

© А.В. Богомолов, 2012 г.
Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова,
г. Павлодар, Республика Казахстан
e-mail: bogomolov71@mail.ru

© А.Т. Канаев, 2012 г.
Казахский аграрно-технический университет им. С.Сейфуллина
г. Астана, Республика Казахстан
e-mail: kanayeff_099@yandex.kz

ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ ГРЕБНЕЙ ЛОКОМОТИВНЫХ КОЛЕСНЫХ ПАР

Плазменная поверхностная обработка является достаточно эффективным и производительным методом упрочнения стальных деталей. При этом нагрев под закалку осуществляется высокоэнтальпийной плазменной струей, стекающей вдоль нагреваемой поверхности при встречном относительном перемещении детали. Нагретая зона охлаждается сразу при выходе из плазмы в основном за счет отвода тепла в тело массивной стальной детали и конвективную теплоотвода с поверхности в атмосферу [1].

Важную роль при плазменном нагреве играет теплопроводность материала, поскольку процесс плазменной термической обработки характеризуется подводом энергии к поверхности и распространением ее во внутренние слои металла за счет теплопроводности. При этом микрообъемы, находящиеся на разном расстоянии от поверхности, нагреваются до разных температур, причем, скорости нагрева и охлаждения этих микрообъемов тоже разные. Отсюда следует, что для управления процессом плазменной поверхностной закалки необходимо на стадии нагрева определить температурно-временные параметры в каждом микрообъеме зоны термического влияния.

На следующем этапе плазменной закалки – охлаждении – происходит распад образовавшегося аустенита, полученного в разных температурных условиях. Для решения вопроса о типе структур, возникающих в зоне термического влияния, и, следовательно, об их свойствах, необходимо определить скорости охлаждения в каждом микрообъеме, а затем сопоставить их с термокинетическими кривыми распада аустенита при определенной концентрации аустенита и максимальной температуры нагрева под закалку [2]. Следует отметить, что при плазменной закалке абсолютные значения теплового потока достигают 10^6 – 10^8 Вт/м². Термический цикл процесса, состоящий из этапа нагрева длительностью 1,0–1,2 с и этапа охлаждения 1,5–2,0 с, составляет 2,5–3,0 с.

В данной работе плазменному упрочнению подвергали гребни локомотивных колесных пар, изготовленные из стали марки 2 в соответствии с требованиями ГОСТ 398-96. Химический состав стали, % : С – 0,57–0,65; Si – 0,22–0,45; Mn – 0,60–0,90; V – до 0,15; P – не более 0,035; S – не более 0,040.

Технология предварительной термической обработки стальных колес предусматривает их закалку с последующим отпуском. При этом механические свойства термически упрочненных гребней соответствуют: предел прочности 930–1100 Н/мм², твердость не менее 269 НВ, ударная вязкость KCU = 0,25 Дж/см², твердость на гребне – не более 321 НВ. Однако в сертификате о качестве не указан режим упрочняющей термической обработки, хотя согласно технических требований ГОСТ 398-96 все температурные параметры термической обработки должны регистрироваться, поскольку об однородности и дисперсности исходной структуры можно судить на основе режима использованной термической обработки [3].

Исходная структура влияет не только на процессы структурообразования при плазменной обработке, но и на глубину упрочненного слоя. Это объясняется тем, что разные исходные структуры имеют неодинаковую теплопроводность вследствие различия внутренней межфазной и межграницной поверхности, отделяющей феррит от карбида (цементита). Металлографические исследования показывают, что в структуре бандажной стали, поступающей на плазменное упрочнение, присутствует сетка феррита, которая при исходной закаленной и отпущенной структуре не должна наблюдаться, что косвенно свидетельствует об отклонении от режима стандартной термической обработки. При резком интенсивном тепловом воздействии, имеющем место в процессе плазменной закалки, нарастание теплового потока от высокотемпературной струи к обрабатываемой поверхности должно проводиться в соответствии с теплофизическими свойствами материала [4]. Коэффициент температуропроводности стали 60 (аналог стали 2, исследованной в данной работе) при комнатной температуре составляет 0,13 см²/с и он уменьшается до 0,05 см²/с при температуре 1400 °С.

В качестве генератора высокотемпературной струи использовали электродуговой плазмотрон, работающий на защитном тазе. Зазор между срезом сопла плазмотрона и обрабатываемой поверхностью устанавливали в зависимости от мощности плазмотрона и требуемой глубины упрочнения.

Режим плазменного упрочнения характеризовался следующими параметрами:

- Сила тока – 275А.
- Напряжение электрической дуги – 120В.
- Номинальное значение мощности дуги – 35кВт.

- Расход защитного газа – 5 л/мин.
- Частота вращения колесной пары – 0,143 об./мин. (7,0–7,2 мин. за полный оборот колеса).

Упрочнению подвергалась зона перехода от рабочей поверхности к поверхности катания шириной 25–26 мм. После плазменного упрочнения был произведен микроструктурный анализ поверхностного слоя, определен химический состав всех зон по сечению, микротвердость по глубине упрочненной зоны, измерена толщина закаленного слоя на растровом электронном микроскопе JEOL ISM-5910 и оптическом микроскопе фирмы Leica Microsystems. Микротвердость материала была определена по методу Виккерса на инвертированном микроскопе фирмы Leica Microsystems при нагрузке 2,5 Н.

Распределение микротвердости по глубине закаленной зоны показывает, что микротвердость в приповерхностной слое на расстоянии 124 мкм от поверхности достигает рекордного значения и составляет 1688,2 HV. Вглубь она уменьшается до значений 1000,8 HV на глубине 921 мкм и далее до значений микротвердости 413 HV на глубине 1175,9 мкм.

Металлографические исследования упрочненных зон показали, что микроструктура стали по глубине плазменного воздействия состоит из трех зон: 1 – Зоны микроплавления (рис. 1), состоящей из неравновесной мелкодисперсной структуры, близкой к аморфной. Эта зона микроструктурно выявляется в виде белого нетравящегося слоя исключительно высокой твердости (1688,2 HV и 1589,1 HV). Зона микроплавления неравномерна по ширине обработанной поверхности: максимальная глубина центральной части составляет 921 мкм, к краю обработанной поверхности она уменьшается и составляет 148 мкм. Эти экспериментальные данные показали, что при отработке оптимального режима плазменной обработки необходимо обеспечить равномерность упрочненного слоя, как по ширине закалочной дорожки, так и по окружности гребней, а контроль равномерности осуществлять в диаметрально-противоположных направлениях.

2 – Непосредственно под белым нетравящимся (аморфизированным) слоем расположена зона плазменного воздействия, граничащая с зоной неполной закалки (между критическими точками A_3 - A_1) с микротвердостью, соответствующей микротвердости мелкоиглочатого мартенсита и троосто-мартенсита, переходящая в сорбит отпуска ближе к исходной структуре.

3 – Зона исходной структуры, представляющая мелкодисперсный сорбит отпуска с микротвердостью 400–450 HV [5].

Эти особенности микроструктуры после плазменной обработки объясняются сверхвысокими скоростями нагрева и последующего охлаждения за счет оттока теплоты в холодные слои металла, недостижимыми при традиционных методах термической обработки. Это

приводит к тому, что структурные и фазовые составляющие стали после плазменной обработки характеризуются повышенной дисперсностью и более высоким уровнем внутренних (структурных) напряжений 2 и 3 рода, а также ярко выраженной химической микронеоднородностью.

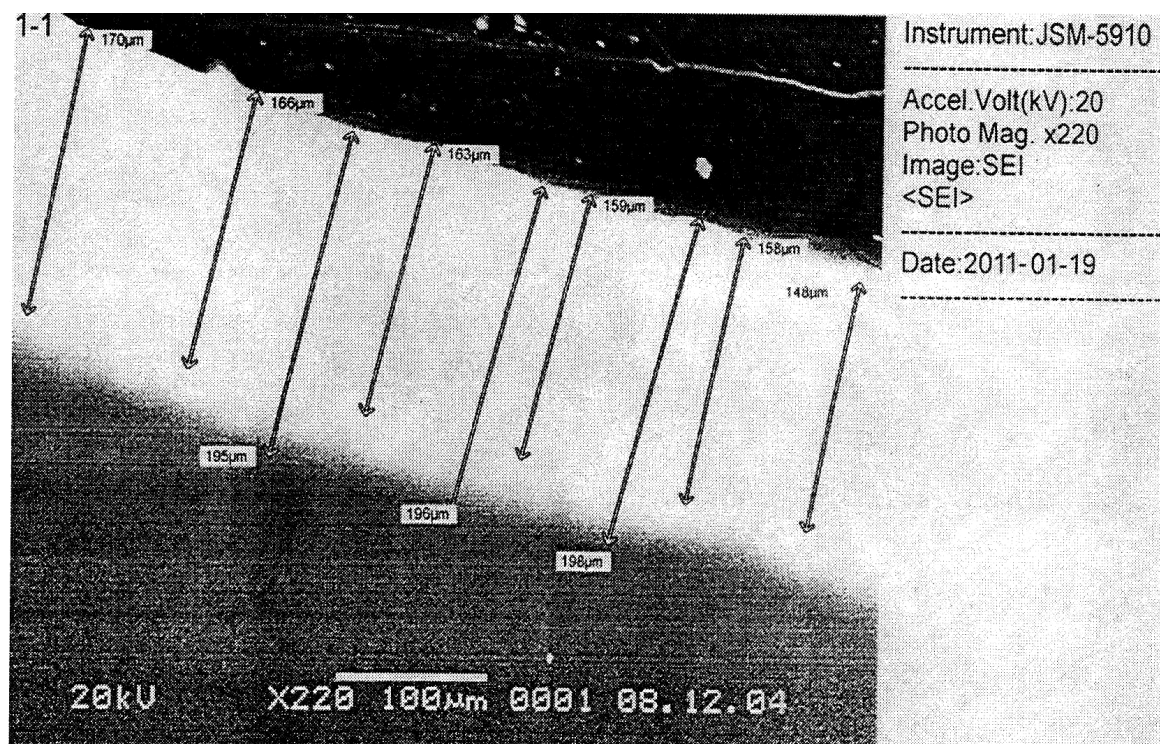


Рис. 1. Зона оплавления по ширине обработанной поверхности

Для экспериментальной проверки этих утверждений были проведены специальные исследования по определению химического состава стали с возбуждением спектра в искре на искровом спектрометре Spectrolab Jr фирмы Leica Microsystems. Данные химического анализа по глубине плазменного упрочнения и неупрочненной зоны, представленные в табл. 1, подтверждают химическую микронеоднородность структурных и фазовых составляющих исследованной стали. Как видно, содержание углерода по глубине упрочненной зоны колеблется от 0,002 до 0,06 % (ат.). Такую же микронеоднородность по глубине закаленной зоны имеют и другие постоянные примеси стали.

При термическом цикле плазменной поверхностной закалки процессы, связанные с гомогенизацией твердого раствора, не успевают завершиться в объеме отдельных зерен, и это способствует образованию метастабильных структур высокой твердости с хорошим сопротивлением износу и микросхватыванию в процессе трения.

Неоднородность и искаженность структурных и фазовых составляющих стали подтверждаются результатами мультифрактального анализа снимков упрочненной зоны и исходной структуры.

Таблица 1

Химический состав по глубине плазменного упрочнения и не упрочненной зоны

Зона по глубине	Химический состав, %(ат.)								
	C	Si	V	Mn	Fe	W	Ti	Cr	S
T2	0,060	0,002	-	0,063	0,86	0,008	-	-	-
T3	0,050	0,002	-	0,060	0,87	0,020	0,002	-	0,005
T4	0,002	-	0,001	0,065	0,87	0,009	-	0,001	0,002
T5	0,050	0,0005	0,001	0,062	0,86	0,018	0,004	-	0,002
T6	0,047	0,0035	-	0,072	0,87	-	-	0,001	-
T7	0,035	0,004	-	0,068	0,89	0,002	0,0026	-	-
T8	0,020	0,0018	0,0027	0,070	0,88	0,019	-	-	-
T9	0,027	0,003	0,0023	0,065	0,88	-	-	-	-
T10	0,030	0,004	-	0,074	0,86	0,026	-	-	-
T11	0,040	0,004	0,001	0,069	0,88	-	0,003	-	-
Основа	0,008	-	-	0,059	0,90	-	-	-	-

Из табл. 2 следует, что основа – достаточно упорядоченная неоднородная структура, возникшая, видимо, в результате предварительной термической обработки стали. Переходный слой – область, имеющая наиболее неупорядоченную и однородную структуру. Упрочненный слой – возросший параметр плотности фрактальных структур свидетельствует об образовании мультифрактальной структуры, характеризующейся неоднородностью и упорядоченностью. Структура представляет собой плотно-упакованные кластеры с фрактальными границами.

Таблица 2

Результаты мультифрактального анализа снимков поверхности

Мультифрактальные параметры	Упрочненный слой	Переходная зона	Исходная структура
Удельная энтропия, $S_{уд}$	0,05	0,05	0,05
Упорядоченность, Δ	0,143	0,082	0,115
Фрактальная размерность, D_0	1,991	1,993	1,993
Однородность, R^2	0,922	0,986	0,936
Плотность фрактальной структуры	1,391	1,368	1,349

При исходной закаленной и отпущенной структуре ферритная сетка отсутствует, и это способствует плавному переходу зоны закалки к зоне отпуска с высокодисперсной трооститно-сорбитной структурой. Анализ микроструктур показывает, что непосредственно на границе зоны плазменного упрочнения с исходной структурой дисперсного сорбитообразного перлита имеется узкая зона (0,2–0,3 мм) с пониженной твердостью и повышенной травимостью. Формирование между упрочненным слоем и сердцевинной зоны с пониженной твердостью

является важной причиной повышения трещиностойкости поверхностно упрочненных изделий. В этой зоне происходит торможение трещин, возникающих в хрупком упрочненном, плазменной закалкой, слое.

Эти экспериментальные исследования показывают, что при отработке оптимальных режимов плазменного упрочнения необходимо обеспечить плавное изменение структуры и микротвердости по глубине. Это приводит к снижению напряжений растяжения за упрочненной зоной. Формирование больших напряжений сжатия в закаленном поверхностном слое и снижение напряжений растяжения в переходной разупрочненной зоне является важным фактором повышения работоспособности изделий, работающих в условиях контактных и знакопеременных нагрузок.

Список использованных источников

1. *Селиванов М.В., Шепелев Н.С.* Применение плазмы для упрочнения поверхности за рубежом. М.: Черметинформация, 1987. Вып. 2. 42 с.
2. *Канаев А.Т., Богомолов А.В., Кусаинова К.Т., Жусин Б.Т.* Структурообразование в гребнях колесных пар при упрочнении плазменной закалкой : труды Междунар. конф. «Форсированное индустриально-инновационное развитие в металлургии». Алматы: КазНТУ, 2010. С. 139–142.
3. *Канаев А.Т., Богомолов А.В.* Плазменная закалка бандажей колесных пар / Материалы международной научно-практической конференции «Металлургия Прииртышья в реализации программы форсированного индустриально-инновационного развития «Казахстан-2020». Павлодар, 2011. С. 125–131.
4. *Канаев А.Т., Кусаинова К.Т.* Влияние плазменного упрочнения на структуру гребня колесных пар. М.: Локомотив, 2006. № 6. С. 59–63.
5. *Канаев А.Т., Богомолов А.В., Кусаинова К.Т.* Плазменное упрочнение гребней колесных пар подвижного состава : труды Междунар. науч. конференции «Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан-2030». Часть 3. Караганда: КарГТУ, 2010. С. 90–92.