

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕЙ

*Канаев А.Т., Алексеев С.В.,  
Пальчун Б.Г.*

### **Аннотация**

Шейки шпинделя тяжелого токарного станка из легированной стали 35ХНЗМФА длиной 6500 мм и гребни вагонных колес диаметром 957 мм из качественной углеродистой стали обработаны поверхностной плазменной закалкой. Обоснована возможность повышения надежности работы крупногабаритных и массивных деталей различного назначения путем плазменного упрочнения их поверхностей. Показано, что по глубине упрочнения отчетливо наблюдается образование нескольких структурных зон различной микротвердости, свидетельствующие о формировании градиентно-слоистой структуры. Подтверждено, что при сверхбыстрых скоростях нагрева, имеющих место при поверхностной плазменной закалке, фазовые и структурные превращения смещаются в область высоких температур, сильно изменяя кинетику возникновения и роста зародышей новой фазы (аустенита). При этом формируется мелкозернистый аустенит, который превращается в высокодисперсную мартенситную структуру, недостижимую при традиционных способах термической обработки.

**Ключевые слова:** шейки шпинделя, плазменное упрочнение, градиентно-слоистая структура, дуговая и струйная закалка, микротвердость, износостойкость, трещиностойкость, межпластиночное расстояние

### **Введение**

Среди обширного круга задач, стоящих перед технологами машиностроительных предприятий, одной из самых важных и сложных является научно-техническое обоснование термического упрочнения рабочих поверхностей крупногабаритных и массивных деталей различного назначения. Так, работоспособность шпинделей тяжелых токарных станков в основном определяется износостойкостью шеек и способностью противостоять усталостным разрушениям. Для получения высокой износостойкости

шеек шпинделя необходимо обеспечить после упрочнения поверхностный слой со структурой мартенсита и высокой твердостью. На практике из-за опасности появления трещин и коробления ограничиваются твердостью шеек на уровне 49-50HRC.

К цельнокатаным колесам грузовых вагонов, работающих в тяжелых условиях ударно-циклических нагрузок, предъявляются также высокие требования износостойкости и контактно-усталостной прочности.

Во время движения нагруженного вагона колеса испытывают несколько

видов нагрузок: давление рельса, соответствующее определенной части давления на ось колесной пары; динамическую нагрузку от ударов о стыки рельсов; силы трения, возникающие при качении колес по прямому участку пути; силы трения при торможении, возникающие на поверхности соприкосновения тормозной колодки с колесами; силы трения при давлении заторможенного колеса юзом.

При больших нагрузках (до 27т на оси грузовых вагонов) и высоких скоростях движения поездов тонкие поверхностные слои нагреваются до температур, превышающих критические точки  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$ . При выходе нагретого участка из зоны контакта происходит их быстрое охлаждение, что может привести к образованию сетки и разрушению поверхности катания. Разогрев поверхности происходит главным образом за счет пластической деформации поверхностного слоя, при этом порядка 75 % затраченной на пластическую деформацию энергии, превращается в тепло. Это тепло концентрируется в микрообъемах, примыкающих к поверхности сдвига. Температура в указанных объемах может превышать критические точки, что при быстром охлаждении создает условия для протекания мартенситного превращения. Образовавшийся на поверхности хрупкий мартенситный слой в процессе

эксплуатации может растрескиваться и отслаиваться [1,2].

Наиболее распространенный способ упрочняющей термической обработки - закалка - становится проблемой, когда речь идет о крупногабаритных и массивных деталях. Проблема здесь связана не только с необходимостью иметь большие энергоемкие нагревательные печи и не менее большие закалочные ванны для закалки и отпуска термообработанных деталей. Основная проблема состоит в том, что при традиционных способах упрочняющей термической обработки на крупногабаритных деталях невозможно обеспечить равномерное охлаждение и, соответственно равномерность структурно-фазовых превращений по всему объему упрочняемой детали. Это, в свою очередь, ведет к возникновению в детали остаточных термических и структурных напряжений, снижающих ее усталостные характеристики.

Для изготовления значительной части деталей машин и технологического оборудования широко используются сравнительно дешевые углеродистые стали с повышенным содержанием углерода. Эксплуатационная стойкость таких деталей в современных условиях не отвечает возрастающим требованиям производства ввиду увеличивающихся затрат на запасные части, текущий и капитальный ремонты агрегатов, связанный с их заменой.

## **Материал и методика исследований**

ВНПО «Флагман» в содружестве со специалистами промышленных

предприятий разработано и эффективно применяется на практике

оборудование и инновационные технологии поверхностной плазменной закалки крупногабаритных деталей в машиностроении: шейки шпинделя токарного станка, корпуса подшипника прокатного стана, крупномодульные шестерни, цельнокатаные колеса грузовых вагонов и др.

В данной работе приведены микроструктура и свойства шеек шпинделя тяжелого токарного станка из легированной стали 35ХНЗМФА длиной 6500 мм и гребней вагонных колес диаметром 957 мм из углеродистой стали по ГОСТ 10791-2001, обработанных поверхностной плазменной закалкой.

Исследовали твердость и глубину упрочненного слоя по сечению, микроструктуру зоны термического воздействия и основного металла. Микрошлифы для исследования микроструктуры изготавливали в плоскости, перпендикулярной упрочненной поверхности образцов и подвергали травлению в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. После травления этим реактивом упрочненный слой представляет зону интенсивной травимости переменной глубины, имеющую градиентно-слоистую структуру. Измерение микротвердости упрочненного слоя проводили на микрошлифе до травления на твердомере ПМТ-3 при нагрузке 1,962Н (200гс) в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-2006 "Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников". Твердость экспериментальных образцов определяли по Виккерсу  $HV_{0,1}$  (ГОСТ

2999-1995 )и Роквеллу  $HRC$  (ГОСТ 8.064 -1999).

Микроскопические исследования проводили на оптическом микроскопе "Neophot" при увеличениях  $\times 100-200$  на микрошлифах, вырезанных в поперечном направлении из сегмента с условием сохранения упрочненного слоя. Электронно-микроскопические исследования выполнены на просвечивающем электронном микроскопе JeolJEM 2100 при увеличении  $\times 5000$ .

В тех случаях, когда дуга горит между электродом внутри плазмотрона и обрабатываемым изделием, происходит плазменная *дуговая закалка*, однако при этом происходит микрооплавление поверхностного слоя детали и изменение ее геометрии (для тонкостенных изделий), поэтому данный метод плазменного упрочнения применим тогда, когда деталь имеет значительный припуск на последующую обработку.

В инновационных технологиях плазменной *струйной закалки* дуга горит между электродом (катодом) и соплом (анодом) плазмотрона и наружу истекает обесточенная плазменная струя, обеспечивающая меньшее тепловое воздействие на обрабатываемую деталь. При закалке без оплавления поверхности не требуется последующая механическая обработка, что позволяет использовать ее в качестве финишной операции технологического процесса на полностью готовых деталях. В качестве плазмообразующего газа в этих технологиях используется сжатый воздух или его смесь с пропаном, природным газом и др.

Следует отметить, что для обеспечения нормальных триботехнических характеристик, обеспечивающих требуемую долговечность работы деталей в узлах трения, редко требуется толщина упрочненного слоя больше чем 1,5-2,5 мм. Упрочнение конструкционных сталей на такую глубину реально достижимо при использовании различных способов поверхностной термической обработки. Среди них в современном машиностроении наиболее известны две традиционные технологии поверхностной закалки: закалка токами высокой частоты (ТВЧ) и газопламенная закалка, обеспечивающие структурные изменения в металле на глубину ~ 0,3-5,0 мм.

Заметим, что поступательное развитие научно-технического прогресса в различных сферах экономики требует широкого внедрения в промышленность новых эффективных и экономичных технологических процессов, основанных на достижениях современной науки и техники. В настоящее время широкое распространение в промышленности (особенно при упрочнении

крупногабаритных деталей) имеет поверхностная плазменная закалка [3].

При плазменной закалке конструкционных сталей и относительной скорости деталей и плазмотрона в диапазоне 20-300 мм/с получены упрочненные (закаленные) слои твердостью 43-54 HR<sub>c</sub> глубиной до 2,5 мм в виде дорожки шириной 6-12 мм при обработке деталей плазмой сжатого воздуха и шириной 12-30 мм при обработке воздушной плазмой с добавками горючих газов. Величина тепловложения, скорость нагрева и охлаждения определяются теплофизическими свойствами металла и легко поддаются регулированию за счет рабочего тока, расхода и состава плазмообразующего газа, дистанции обработки и угла наклона плазмотрона к обрабатываемой поверхности. Плазменная обработка ведется с шагом, превышающим ширину дорожки на 1,5-2,0 мм. При перекрытии обработанных зон происходит отпуск закаленной дорожки на ширину около 5 мм. В крупногабаритных и массивных деталях плазменная закалка обеспечивается за счет теплоотвода в тело обрабатываемой детали, закалка тонкостенных деталей осуществляется со спрейером.

### **Полученные результаты и их обсуждение**

На рисунках 1 и 2 приведены закалка шейки шпинделя токарного станка из легированной стали 35ХНЗМФА и микроструктура этой стали после плазменной закалки при увеличении  $\times 100$ . Заметим, что при малых увеличениях градиентно-смешанная структура не выявляется.

При воздействии плазмы на поверхность материала происходит ряд физико-химических процессов, приводящих к созданию в приповерхностном слое сложного напряженного состояния под действием градиента температур. В совокупности эти процессы способствуют к формированию в

поверхностном слое обрабатываемого материала градиентно-слоистой структуры [4].

Электронно-микроскопические исследования показывают, что по глубине упрочненного слоя наблюдается несколько смешанных зон, состоящие из целого набора структур от мартенсита до пластинчатых структур, состоящих из феррито-цементитной смеси условно называемых трооститом, сорбитом и перлитом.

Как известно, важнейшей структурной характеристикой конструкционных сталей является межпластиночное расстояние, представляющее собой усредненную сумму толщин двух соседних пластин феррита и цементита пластинчатых структур. Чем больше скорость охлаждения, тем меньше межпластиночное расстояние и тем дисперснее получающаяся феррито-карбидная смесь, тем выше микротвердость (твердость) стали.

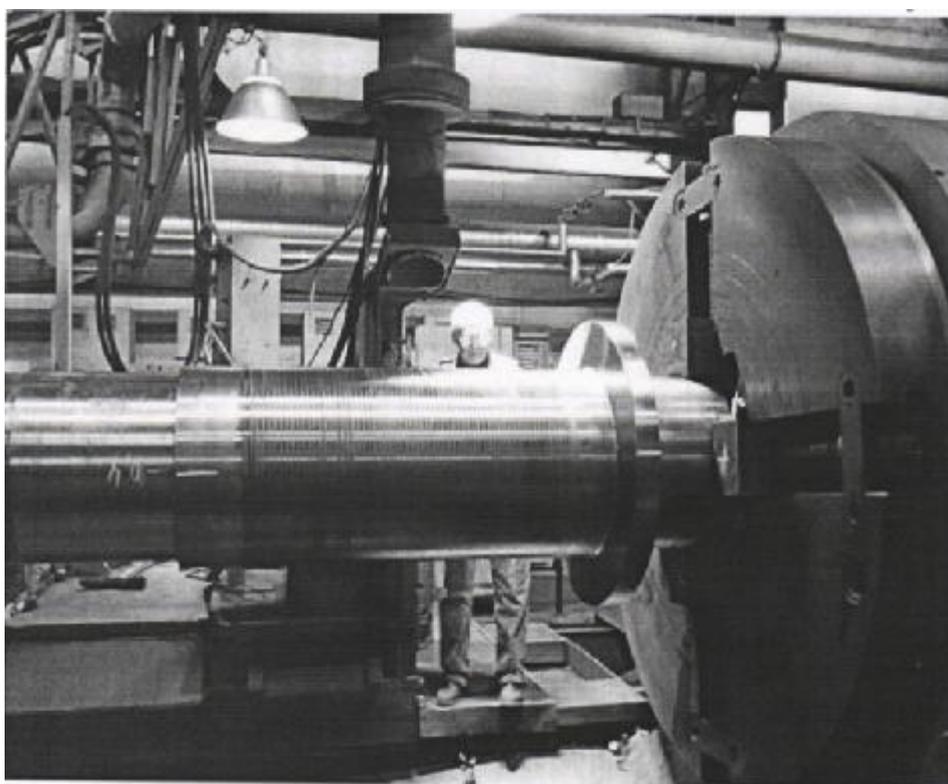


Рисунок 1 – Закалка шейки шпинделя тяжелого токарного станка

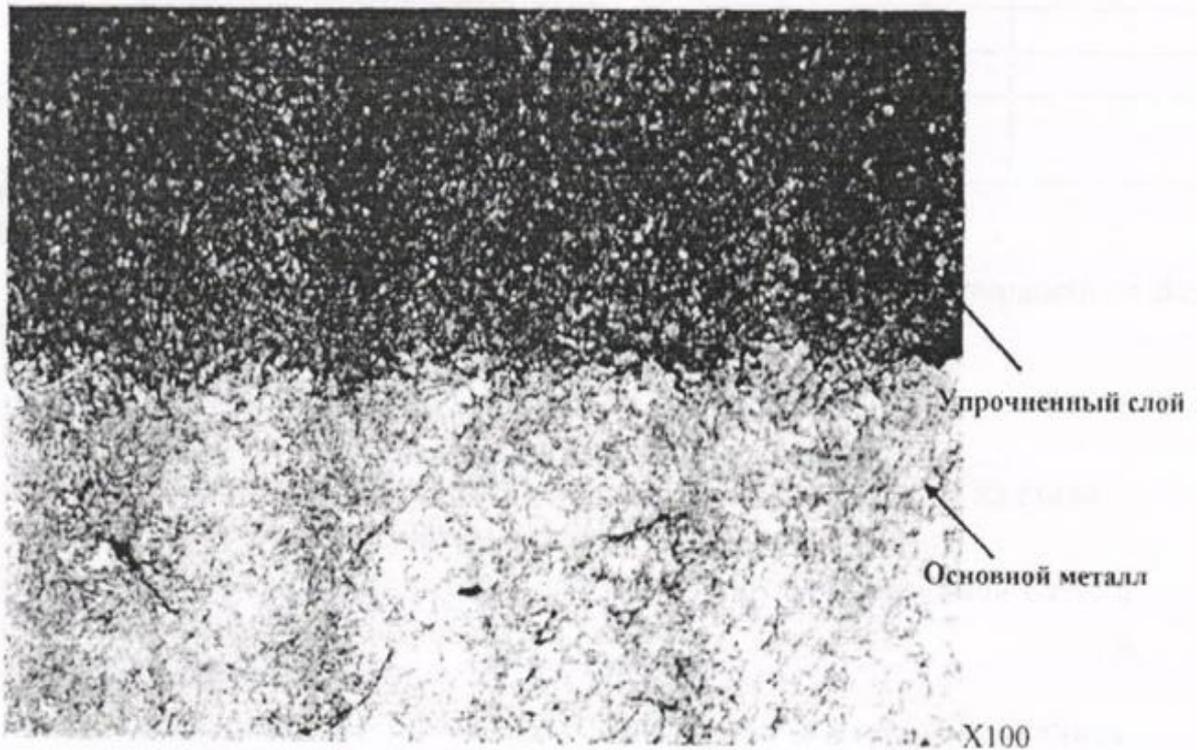
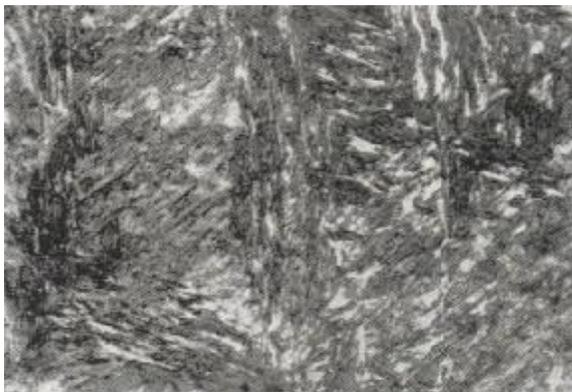


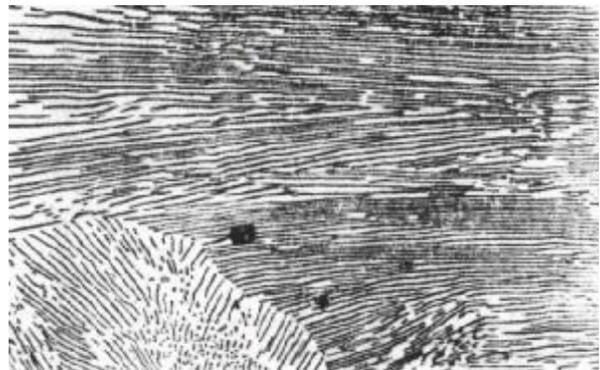
Рисунок 2- Микроструктура легированной стали 35ХНЗМФА после плазменной закалки

Двухфазное строение пластинчатых структур выявляется только под электронным микроскопом, так как их межпластиночное расстояние находится на пределе разрешающей способности оптического микроскопа

(~ 0,2 мкм). На рисунке 3 приведены структуры мартенсита, перлита при увеличении x1000, а также сорбита и троостита при увеличении x5000, снятые электронным микроскопом. Четко видно, что перлит, сорбит и троостит состоят из чередующихся пластинок феррита и цементита.



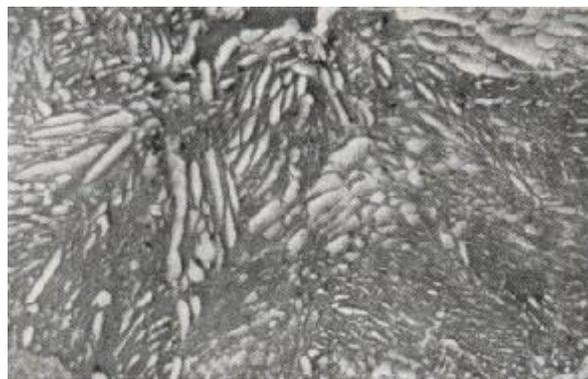
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3- Структура продуктов распада аустенита при непрерывном охлаждении (а – мартенсит, x1000); (б- перлит, x1000); (в – сорбит, x5000); (г- троостит, x5000);

Заметим, что в отличие от перлита сорбит и троостит не являются равновесными структурами, так как в реальных производственных условиях охлаждение, как правило, бывает неравновесным, и это приводит к определенному пресыщению сорбитного и трооститного феррита углеродом, что сказывается, естественно, на механических свойствах. В частности, механические свойства стали со структурами перлит, сорбит или троостит прямо пропорционально площади поверхности раздела между ферритом и цементитом. Поэтому с понижением температуры распада аустенита и соответствующим измельчением структуры (усиления степени дисперсности) ферритные пластинки несколько пересыщаются углеродом, прочностные характеристики (прочность  $-\sigma_s$ , твердость - НВ) возрастают, а пластические характеристики (относительное

удлинение -  $\delta$  и сужение  $-\psi$ ) уменьшаются [5].

Следует подчеркнуть, что при непрерывном охлаждении, имеющем место при плазменной закалке, не удастся разграничить процессы образования чистого троостита, сорбита или перлита, так как скорость изменения температуры по сечению охлаждаемого изделия не остается постоянной, она переменна и меняется по определенному закону, зависящему от теплофизических свойств стали. В действительности процессы превращения могут накладываться один на другой по температуре и времени своего развития, что ведет к формированию, как правило, смешанных структур в виде мартенсит + троостит, троостит + сорбит или сорбит + перлит.

На рисунке 4 упрочненные зоны гребня вагонного колеса с различной микроструктурой ориентировочно разделены вертикальными линиями.

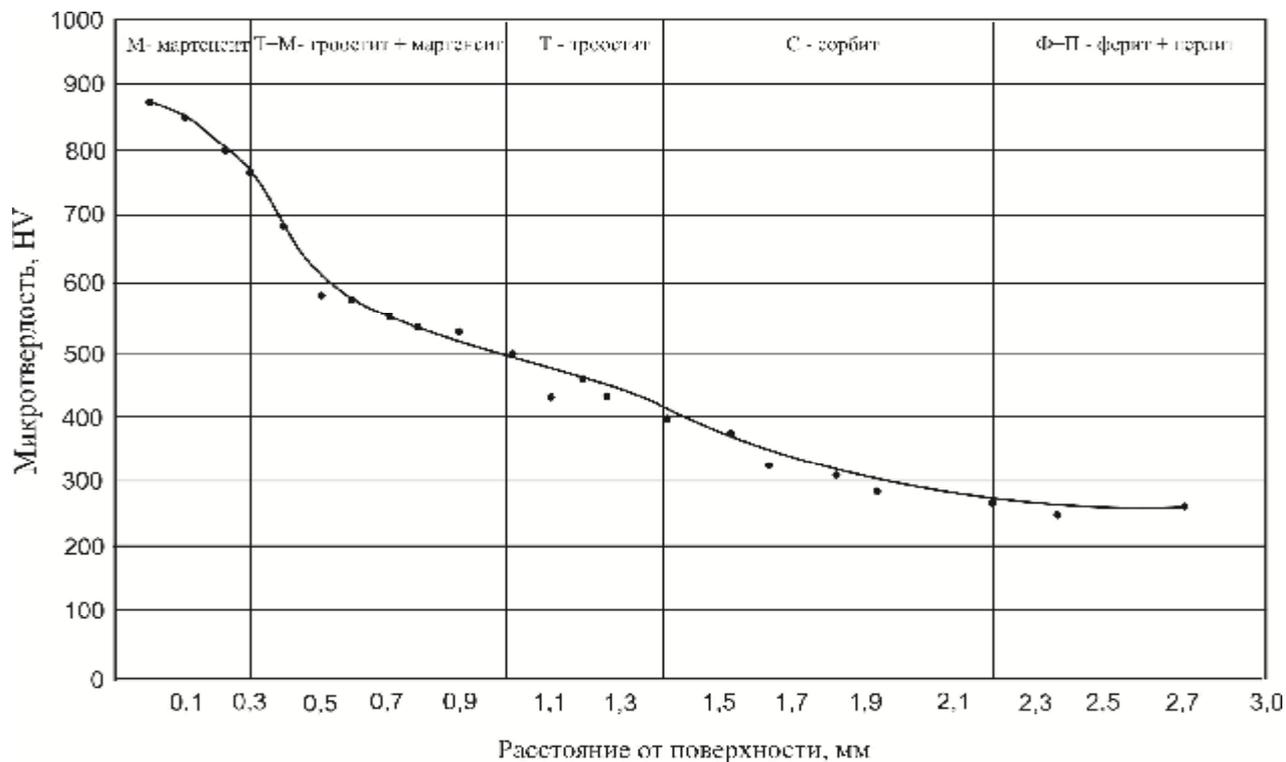


Рисунок 4- Зависимость величины микротвердости от расстояния по глубине упрочненного слоя гребня цельнокатаного вагонного колеса

Как известно, при сверхбыстрых скоростях нагрева в ходе плазменной закалки фазовые превращения смещаются в область высоких температур, что сильно влияет на кинетику возникновения и роста зародышей новой фазы.

Соотношение между скоростью зарождения и скоростью роста зародышей меняется: по мере повышения температуры зерна новой фазы (аустенита) зарождаются быстрее, чем их рост, наблюдается все большее количественное опережение скоростью зарождения скорости роста. В результате по мере смещения превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$  в область высоких температур все большую роль играет процесс зарождения, а рост зародышей в значительной степени подавляется. В итоге формируется мелкозернистый аустенит, который превращается в

высокодисперсный бесструктурный мартенсит.

Регулируя количество введенной энергии, можно создать такие условия превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$  когда единственной возможностью перехода исходных фаз окажется процесс зарождения. При этом открывается возможность получения сверхмелкого аустенита, когда размеры зерен будут соизмеримы с критическими размерами при температуре, достигаемой в процессе скоростного нагрева. Это используется в целях улучшения физико-механических свойств стали после поверхностной плазменной закалки. Кроме того, особенности упрочнения сплавов при быстром нагреве связаны с тем, что превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$  в них идет в неравновесных условиях в отличие от

традиционных методов термического упрочнения с медленным нагревом.

При сверхбыстром нагреве отсутствует выдержка, необходимая для протекания превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$  растворения карбидов с последующим перераспределением углерода и легирующих элементов. Поэтому образующийся аустенит имеет разные концентрации растворенных атомов углерода и легирующих элементов в отличие от гомогенного распределения при медленном печном нагреве.

В таблице 1 приведена характеристика упрочненного слоя, включающая глубину закаленного слоя, твердость поверхности и изменение твердости по глубине упрочненного слоя от поверхности до границы закаленного слоя с исходной (неупрочненной) зоны шейки шпинделя токарного станка из легированной стали 35ХНЗМФА. Ширина зоны упрочнения составляет 20-25 мм. Заметим, что плазменная закалка проводилась с шагом, превышающим ширину закаленной зоны на 1,5-2,0 мм. При перекрытии закаленных зон происходит отпуск на ширину около 5 мм. Видно, что глубина упрочненного слоя в

зависимости от ширины закаленной зоны составляет 0,65 -1,30 мм.

Сопоставление твердости поверхности, измеренной авторами статьи и заказчиком показывает, что эти значения практически совпадают: для 3-го образца они равны соответственно 48-52 HRc(48-53 HRc), для 5-го образца 41-45 HRc(45-51 HRc). По глубине упрочненного слоя твердость снижается, что свидетельствует о формировании градиентно-смешанной структуры: от мартенсита на поверхности до феррито-перлитной основного металла.

При создании смешанно-градиентной многослойной структуры трещиностойкость стали существенно повышается. Это объясняется тем, что распространение возникшей трещины затрудняется, поскольку она должна каждый раз зародиться вновь, переходя от одного слоя к другому.

Кроме того, важным резервом повышения трещиностойкости является увеличение поверхностных сжимающих напряжений при плазменной закалке, которые затрудняют раскрытие трещины в отличие от растягивающих напряжений, способствующих, наоборот, их раскрытию.

Таблица 1-Характеристика упрочненного слоя

Номер темплета	Номер участка измерения	Твердость, измеренная на упрочненной поверхности*	Глубина упрочненного слоя, мм	Твердость, измеренная по глубине упрочненного слоя**	
				вблизи поверхности	на границе упрочненного слоя и основного металла
	1	46-49HRc	0,65	473 HV 46HRc	314HV 32 HRc
	2	48-50HRc	1,30	503 HV	319 HV

1				48HRc	36 HRc
	3	48-52HRc (48-53HRc)	0,95	519 HV 48HRc	330 HV 35 HRc
	4	49-52HRc	1,30	503 HV 48HRc	330 HV 35 HRc
	5	41-45HRc (45-51HRc)	0,98	459 HV 45HRc	306 HV 31 HRc
	6	45-50HRc	0,65	536 HV 49HRc	347 HV 36 HRc
	7	49-51HRc	0,94	519 HV 48HRc	306 HV 31 HRc
	8	45-52HRc (45-53HRc)	0,88	503 HV 48HRc	330 HV 35 HRc
	2	1	41-42HRc		
2		41-44HRc			
3		44-48HRc			
4		41-43HRc			
5		45-48HRc			

Примечание.

Требование чертежа 9900 70 14 056 (40-45 HRc)

\* - В скобках приведены значения, измеренные заказчиком

\*\* - В скобках приведены значения, полученные переводом значений твердости по Виккерсу и значения твердости по Роквеллу.

### Заключение

1. При поверхностной плазменной закалке в силу специфичности обработки (сверхвысокие скорости нагрева и охлаждения) удается получить такую микроструктуру и свойства поверхностного слоя, которые недостижимы при традиционных способах упрочняющей термической обработки. Упрочняется только поверхностный слой, а сердцевина остается вязкой, что обеспечивает повышенное сопротивление одновременно и изнашиванию, и контактной усталости.

2. Формирование в поверхностном слое плазменно-упрочненной детали градиентно-слоистой структуры позволяет исключить образование резкой границы перехода от структур мартенсита к троосто-мартенситным и смешанным пластинчатым структурам.

Наличие в поверхностном слое остаточных сжимающих напряжений повышает сопротивляемость зарождению и распространению микротрещин. Это является одним из основных факторов, повышающих контактно-усталостную прочность стали и способствующих ее трещиностойкости.

3. Несмотря на определенные сложности, связанные с применением поверхностного плазменного упрочнения крупногабаритных и массивных деталей («строчность» поверхности, связанная с размерами пятна нагрева, отпуск закаленного слоя на ширину около 5 мм при перекрытии обработанной зоны), этот способ является наиболее производительным и экономичным при термической обработке

конструкционных углеродистых и рабочих поверхностей  
легированных сталей, особенно крупногабаритных деталей.

### Список литературы

1. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологий. Руководство для инженеров. СПб. Изд-во Политехнического университета. 2013, 406 с.
2. Канаев А.Т., Богомолов А.В. Структурообразование в плазменно-упрочненных металлических материалах. Астана, 2014, ТОО «Политон» 2015, 185 с.
3. Токтанаева А.А., Канаев А.Т. Поверхностное плазменное упрочнение гребней колес тягового подвижного состава. Материалы 14-й Международной научно-практической конференции «Технология упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика, часть 2, стр.338-343
4. Быков Е.Г., Ефимов О.Ю., Иванов Ю.Ф. и др. Эволюция структурно-фазовых состояний при эксплуатации прокатных валков. Известия вузов, серия Черная металлургия, 2010, № 12, стр. 35-37
5. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1986, 479 с.

### Түйін

Сапалы көміртекті болаттан жасалған вагон доңғалақтарының жалдары мен ауыр токарлы станоктің қоспаланған 35ХНЗМФА болаттан жасалған ұзындығы 6500 мм шпинделінің мойнының сыртқы қабаты плазмалық шынықтырумен өңделген. Үлкен габаритті және массивті әр салада қолданылатын бөлшектердің сенімділігін олардың сыртқы қабатын плазмалық шынықтыру арқылы көтеруге болатындығы негізделген. Плазмамен беріктендірілген қабатта микроқаттылығы әртүрлі бірнеше құрылымдық зоналардың пайда болатыны көрсетілген. Бұл өз кезегінде беріктендірілген қабатта градиентті қабатты құрылымның түзілгенін анықтайды. Бөлшектің сыртқы қабатын плазмалық шынықтыруда болатын өте тез жылдамдықпен қыздыру кезінде фазалық және құрылымдық түрленулер жоғарғы температураларға қарай жылжиды да, жаңа фазаның, яғни аустениттің, пайда болу және өсу кинетикасының қатты өзгертіндігі расталған. Мұндай түрлену кезінде өте ұсақ түйіршікті аустенит қалыптасады да, ол жоғары дисперсті мартенситті құрылымға айналады, өте ұсақ түйіршектерден тұратын құрылымды термиялық өндеудің дәстүрлі тәсілдерінде алу мүмкін емес.

### Summary

Necks of a spindle of the heavy lathe from the alloyed steel 35HN3MFA 6500 mm

long and crests of carriage wheels diameter from qualitative carbon steel are processed by surface plasma tempering. It has been proved possibility to increase reliability of work of large-size and massive parts of different function by way of plasma hardening of their surfaces. It is shown that on hardening depth formation of several structural zones of different microhardness is observed, which claims of formation of gradient laminated structure clearly. It is confirmed that at the superfast speed of heating that takes place at surface plasma tempering, phase and structural transformations are displaced in area of high temperatures, strongly changing kinetics of emergence and growth of germs of a new phase (austenite). At this stage fine-grained austenite is formed which turns into the high-disperse martensitic structure unattainable at traditional ways of heat treatment forms.