

УДК 621.785:535.211:669.15-194:669.017

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ КОЛЕСНОЙ СТАЛИ

ГУБЕНКО С. И.^{1*}, д. т. н., проф.,
НИКУЛЬЧЕНКО И. А.², асп.

^{1*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38(0562)46-61-51, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

² Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38(0562)46-61-51, e-mail: sigubenko@gmail.com

Аннотация. Постановка проблемы. Проблема повышения надежности и долговечности железнодорожных колес связана как с разработкой колес новых конструкций и сталей, так и с возможностью применения новых методов упрочнения поверхности катания. Целью работы явилось исследование влияния лазерного воздействия на структуру колесной стали для возможного локального упрочнения зоны выкружки железнодорожных колес. **Методика.** Материалами для исследований служила промышленная колесная сталь после горячей деформации и термической обработки. Лазерное облучение образцов колесной стали в режиме импульсного излучения проводили на установке ГОС-30, в режиме непрерывного излучения – на установке ЛГ-701 «Кардамон». Применяли методы исследования – оптическая микроскопия, рентгеноструктурный анализ, измерение твердости. **Результаты.** Установлено, что при лазерном воздействии можно получать различные структуры колесной стали. При режимах импульсного воздействия получают лазерно закаленные структуры типа «белых слоев», которые проявляют пластичность при нагружении. При режимах непрерывного лазерного излучения получают структуры бейнита, верхнего или нижнего, что позволит не только повысить износостойкость поверхности катания железнодорожных колес, но и снизить риск подреза гребней в процессе эксплуатации. Режимы термической и лазерной обработки определяют эффект лазерного упрочнения колесной стали. **Научная новизна.** Установлены особенности структуры колесной стали после разных видов и режимов лазерного воздействия. Определены режимы импульсного и непрерывного воздействия, позволяющие получать необходимый уровень лазерного упрочнения. **Практическая значимость.** Использование полученных результатов позволит разработать методы и режимы лазерной обработки, позволяющие упрочнять зону выкружки поверхности катания железнодорожных колес и устранить риск подреза гребней в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: колесная сталь; упрочнение; лазерное воздействие; пластичность

ВПЛИВ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ КОЛІСНОЇ СТАЛІ

ГУБЕНКО С. І.^{1*}, д. т. н., проф.,
НИКУЛЬЧЕНКО І. О.², асп.

^{1*} Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38(0562)46-61-51, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

² Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38(0562)46-61-51, e-mail: sigubenko@gmail.com

Анотація. Постановка проблеми. Проблема підвищення надійності та довговічності залізничних коліс пов'язана як із розробленням нових конструкцій і сталей, так і з можливістю застосування нових методів зміцнення поверхні ковзання. Метою роботи було дослідження впливу лазерної дії на структуру колісної сталі для можливого локального зміцнення зони викружки залізничних коліс. **Методика.** Матеріалами для досліджень служила промислова колісна сталь після гарячої деформації та термічної обробки. Лазерну обробку зразків колісної сталі в режимі імпульсного випромінювання проводили на установці ДОС-30М, в режимі безперервного опромінювання – на установці ЛГ-701 «Кардамон». Застосовували методи дослідження – оптична мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз, вимірювання твердості. **Результати.** Встановлено, що за лазерного впливу можна отримати різні структури колісної сталі. При режимах імпульсної дії утворюються лазерно загартовані структури типу «білих шарів», які проявляють пластичність під час навантаження. При режимах безперервної лазерної дії формуються структури верхнього або нижнього бейніту, що дозволяє не тільки підвищити зносостійкість поверхні ковзання залізничних коліс, а й знизити ризики підрізу гребенів під час експлуатації. Режимми термічної та лазерної обробки визначають ефект лазерного зміцнення колісної сталі. **Наукова новизна.** Встановлено особливості структури колісної сталі після різних видів та режимів лазерної дії. Визначено режими імпульсної та безперервної дії, які дозволяють отримати необхідний рівень лазерного зміцнення. **Практична значимість.** Використання отриманих результатів дозволить розробити методи і режими лазерної обробки, що дозволяють зміцнити зону викружки поверхні ковзання залізничних коліс та зняти ризики підрізу гребенів під час експлуатації.

Ключові слова: колісна сталь; зміцнення; лазерна дія; пластичність

INFLUENCE OF LASER TREATMENT ON THE STRUCTURE OF WHEEL STEEL

GUBENKO S.I.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
NIKULCHENKO I.O.², *post graduate*

^{1*} Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562)46-61-51, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5427-1154

² Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38(0562)46-61-51, e-mail: sigubenko@gmail.com

Abstract. Formulation of the problem. The problem of rise of reliability and service life of railway wheels connects not only with elaborate of new constructions of wheels and new steels but also with possibility to use the new methods of strengthening of tread. The goal of work was investigation of influence of laser action on the structure of wheel steel for the possible local strengthening of the zone of cove of railway wheels. **Methods.** Materials for the study was manufactured wheel steel after hot deformation and heat treatment. Laser pulse radiation processing of wheel steel specimens carried out on installations SES-30M, laser continuous radiation processing of wheel steel specimens carried out on installations LG “Kardamon”. We used research methods - optical microscopy, X-ray, measurement of hardness. **Results.** It was found that under laser action it is possible to form different structures of wheel steel. Under pulse radiation the laser quenched structures with the type of “white layers” are formed which can to be plasticity under loading. Under continuous radiation the structures of upper and lower bainite are formed which allow not only to rise wear resistance of railway wheels tread but also to reduction of risk of undercut of crests in the time of service. The regimes of heat treatment and laser treatment determine effect of laser strengthening of wheel steel. **Scientific novelty.** The peculiarities of the structure of wheel steel after different types and regimes of laser treatment was founded. The regimes of laser pulse radiation and laser continuous radiation permitting to receive necessary level of laser strengthening were determined. **Practical significance.** Using the results obtained enable to develop methods and regimes of laser treatment allowing to strength the zone of cove of railway wheels tread and to reduction of risk of undercut of crests in the time of service.

Keywords: wheel steel; hardening; laser treatment; plasticity

Введение

В колесе при эксплуатации возникают различного рода повреждения: износ поверхности катания (изменение профиля поверхности обода по кругу катания), дефекты теплового воздействия (ползуны, навары, тормозные выщербины, термические трещины), усталостное выкрашивание, хрупкие трещины. Комплексный подход к механизму изнашивания железнодорожных колес включает изучение структурных изменений, происходящих в поверхностных слоях, и анализ частиц износа [1–3]. Проблема повышения надежности и долговечности железнодорожных колес связана как с разработкой колес новых конструкций, новых составов колесной стали, так и с возможностью применения новых методов упрочнения поверхности катания.

Целью настоящей работы явилось исследование влияния лазерного воздействия на структуру колесной стали для возможного локального упрочнения зоны выкружки железнодорожных колес.

Материалы и методы исследования

Лазерное облучение образцов колесной стали в режиме импульсного излучения проводили на установке ГОС-30 (энергия импульса 10.0, 12.0, 13.5, 15.0, 18.0, 25.0 Дж, скорости нагрева и охлаждения составляли соответственно

10^5 и 10^6 °C/с, время воздействия импульса 10^{-3} с); в режиме непрерывного излучения – на установке ЛГ-701 «Кардамон» (мощность излучения составляла 600 Вт, скорость перемещения лазерного луча – 20, 15, 10 и 5 мм/с). Часть образцов колесной стали подвергали предварительной термической обработке в лабораторных условиях по следующим режимам: температуры нагрева под закалку – 800, 850, 900, 950 °C, выдержка 20 мин, охлаждение в воде со скоростью 10 °C/с, которая соответствует скорости закалки ободьев в условиях производства железнодорожных колес на ОАО «Интерпайп НТЗ». Для каждого режима закалки проводили отпуск в течение 2 ч при температурах 400, 480, 520, 560, 600 °C.

Исследования выполнены на колесной стали следующего химического состава: 0,59 C; 0,72 Mn; 0,34 Si; 0,025 S; 0,012 P; 0,14 Cr; 0,15 Ni; 0,20 Cu. Микроструктуру образцов изучали с помощью оптической и электронной микроскопии, проводили рентгеноструктурные исследования. Замеряли твердость и микротвердость образцов.

Результаты и их обсуждение

Железнодорожные колеса подвергаются термической обработке – закалке с отпуском, однако их износостойкость не всегда удовлетворительна. Кроме того, важной проблемой являются подрезы гребней при эксплуатации, что опасно при движении поездов. Поэтому

представляется целесообразным дополнительное упрочняющее воздействие на зону выкружки с помощью лазерной обработки.

Микроструктура стали после обычной закалки представляла собой перлит разной степени дисперсности. После отпуска при температурах 400, 480 и 520 °С получили отпущенный троостит и дисперсные карбиды, при более высоких температурах – сорбит отпуска и карбиды, причем после отпуска при 600 °С структура стали значительно грубее при всех температурах закалки.

Структура отпущенной стали наследует закономерности, связанные с разной температурой закалки. Лазерную обработку отпущенной стали можно рассматривать как попытку дополнительно повысить ее износостойкость. Для лазерного воздействия характерно аномальное ускорение массопереноса [4], а также неравномерное распределение температуры [5–13].

Исследование структуры зоны лазерной закалки в режиме импульсного воздействия показало, что на поверхности образцов, не подвергнутых предварительному термическому упрочнению, получается слой бесструктурного мартенсита или гартенита, для которого характерны значительные

термические и структурные напряжения, способствующие упрочнению стали.

К особенностям данных лазерных структур в колесной стали, полученных при всех значениях энергии импульса, следует отнести отсутствие зоны термического влияния. Следует отметить, что в структуре лазерно закаленного слоя присутствует некоторое количество избыточного феррита, либо не растворившегося при ускоренном нагреве, либо выделившегося в местах пониженного содержания углерода в микрохимически неоднородном аустените. Чаще этот феррит находится в зоне лазерной закалки, прилегающей к основной структуре стали.

Двухфазная лазерно закаленная структура наблюдалась при энергии импульса 10...13,5 Дж, при более высоких значениях энергии лазерного импульса 15...25 Дж структура лазерно закаленного слоя была однофазной. Рентгеноструктурный анализ выявил некоторое количество аустенита остаточного (5...15 %). Для рентгенограмм, снятых после лазерной закалки, характерно размытие мартенситных рентгеновских линий и физическое уширение аустенитных линий по сравнению с обычной закалкой.

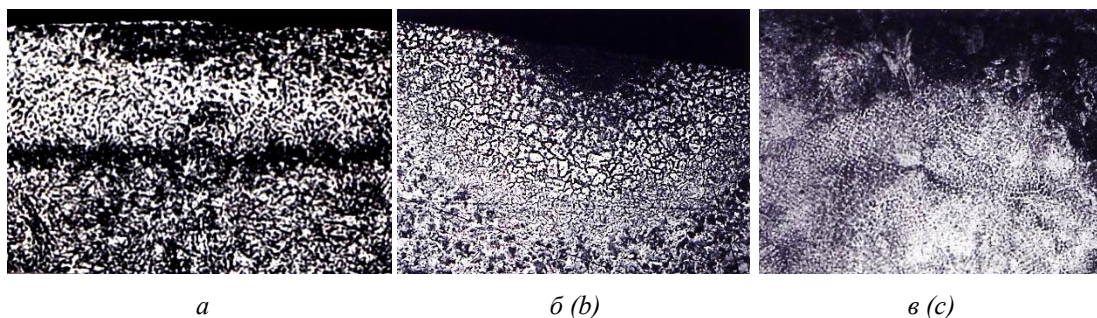


Рис. 1. Микроструктура колесной стали после лазерной обработки в режиме импульсного (а) и непрерывного (б, в) воздействия: а, б – $\times 200$, в – $\times 500$ / Fig.1. Microstructure of wheel steel after laser treatment under pulse (a) and continuous action: a, b – $\times 200$, c – $\times 500$

На первый взгляд, структура лазерно закаленного слоя идентична «белым слоям», образующимся при эксплуатации на поверхности катания [1; 2]. Такие структуры неблагоприятны с точки зрения эксплуатации. Однако представляет интерес сравнить свойства лазерных «белых слоев» с таковыми структурами, образующимися при эксплуатации. При импульсной лазерной обработке колесной стали, подвергнутой предварительному термическому упрочнению, на поверхности образцов получался закаленный слой с дисперсной бейнитной структурой (рис. 1 б), которая является благоприятной для структуры ободьев железнодорожных колес.

Влияние термического упрочнения на характер структуры лазерной закалки проявляется, по-видимому, вследствие измельчения структуры стали как на микроуровне, так и на уровне тонкой структуры, повышения степени микрохимической однородности, что влияет на механизм и кинетику

скоростного распада аустенита. Этот вопрос нуждается в дополнительных исследованиях.

Изменение микротвердости стали по глубине зоны лазерного воздействия приведено в таблице 1. Очевидно, что уровень упрочнения и глубина зоны упрочнения стали определяются энергией лазерного импульса. Чем сильнее воздействие, т. е. чем выше энергия импульса, тем больше среднее значение микротвердости стали и больше глубина упрочненного слоя.

Параметры тонкой структуры лазерно закаленной зоны при импульсном воздействии приведены в таблице 2. Анализируя эти данные, можно утверждать, что упрочнение стали при импульсном лазерном воздействии определяется несколькими факторами в условиях скоростного протекания фазовых превращений, реализации массопереноса, генерирования и перемещения точечных и линейных дефектов, развития микропластических сдвигов. Все это приводит к получению в гиперравновесных

условиях ультрадисперсного мартенсита с характерными признаками сильноупрочненной структуры (высокая плотность дислокаций, значительные микроискажения в решетке, дробление блоков мозаики). Очевидно, что при всех режимах импульсного лазерного воздействия получены значения твердости и микротвердости колесной

стали, значительно превышающие предельно допустимые значения твердости поверхности катания 350 НВ. Изменение энергии импульса позволяет варьировать параметры микро- и тонкой структуры стали, а значит получать разные значения твердости поверхности катания.

Таблица 1

Микротвердость $H_{\mu} \times 10$, МПа по глубине зоны лазерной закалки / Microhardness $H_{\mu} \times 10$, МПа the depth of zone of laser hardening

Исходное сост., энергия лазерного импульса, Дж	Расстояние от поверхности образца, мкм							
	0	100	200	250	350	420	500	600
Гор./деф., 12,0	475	470	280	275	270	275	270	270
Гор./деф., 25,0	660	650	620	490	480	480	470	270
Зак. + отп., 12,0	404	400	300	300	290	290	290	290
Зак. + отп., 25,0	420	410	400	400	400	380	380	300

Таблица 2

Влияние энергии лазерного импульса на параметры микро- и тонкой структуры стали, микротвердость и твердость / The influence of laser pulse energy on the parameters of the micro and fine structure of steel, microhardness and hardness

Характеристика	Исход. состояние	Энергия лазерного импульса, Дж					
		25	18	15	13,5	12	10
Глубина зак. слоя	–	300...500	250...420	200...400	80...100	50...80	40...60
$H_{\mu} \times 10$, МПа	270	660	622	548	490	462	442
Доля феррита, % об	30	5	7	8	30	30	30
Кол. $A_{ост}$	–	15	12	8	5	5	5
$a \times 10^5$, см	3,5	0,35	0,49	0,61	0,92	1,03	1,26
$\Delta a/a$	Нач. отсчета	0,36	0,32	0,32	0,28	0,24	0,24
Плотность дислок., ρ_{\perp} , см ⁻²	$2,6 \cdot 10^8$	$0,9 \cdot 10^{11}$	$0,2 \cdot 10^{11}$	$0,82 \cdot 10^{10}$	$0,71 \cdot 10^{10}$	$0,53 \cdot 10^{10}$	$0,26 \cdot 10^{10}$
Твердость, НВ	270	670	620	552	495	474	438

Микроструктура зоны лазерной обработки стали в режиме непрерывного действия, предварительно закаленной и отпущенной, представляет дисперсный мартенсит или бейнит плюс остаточный аустенит и дисперсный цементит (рис. 1 б, в). Характер основной структуры определяется скоростью перемещения лазерного луча: при 20 мм/с, когда скорость охлаждения стали максимальна, получили мартенсит, при остальных режимах лазерной обработки – бейнит. Отличаются также параметры зоны лазерной обработки в зависимости от температур предварительной закалки и отпуска, а также скорости перемещения лазерного луча.

Наиболее дисперсной получилась структура лазерной обработки при температуре предварительного отпуска 400, 480 и 520 °С при всех температурах закалки, поскольку, по-видимому, накладывается суммарный эффект диспергирования структуры при увеличении количества обработок. Дисперсность структуры лазерной закалки отпущенной стали возросла по сравнению с

закаленным состоянием, однако разница степеней дисперсности структуры, существовавшая в исходном состоянии в зависимости от температуры закалки, сохраняется после лазерной обработки.

Глубина зоны лазерной закалки h больше по сравнению с нормализованной сталью, но ниже по сравнению с закаленной сталью при прочих равных условиях. По-видимому, здесь проявляется влияние ориентированности закаленной структуры, позволяющей более глубоко проникать процессу лазерной закалки.

При отпуске ориентированность структуры нарушается и величина h снижается по сравнению с исходным закаленным состоянием. Здесь также видно влияние степени дисперсности исходной структуры: величина h резко снижается при повышении температуры отпуска. Уровень микротвердости на поверхности образца также определяется исходной закаленной и отпущенной структурой стали при одинаковой скорости перемещения лазерного луча. При температурах отпуска 400, 480 и 520 °С уровень микротвердости

стали лежить нижче, ніж у закаленого стану (табл. 3).

При підвищенні температури попереднього відпуску до 600 °С мікротвердість зони лазерної заправки зменшується при всіх температурах попередньої заправки, вплив якої на значення мікротвердість при всіх температурах відпуску збереглося. Чим вище дисперсність структури сталі, зв'язана з режимом

предварительной термической обработки, тем выше уровень микротвердости структуры лазерной заправки.

Параметры тонкой структуры стали в зоне лазерного воздействия также зависят от режима предварительного отпуски, который привел к снижению микронапряжений и плотности дислокаций в исходном отпущенном состоянии по сравнению с закаленным состоянием (табл. 4).

Таблиця 3

Изменение микротвердости ($\times 10$, МПа) зоны лазерной заправки в зависимости от температуры и предварительной заправки / The change of microhardness ($\times 10$ MPa) zone of laser tempering depending on the temperature and pre-school

Температура отпуски, °С	Температура заправки, °С			
	800	850	900	950
400	460	440	420	410
480	440	440	410	400
520	430	415	390	400
560	425	400	390	380
600	390	380	370	370

Таблиця 4

Параметры зоны лазерной обработки колесной стали / The parameters of the zone of laser processing of steel wheel

Температуры заправки и отпуски, °С	Скорость перемещения лазерного луча, мм/мин	Размер блоков, 10^5 , см	Микроискажения $\Delta a/a$	Плотность дислокаций ρ_{Δ} , см ⁻²
800, 400	–	0,31 (исх)	0,34 (исх)	$4,7 \cdot 10^{10}$ (исх)
	20	0,31	0,38	$6,3 \cdot 10^{11}$
	15	1,82	0,37	$3,6 \cdot 10^{11}$
	5	0,33	0,36	$2,3 \cdot 10^{11}$
800, 560	–	2,04 (исх)	0,30 (исх)	$2,1 \cdot 10^9$ (исх)
	15	0,41	0,36	$1,8 \cdot 10^{11}$
	5	0,48	0,34	$9,3 \cdot 10^{10}$
850, 400	–	1,91 (исх)	0,32 (исх)	$3,9 \cdot 10^{10}$ (исх)
	15	0,36	0,38	$2,4 \cdot 10^{11}$
	5	0,39	0,36	$2,3 \cdot 10^{11}$
850, 600	–	2,08 (исх)	0,27 (исх)	$2,1 \cdot 10^9$ (исх)
	15	0,79	0,33	$1,1 \cdot 10^{11}$
	5	0,82	0,30	$1,3 \cdot 10^{10}$
900, 480	–	1,92 (исх)	0,33 (исх)	$3,1 \cdot 10^{10}$ (исх)
	15	0,39	0,39	$6,3 \cdot 10^{11}$
	5	0,41	0,36	$2,6 \cdot 10^{11}$
900, 560	–	2,12 (исх)	0,30 (исх)	$1,9 \cdot 10^{10}$ (исх)
	20	0,61	0,36	$2,9 \cdot 10^{11}$
	10	0,79	0,33	$9,8 \cdot 10^{10}$
	5	0,84	0,32	$9,1 \cdot 10^{10}$
950, 560	–	2,46 (исх)	0,28 (исх)	$1,1 \cdot 10^{10}$ (исх)
	5	1,39	0,31	$0,8 \cdot 10^{11}$

Для каждой скорости перемещения лазерного луча для температур отпуска 400, 480 и 520 °С размеры блоков мозаики в зоне лазерного упрочнения остаются примерно на одном уровне, который несколько выше, чем у предварительно закаленных образцов. Релаксация напряжений в процессе отпуска привела к снижению уровня фрагментации структуры стали в зоне лазерного воздействия по сравнению с закаленным состоянием, что особенно заметно после высоких температур отпуска 560 и 600 °С. Чем более фрагментированной была исходная отпущенная структура, тем меньше размер блоков после лазерной обработки.

Анализ влияния скорости движения лазерного луча на параметры зоны лазерной обработки отпущенной стали позволил установить, что с увеличением скорости движения луча, т. е. с уменьшением времени лазерного воздействия, глубина упрочненной зоны уменьшается при всех режимах отпуска. По сравнению с закаленным состоянием, глубина упрочненной зоны отпущенной стали меньше при всех режимах отпуска, что связано с ориентационным влиянием исходной структуры закаленной стали и отсутствием такового в отпущенной стали.

При всех температурах отпуска наименее глубокий слой лазерного упрочнения получился при температуре предварительной закалки 950 °С. При всех температурах закалки глубина упрочненного слоя при температурах отпуска 400, 480 и 520 °С находится примерно на одном уровне, несколько снижается при 560 °С и значительно уменьшается при 600 °С, что опять же определяется ориентационным и напряженным влиянием исходной структуры стали.

Микротвердость и твердость упрочненного лазерной обработкой слоя при всех температурах отпуска с увеличением скорости движения лазерного луча возрастает, что связано с увеличением внутренних напряжений и плотности дефектов кристаллического строения. Влияние температур предварительных закалки и отпуска влияет на уровень лазерного упрочнения. При всех скоростях перемещения лазерного луча микротвердость закаленной стали выше, чем отпущенной.

Закономерности изменения параметров тонкой структуры отпущенной стали после лазерной обработки заключаются в том, что при всех температурах отпуска с увеличением скорости перемещения луча блоки мозаики становятся мельче, а микроискажения в решетке возрастают, возрастает и плотность дислокаций. Уровень микротвердости в зоне термического влияния ниже, чем в зоне

лазерной закалки, но выше, чем в исходном состоянии, что и объясняется дополнительными напряжениями, возникшими при лазерной обработке.

Для отпущенной стали микротвердость от поверхности снижается плавно в пределах зон лазерной закалки и термического влияния, скачки на кривых появляются при переходе от светлой зоны лазерной закалки к зоне термического влияния ввиду наличия резкой границы между этими зонами. При одних и тех же скоростях перемещения лазерного луча и температуре предварительной закалки повышение температуры отпуска от 480 до 600 °С привело к падению значений микротвердости во всех зонах.

При одинаковой предварительной термической обработке увеличение скорости движения лазерного луча привело к увеличению микротвердости и уменьшению глубины упрочненной зоны. При одинаковых температуре отпуска и скорости перемещения лазерного луча повышение температуры предварительной закалки привело к уменьшению и микротвердости, и глубины упрочненного слоя.

Выводы

Исследование структурных изменений в зоне лазерной обработки колесной стали показали возможность варьирования характера и параметров структуры лазерной закалки.

При режимах импульсного воздействия получают лазерно закаленные структуры типа «белых слоев», которые проявляют пластичность при нагружении, что может привести к эффекту приспособляемости и пластической релаксации напряжений.

При режимах непрерывного лазерного излучения получают структуры бейнита, верхнего или нижнего, что позволит не только повысить износостойкость поверхности катания железнодорожных колес, но и снизить риск подреза гребней в процессе эксплуатации.

Режимы термической и лазерной обработки определяют эффект лазерного упрочнения колесной стали. При лазерной обработке в режиме импульсного воздействия предпочтительней использовать режимы с энергией импульса 15...25 Дж, при непрерывном воздействии перспективным является режим с мощностью лазерного луча 600 Вт и скоростями его перемещения 5...20 мм/с, особенно в сочетании с традиционной термической обработкой.

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений : монография / С. И. Губенко. – Днепропетровск : НметАУ, ИЦ «Системные технологии», 2014. – 301с. – Режим доступа: <https://nmetau.edu.ua/ru/mdiv/i2001/p110>

2. Губенко С. И. Неметаллические включения и прочность сталей. Физические основы прочности сталей : монография / С. И. Губенко. – Германия, Саарбрюкен (Saarbrücken) : LAP LAMBERT. – Palmarium academic publishing, 2015. – 476 с. – Режим доступа: <https://www.lap-publishing.com/site/imprint-privacy-policy/13>
3. Деформация металлических материалов : монография / [С. И. Губенко, В. В. Парусов]. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2006. – 316 с. – Режим доступа: <http://www.art-press.com.ua/home>
4. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов : монография / [П. А. Леонтьев, Н. Т. Чеканов, М. Г. Хан]. – Москва : Металлургия, 1986. – 142 с. – Режим доступа: <http://www.metallurgy-publishers.net>
5. Денисенко О. І. Формування поля температур тонкої стрічки під впливом на її поверхню дисперсної фази двофазного струменя / О. І. Денисенко, В. І. Цоцко, І. М. Спиридонова, Б. Г. Пелешенко // Фізика і хімія твердого тіла. – Т. 9. – № 4. – 2008. – С. 901–904. – Режим доступу: http://www.nbuu.gov.ua/old_jrn/natural/phkhtt/2008_1_4/0904-42.pdf
6. Денисенко О. І. Розподіл температури одновимірного зразка в умовах місцевої термообробки / О. І. Денисенко, В. І. Цоцко, І. М. Спиридонова, Б. Г. Пелешенко // Фізика і хімія твердого тіла. – Т. 9. – № 1. – 2008. – С. 181–184. – Режим доступу: http://www.nbuu.gov.ua/old_jrn/Natural/phkhtt/2008_1_4/0901-29.pdf
7. Цоцко В. И. Температурные характеристики поверхностного слоя низкоуглеродистых сталей в условиях линейного нагрева поверхности / В. И. Цоцко, А. И. Денисенко // Вісник Дніпропетровського національного університету. – 2004. – № 2. – С. 72–77. – Режим доступа : http://irbis-nbuu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuu/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN1&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=njuu_dstu&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=I&S21COLORTERMS=0&S21STR=%D0%9672605%2F2004%2F3
8. Цоцко В. И. Аналитическое моделирование поля температур одномерного образца в условиях местной термоциклирующей обработки / В. И. Цоцко, И. М. Спиридонова, Б. И. Пелешенко, А. И. Денисенко // Сучасні проблеми металургії. – Том 10. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2007. – С. 170–178. – Режим доступа : http://www.nbuu.gov.ua/old_jrn/natural/Spm/2007_10/15.pdf
9. Цоцко В. И. Аналитическое моделирование температурного поля одномерного образца в условиях местной термообработки / В. И. Цоцко, И. М. Спиридонова, Б. И. Пелешенко, А. И. Денисенко // Системные технологии. – Вып. 3 (56). – Т. 2. – Днепропетровск, 2008. – С. 22–29. – Режим доступа : http://st.nmetau.edu.ua/journals/56/29_a_ru.pdf
10. Цоцко В. И. Нестационарное поле температур в металле в условиях импульсного энергетического воздействия / В. И. Цоцко, Б. И. Пелешенко, А. И. Денисенко // Высокоэнергетическая обработка материалов. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2009. – С. 202–208. – Режим доступа : http://info.donntu.org/el_izdan/geolog/news/35_2010-01-11_9-06-22/fistech09.pdf
11. Структура и свойства сплавов обработанных излучением лазера : монография / [М. А. Криштал, А. А. Жуков, А. Н. Кокора]. – Москва : Металлургия, 1973. – 192 с. – Режим доступа : <http://www.metallurgy-publishers.net>
12. Лазерная и электроннолучевая обработка материалов : справочник // Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. – Москва : Машиностроение, 1985. – 496с. – Режим доступа : <http://www.mashin.ru>
13. Упрочнение деталей лучом лазера : монография / [В. С. Коваленко, Л. Ф. Головки, Г. В. Меркулов, А. И. Стрижак]. – Киев : Техника, 1981. – 131 с. – Режим доступа : <http://kiev.glo.ua/marketing/tehnika-spezializirovannoe-izdatelstvo-gp.html>

REFERENCES

1. Gubenko S.I. *Phisica pazrushenia stalej vblizi nemetallicheskih vkluchenij* [Physics of fracture of steels near non-metallic inclusions]. Dnipropetrovsk : NMetAU, System technologies, 2014, 301 p. (in Russian)
2. Gubenko S.I. *Nemetallicheskie vkluchenia I prochnost stalej. Fizicheskie osnovi prochnosti stalej*. [Non-metallic inclusions and strength of steel. Physical bases of strength of steel]. Germany, Saarbrücken, LAP LAMBERT, Palmarium academic publishing, 2015, 476 p. (in Russian)
3. Gubenko S.I. and Parusov V.V. *Defformatsia metallichskih materialov* [Deformation of metal materials]. Dnipropetrovsk : ART-PRESS, 2006, 316 p. (in Russian)
4. Leontjev P.A., Chekanov N.T. and Han M.G. *Lazernaja poverhnostnaja obrabotka metallov i splavov* [Laser surface treatment of metals and alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1986, 142 p. (in Russian)
5. Denisenko A.I., Tsotsko V.I., Spiridonova I.M. and Peleshenko B.G. *Formuvannia polia temperature tonkoi strichki pid vplyvom na ii poverhnu dispersnoi fazi dvofaznogo strumenia* [Formation of temperature field of the thin strip under the influence of the surface of the dispersed phase two-phase stream]. *Fizika i himija tverdogo tila* [Physics and Chemistry of Solid State]. 2008, vol. 9, no. 4, pp. 901–904. (in Ukrainian)
6. Denisenko A.I., Tsotsko V.I., Spiridonova I.M. and Peleshenko B.G. *Rozpodil tempetaruti odnovimirnogo zrazka v umovah mistsevoi termoobrobki* [Temperature distribution of the one-dimensional sample in terms of local heat treatment]. *Fizika i himija tverdogo tila* [Physics and Chemistry of Solid State]. 2008, vol. 9, no. 1, pp. 181–184. (in Ukrainian)
7. Tsotsko V.I. and Denisenko A.I. *Temperaturnie harakteristiki poverhnostnogo sloja nizkouglerodistih stalej v uslovijah lineinogo nagreva poverhnosti* [Temperature characteristics of the surface layer of low-carbon steels in terms of a linear surface heating]. *Visnik Dnepropetrovskogo nacionalnogo universiteta* [Messenger of Dnepropetrovsk national university]. 2004, no. 2, pp. 72–77. (in Russian)
8. Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., Peleshenko B.G. and Denisenko A.I. *Analiticheskoe modelirovanie polja temperature odnomernogo obraztsa v uslovijah mestnoj termotsikliruushej obrabotki* [Analytical modeling of temperature field in one-dimensional sample of the local thermo-cycling processing]. *Suchasni problem metalurgii* [Modern problems of metallurgy]. Dnipropetrovsk : Sistemniye Tekhnologii Publ., 2007, vol. 10, pp. 170–178. (in Russian)
9. Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., Peleshenko B.G. and Denisenko A.I. *Analiticheskoye modelirovaniye polja temperatury odnomernogo obraztsa v uslovijah mestnoj termotsikliruushej obrabotki* [Analytical modeling of temperature field in one-dimensional sample of the local thermo-cycling processing]. *Siustemnie tehnologii* [System technologies]. Dnipropetrovsk, 2008, iss. 3 (56), vol. 2, pp. 22–29. (in Russian)
10. Tsotsko V.I., Peleshenko B.G. and Denisenko A.I. *Nestatsionarnoe pole temperature v metalle v uslovijah impulsnogo energeticheskogo vozdeistvija* [Steady temperature field in the metal under the conditions of pulsed energy impact].

Vysokoenergeticheskaia obrabotka materialov [High-energy treatment of materials]. Dnipropetrovsk : ART-PRESS, 2009, pp. 202–208. (in Russian)

11. Kryshchal M.A., Zhukov A.A. and Kokora A.H. *Struktura i svoystva cplavov obrabotannih izlucheniem lasera* [Structure and properties of alloys treating with laser beam]. Moscow : Metallurgy Publ., 1973, 192 p. (in Russian)

12. Rykalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V. and Kokora A.N. *Lazernaja i elektronoluchevaja obrabotka materialov* [Laser and electron-beam treatment of materials]. Moscow : Mashinostroyeniye Publ., 1985, 496 p. (in Russian)

13. Kovalenko V.S., Golovko L.F., Merkulov G.V. and Strizhak A.I. *Uprochnenie detalij luchom lazera* [Strengthening of parts with laser beam]. Kyiv : Technics Publ., 1981, 131 p. (in Russian)

Статья рекомендована к публикации в журнале «Д-ром техн. наук, проф. В. С. Вахрушевой (Украина), д-ром техн. наук, проф. Г. Д. Сухомлиным (Украина)».

Поступила в редколлегию 05.03.2017

Принята в печать 09.03.2017

УДК 669.018: 620.176.25

ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ СТАЛИ 08Пс ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

КУЦОВА В. З.^{1*}, д. т. н., проф.,
БАЛАКИН В. Ф.², д. т. н., проф.,
СТЕЦЕНКО А. П.³, ассист., м. н. с.,
КОТОВА Т. В.⁴, к. т. н., доц.

^{1*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua

² Кафедра технологического проектирования им. В. М. Друяна, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38(0562) 47 42 49, e-mail: kaf.tp@metal.nmetau.edu.ua

³ Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38(098) 637-16-93, e-mail: ploshenko90@gmail.com

⁴ Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua

Аннотация. Постановка проблемы. Достижение высокой прочности и пластичности, необходимых для создания новых перспективных конструкционных и функциональных материалов, является одной из фундаментальных проблем материаловедения. Формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) и наноструктуры (НС) при интенсивной пластической деформации (ИПД) обеспечивает получение высокого комплекса механических свойств металлов и сплавов, в том числе и конструкционных сталей, предназначенных для изготовления тонколистового проката. Представлены результаты исследования формирования тонкой структуры и механических свойств стали 08п после горячей прокатки с последующей интенсивной пластической деформацией (ИПД) методом кручения под гидростатическим давлением (КГД) при температуре 25 °С. **Выводы.** Установлено, что твердость и модуль упругости стали 08пс после КГД изменяются по радиусу образца: от центра к периферии твердость возрастает в 2 раза, а модуль упругости снижается на 7 %. Таким образом, для стали 08пс снижение модуля упругости и сохранение пластичности после КГД гарантированно обеспечивает большую склонность к штампуемости, по сравнению с исходным горячекатаным состоянием.

Ключевые слова: наноиндентирование; модуль Юнга; интенсивная пластическая деформация (ИПД); кручение под гидростатическим давлением (КГД)

ФОРМУВАННЯ ТОНКОЇ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ГАРЯЧЕКАТАНОЇ СТАЛІ 08Пс ПІСЛЯ КОМБІНОВАНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

КУЦОВА В. З.^{1*}, д. т. н., проф.,
БАЛАКИН В. Ф.², д. т. н., проф.,
СТЕЦЕНКО Г. П.³, асист., м. н. с.,
КОТОВА Т. В.⁴, к. т. н., доц.