 2019. Vol. 434–435. DOI: 10.1016/j.wear.2019.202961.
31. Telasang G., Dutta Majumdar J. [et al.]. Wear and corrosion behavior of laser surface engineered AISI H13 hot working tool steel // Surface and Coatings Technology. 2015. Vol. 261. P. 69–78. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.058.
32. Lei S., Liu Q.cK., Liu Y.cP. [et al.]. Wear behavior of laser-hardened GCr15 steel under lubricated sliding conditions // Materials Science Forum. 2009. Vol. 628–629. P. 697–702. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.628-629.697.
33. Kaul R., Ganesh P., Tiwari P. [et al.]. Characterization of dry sliding wear resistance of laser surface hardened En 8 steel // Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 167. P. 83–90. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.09.085.
34. Roy S., Zhao J., Shrotriya P. [et al.]. Effect of laser treatment parameters on surface modification and tribological behavior of AISI 8620 steel // Tribology International. 2017. Vol. 112. P. 94–102. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.03.036.
35. Yazici O., Yilmaz S. Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels // Tribology International. 2018. Vol. 119. P. 222–229. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.11.006.
36. Baykara T., Keskin N. Effects of laser hardening treatment on the wear properties of the vanadis 4 extra and vanadis 10 tool steels // International Journal of Metallurgy and Metal Physics. 2019. Vol. 4. P. 1–9. DOI: 10.35840/2631-5076/9229.
37. Bambirra de Oliveira R. J., Mota de Siqueira R. H., Fernandes de Lima M. S. Microstructure and wear behaviour of laser hardened SAE 4130 steels // International Journal of Surface Science and Engineering. 2018. Vol. 12, no. 2. P. 161–170. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2018.10012334.
38. Chen C., Feng A., Liu B. [et al.]. Effect of quench-tempering and laser quenching on the microstructure and properties of high-chromium cast iron // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 9. P. 2759–2773. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.06.022.
39. Feng A., Wei Y., Liu B. [et al.]. Microstructure and mechanical properties of composite strengthened high-chromium cast iron by laser quenching and laser shock peening // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 20. P. 4342–4355. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.08.148.
40. Lesyk D. A., Martinez S., Mordyuk B. N. [et al.]. Combining laser transformation hardening and ultrasonic impact strain hardening for enhanced wear resistance of AISI 1045 steel // Wear. 2020. Vol. 462–463. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203494.
41. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н., Майоров В. С. [и др.]. Распределение остаточных напряжений на поверхности сталей, упрочненных непрерывным СО<sub>2</sub>-лазером // Металловедение и термическая обработка металлов. 1987. № 9. С. 45–49.
42. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н. Лазерная техника и технология. В 7 т. Т. 3. Методы поверхностной лазерной обработки. Москва: Высшая школа, 1987. 192 с.
43. Рыкалин Н. Н. [и др.]. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справ. Москва: Машиностроение, 1985. 496 с.
44. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н. Лазерная техника и технология. В 7 т. Т. 6. Основы лазерного термоупрочнения сплавов. Москва: Высшая школа, 1988. 159 с.
45. Майоров В. С., Майоров С. В. Закалка чугуновых деталей излучением твердотельного лазера // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. № 3 (645). С. 6–8.
46. Майоров В. С., Майоров С. В., Стернин М. Ю. Компьютерные системы поддержки принятия решений для лазерных технологических процессов обработки материалов // Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В. Я. Панченко. Москва: Физматлит, 2009. С. 494–506.
47. Майоров В. С., Сафонов А. Н., Тарасенко В. М. Исследование структуры и свойств сплавов при лазерной обработке и разработка технологии упрочнения промышленных изделий // Применение лазеров в народном хозяйстве: Всесоюз. конф., 17–20 мая 1985 г. Звенигорода, 1985. С. 156–157.
48. Майсурадзе М. В., Рыжков М. А., Корниенко О. Ю. [и др.]. Индукционная и лазерная термическая обработка стальных изделий. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2022. 92 с. ISBN 978-5-7996-3544-2. EDN NTXZGS.
49. Lagarinhos J. N., Santos S., Miranda G. [et al.]. The influence of surface finishing on laser heat treatments of a tool steel // Procedia CIRP. 2022. Vol. 108. P. 839–844. DOI: 10.1016/j.procir.2022.03.129.

---

**ПЕТРОЧЕНКО Сергей Валерьевич**, кандидат техни-

ческих наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Омского государственного университета путей сообщения, г. Омск; старший инженер-исследователь Научно-исследовательского института интеллектуального станкостроения города Нинбо, ООО «Китайская национальная группа машиностроительных институтов», г. Нинбо, Китайская Народная Республика.

SPIN-код: 3294-1488

AuthorID (РИНЦ): 648136

ORCID: 0000-0001-5600-835X

AuthorID (SCOPUS): 57983962200

ResearcherID: A-8009-2014

**ХАО Цинлэ**, доктор философских наук, заместитель директора отдела «Институт передового производства» Научно-исследовательского института интеллектуального станкостроения города Нинбо, ООО «Китайская национальная группа машиностроительных институтов», г. Нинбо, Китайская Народная Республика.

AuthorID (SCOPUS): 56237276500

**ЮЙ Синьшань**, инженер-исследователь отдела «Институт передового производства» Научно-исследовательского института интеллектуального станкостроения города Нинбо, ООО «Китайская национальная группа машиностроительных институтов», г. Нинбо, Китайская Народная Республика.

ORCID: 0009-0003-4899-1018

**ЧЖАО Кайпэн**, инженер-исследователь отдела «Институт передового производства» Научно-исследовательского института интеллектуального станкостроения города Нинбо, ООО «Китайская национальная группа машиностроительных институтов», г. Нинбо, Китайская Народная Республика.

ORCID: 0009-0005-2149-9159

**Для цитирования**

Петrochenko С. В., Хао Ц., Юй С., Чжао К. Оценка влияния параметров режима лазерной закалки на качество поверхности и поверхностного слоя деталей станков (обзор) // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 56–65. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-56-65.

Статья поступила в редакцию 06.09.2023 г.

© С. В. Петrochenko, Ц. Хао, С. Юй, К. Чжао

# EVALUATION OF THE INFLUENCE OF LASER QUENCHING MODE PARAMETERS ON THE QUALITY OF THE SURFACE AND SURFACE LAYER OF MACHINE PARTS (OVERVIEW)

This review provides an assessment of the influence of the parameters of the laser hardening mode on the quality of the surface and the surface layer. It is presented how the processing speed, radiation power, surface heating temperature, initial structure during, the number of passes laser hardening affect the geometric parameters of the laser exposure zone, roughness, hardness and wear resistance of the surface, deformation, magnitude and sign of residual stresses in the surface layer. The conclusion is made in the form of recommendations on the selection of parameters of the laser hardening mode to obtain a given surface quality and surface layer of machine parts.

**Keywords:** laser hardening, radiation power, laser exposure zone, roughness, hardness, residual stresses, wear resistance.

## Acknowledgements

Thanks to Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. for providing support for the experiments of this paper.

## References

1. Zhang T., Li L., Liang F., Yang B. Parameter optimization of laser die-surface hardening using the particle swarm optimization technique // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008. Vol. 36. P. 1104–1112. DOI: 10.1007/s00170-007-0929-8. (In Engl.).
2. Sun P., Li S., Yu G. [et al.]. Laser surface hardening of 42CrMo cast steel for obtaining a wide and uniform hardened layer by shaped beams // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 70. P. 787–796. DOI: 10.1007/s00170-013-5292-3. (In Engl.).
3. Yilbas B. S., Akhtar S. S., Keles O. Laser cutting of small diameter hole in aluminum foam // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 79. P. 101–111. DOI: 10.1007/s00170-015-6789-8. (In Engl.).
4. Alvarenga H. D., van de Putte T., van Steenberghe N. [et al.]. Influence of carbide morphology and microstructure on the kinetics of superficial decarburization of C-Mn steels // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2015. Vol. 46. P. 123–133. DOI: 10.1007/s11661-014-2600-y. (In Engl.).
5. Fakir R., Barka N., Brousseau J. Case study of laser hardening process applied to 4340 steel cylindrical specimens using simulation and experimental validation // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018. Vol. 11. P. 15–25. DOI: 10.1016/j.csite.2017.12.002. (In Engl.).
6. Erdem M., Altug M., Karabulut M. Investigation of mechanical, microstructural, and machining properties of AISI 420 martensitic stainless steel welded by laser welding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 85. P. 481–492. DOI: 10.1007/s00170-015-7924-2. (In Engl.).
7. Barka N., Bocher P., Brousseau J. Sensitivity study of hardness profile of 4340 specimen heated by induction process using axisymmetric modeling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 69. P. 2747–2756. DOI: 10.1007/s00170-013-5212-6. (In Engl.).
8. Safeen W., Hussain S., Wasim A. [et al.]. Predicting the tensile strength, impact toughness, and hardness of friction stir-welded AA6061-T6 using response surface methodology // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.



2016. Vol. 87. P. 1765–1781. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.12.025. (In Engl.).
9. Fakir R., Barka N., Brousseau J. Servo-control applied to the parameters of the laser hardening process for a regular case depth of 4340 steel cylindrical specimen // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2019. Vol. 19, no. 3. DOI: 10.1115/1.4042918. (In Engl.).
10. Nassef G. A., Elkhatib A., Yakout M. Analysis of a failed rocker arm shaft of a passenger car engine // *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 5–6. P. 10–14. DOI: 10.1016/j.csefa.2016.01.001. (In Engl.).
11. Rafi H. K., Starr T. L., Stucker B. E. A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti–6Al–4V and 15-5 PH stainless steel parts made by selective laser melting // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 69. P. 1299–1309. DOI: 10.1007/s00170-013-5106-7. (In Engl.).
12. Fakir R., Barka N., Brousseau J. [et al.]. Analysis of the mechanical behavior of AISI 4340 steel cylindrical specimens heat treated with fiber laser // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 55. P. 41–56. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.03.039. (In Engl.).
13. Prime M. B., Sebring R. J., Edwards J. M. [et al.]. Laser surface-contouring and spline data-smoothing for residual stress measurement // *Experimental Mechanics*. 2004. Vol. 44. P. 176–184. DOI: 10.1007/BF02428177. (In Engl.).
14. Sun Y., Hao M. Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd:YAG laser // *Optics and Lasers in Engineering*. 2012. Vol. 50. P. 985–995. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2012.01.018. (In Engl.).
15. Lambiase F., di Ilio A.M., Paoletti A. Prediction of laser hardening by means of neural network // *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 12. P. 181–186. DOI: 10.1016/j.procir.2013.09.032. (In Engl.).
16. Bailey N. S., Shin Y. C. Optimization of laser hardening processes for industrial parts with complex geometry via predictive modeling // *In Proceedings of the ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, October 4–7, 2009. West Lafayette, USA, 2009. P. 647–656. (In Engl.).
17. Babu P. D., Buvanashakaran G., Balasubramanian K. R. Experimental studies on the microstructure and hardness of laser transformation hardening of low alloy steel // *Transactions-Canadian Society for Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 36. P. 241–258. DOI: 10.1139/tcsme-2012-0018. (In Engl.).
18. Lusquinos F., Conde J. C., Bonss S. [et al.]. Theoretical and experimental analysis of high power diode laser (HPDL) hardening of AISI 1045 steel // *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 254. P. 948–954. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.07.200. (In Engl.).
19. Giuseppe C., Mahmoud M., Mojtaba K. M. [et al.]. Experimental and Numerical Study of AISI 4130 Steel Surface Hardening by Pulsed Nd:YAG Laser // *Materials*. 2019. Vol. 12 (19). DOI: 10.3390/ma12193136. (In Engl.).
20. Lesyk D. A., Martinez S., Dzhemelinsky V. V. [et al.]. Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 278. P. 108–120. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.07.049. (In Engl.).
21. Lesyk D. A., Martinez S., Mordyuk B. N. [et al.]. Effects of laser heat treatment combined with ultrasonic impact treatment on the surface topography and hardness of carbon steel AISI 1045 // *Optics & Laser Technology*. 2019. Vol. 111. P. 424–438. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.09.030. (In Engl.).
22. Barka N., Sattarpanah Karganroudi S., Fakir R. [et al.]. Effects of Laser Hardening Process Parameters on Hardness Profile of 4340 Steel Spline — An Experimental Approach // *Coatings*. 2020. Vol. 10, no. 4. DOI: 10.3390/coatings10040342. (In Engl.).
23. Lu Y., Meyer H., Radel T. Multi-cycle phase transformation during laser hardening of AISI 4140 // *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 94. P. 919–923. DOI: 10.1016/j.procir.2020.09.073. (In Engl.).
24. Zhikai C., Qinghai Z., Jing W. [et al.]. Behaviors of 40Cr steel treated by laser quenching on impact abrasive wear // *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 103. P. 118–125. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.01.039. (In Engl.).
25. Ozan Y., Suat Y. Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels // *Tribology International*. 2017. Vol. 119. P. 222–229. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.11.006. (In Engl.).
26. Baykara T., Keskin N. Effects of Laser Hardening Treatment on the Wear Properties of the Vanadis 4 Extra and Vanadis 10 Tool Steels // *Int. J. Metall. Met. Phys.* 2019. Vol. 4. DOI: 10.35840/2631-5076/9229. (In Engl.).
27. Martinez S., Lamikiz A., Ukar E. [et al.]. Analysis of the regimes in the scanner-based laser hardening process // *Optics and Lasers in Engineering*. 2017. Vol. 90. P. 72–80. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.005. (In Engl.).
28. Li M., Chen X., Beibei Z., Rui Y. [et al.]. Comparison on the microstructure, bending properties and tribological behaviors of rail materials treated by laser dispersed quenching and induction assisted laser dispersed quenching // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 410. 126936. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126936. (In Engl.).
29. Bakhtiari M., Fayazi K. A., Farnia A. Improving the Wear Properties of AISI 4130 Steel Using Laser Surface Hardening Treatment // *Arab. J. Sci. Eng.* 2023. Vol. 48. P. 11801–11818. DOI: 10.1007/s13369-022-07551-5. (In Engl.).
30. Park C., Kim J., Sim A. [et al.]. Influence of diode laser heat treatment and wear conditions on the fretting wear behavior of a mold steel // *Wear*. 2019. Vol. 434–435. DOI: 10.1016/j.wear.2019.202961. (In Engl.).
31. Telasang G., Dutta Majumdar J. [et al.]. Wear and corrosion behavior of laser surface engineered AISI H13 hot working tool steel // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 261. P. 69–78. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.058. (In Engl.).
32. Lei S., Liu Q.cK., Liu Y.cP. [et al.]. Wear behavior of laser-hardened GCr15 steel under lubricated sliding conditions // *Materials Science Forum*. 2009. Vol. 628–629. P. 697–702. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.628-629.697. (In Engl.).
33. Kaul R., Ganesh P., Tiwari P. [et al.]. Characterization of dry sliding wear resistance of laser surface hardened En 8 steel // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 167. P. 83–90. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.09.085. (In Engl.).
34. Roy S., Zhao J., Shrotriya P. [et al.]. Effect of laser treatment parameters on surface modification and tribological behavior of AISI 8620 steel // *Tribology International*. 2017. Vol. 112. P. 94–102. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.03.036. (In Engl.).
35. Yazici O., Yilmaz S. Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels // *Tribology International*. 2018. Vol. 119. P. 222–229. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.11.006. (In Engl.).
36. Baykara T., Keskin N. Effects of laser hardening treatment on the wear properties of the vanadis 4 extra and vanadis 10 tool steels // *International Journal of Metallurgy and Metal Physics*. 2019. Vol. 4. P. 1–9. DOI: 10.35840/2631-5076/9229. (In Engl.).
37. Bambirra de Oliveira R. J., Mota de Siqueira R. H., Fernandes de Lima M. S. Microstructure and wear behaviour of laser hardened SAE 4130 steels // *International Journal of Surface Science and Engineering*. 2018. Vol. 12, no. 2. P. 161–170. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2018.10012334. (In Engl.).
38. Chen C., Feng A., Liu B. [et al.]. Effect of quench-tempering and laser quenching on the microstructure and properties of high-chromium cast iron // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 9. P. 2759–2773. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.06.022. (In Engl.).
39. Feng A., Wei Y., Liu B. [et al.]. Microstructure and mechanical properties of composite strengthened high-chromium cast iron by laser quenching and laser shock peening // *Journal*

of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 20. P. 4342–4355. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.08.148. (In Engl.).

40. Lesyk D. A., Martinez S., Mordiyuk B. N. [et al.]. Combining laser transformation hardening and ultrasonic impact strain hardening for enhanced wear resistance of AISI 1045 steel // *Wear*. 2020. Vol. 462–463. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203494. (In Engl.).

41. Grigoryants A. G., Safonov A. N., Mayorov V. S. [et al.]. Raspredeleniye ostatochnykh napryazheniy na poverkhnosti staley, uprochnennykh nepreryvnym SO<sub>2</sub>-lazerom [Distribution of residual stresses on the surface of steels hardened with a continuous CO<sub>2</sub> laser] // *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. Metallology and Heat Treatment of Metals*. 1987. No. 9. P. 45–49. (In Russ.).

42. Grigoryants A. G., Safonov A. N. Lazernaya tekhnika i tekhnologiya. V 7 t. T. 3. Metody poverkhnostnoy lazernoy obrabotki [Laser technology and technology. In 7 vols. Vol. 3. Methods of surface laser processing]. Moscow, 1987. 192 p. (In Russ.).

43. Rykalin N. N. [et al.]. Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov: spravochnik [Laser and electron beam processing of materials: handbook]. Moscow, 1985. 496 p. (In Russ.).

44. Grigoryants A. G., Safonov A. N. Lazernaya tekhnika i tekhnologiya. V 7 t. T. 6. Osnovy lazernogo termouprochneniya splavov [Laser technology and technology In 7 vols. Vol. 6. Fundamentals of laser thermal hardening of alloys]. Moscow, 1988. 159 p. (In Russ.).

45. Mayorov V. S., Mayorov S. V. Zakalka chugunnykh detaley izlucheniym tverdotel'nogo lazera [Hardening of cast iron parts by solid-state laser radiation] // *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. Metallology and Heat Treatment of Metals*. 2009. No. 3 (645). P. 6–8. (In Russ.).

46. Mayorov V. S., Mayorov S. V., Sternin M. Yu. Komp'yuternyye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy dlya lazernykh tekhnologicheskikh protsessov obrabotki materialov [Computer decision support systems for laser technological processes of materials processing] // *Lazernyye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennyye problemy fundamental'nykh issledovaniy i prikladnykh razrabotok* [Laser technologies of materials processing: modern problems of fundamental research and applied developments] / Ed. by V. Ya. Panchenko. Moscow, 2009. P. 494–506. (In Russ.).

47. Mayorov V. S., Safonov A. N., Tarasenko V. M. Issledovaniye struktury i svoystv splavov pri lazernoy obrabotke i razrabotka tekhnologii uprochneniya promyshlennykh izdeliy [Investigation of the structure and properties of alloys during laser processing and development of technology for hardening industrial products] // *Primeneniye lazerov v narodnom khozyaystve. Application of Lasers in the National Economy*. May 17–20, 1985. Zvenigorod, 1985. P. 156–157. (In Russ.).

48. Maisuradze M. V., Ryzhkov M. A., Kornienko O. Yu. [et al.]. Induktsionnaya i lazernaya termicheskaya obrabotka

stal'nykh izdeliy [Induction and laser heat treatment of steel products]. Yekaterinburg, 2022. 92 p. ISBN 978-5-7996-3544-2. EDN: NTXZGS. (In Russ.).

49. Lagarinhos J. N., Santos S., Miranda G. [et al.]. The influence of surface finishing on laser heat treatments of a tool steel // *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 108. P. 839–844. DOI: 10.1016/j.procir.2022.03.129. (In Engl.).

**PETROCHENKO Sergei Valeryevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Technologies of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock Department, Omsk State Transport University, Omsk; Senior Research Engineer Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Institute Group, Ningbo, People's Republic of China.

SPIN-code: 3294-1488

AuthorID (RSCI): 648136

ORCID: 0000-0001-5600-835X

AuthorID (SCOPUS): 57983962200

ResearcherID: A-8009-2014

**HAO Qingle**, Doctor of Philosophy Sciences, Deputy Director of Institute of Advanced Manufacturing Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Institute Group, Ningbo, People's Republic of China.

AuthorID (SCOPUS): 56237276500

**YU Xinshan**, Research Engineer of Institute of Advanced Manufacturing Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Institute Group, Ningbo, People's Republic of China.

ORCID: 0009-0003-4899-1018

**ZHAO Kaipeng**, Research Engineer of Institute of Advanced Manufacturing Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Institute Group, Ningbo, People's Republic of China.

ORCID: 0009-0005-2149-9159

#### For citations

Petrochenko S. V., Hao Q., Yu X., Zhao K. Evaluation of the influence of laser quenching mode parameters on the quality of the surface and surface layer of machine parts (overview) // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 1 (189). P. 56–65. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-56-65.

Received September 6, 2023.

© S. V. Petrochenko, Q. Hao, X. Yu, K. Zhao