

Исследование влияния плазменной закалки на процессы упрочнения тяжело нагруженных деталей почворезущих машин

¹*КОСАНОВА Индира Муратовна, докторант, ind_jm@mail.ru,

²ТОЛЕУОВА Айнагуль Рымкуловна, PhD, и.о. доцента, rymkul.ainagul@gmail.com,

³КАНАЕВ Амангельды Токешович, д.т.н., профессор, aman-kanaev2012@yandex.ru,

³БАЙЖАН Дарын, магистрант, daryn.baizhan@mail.ru,

⁴АМЕНОВА Алия Алихановна, PhD, доцент, aliya_a.a555@mail.ru,

¹НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», Казахстан, Астана, пр. Женис, 62,

²НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

³НАО «Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова», Казахстан, Усть-Каменогорск, ул. 30-й Гвардейской дивизии, 34,

⁴НАО «Карагандинский индустриальный университет», Казахстан, Темиртау, пр. Республики, 30,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Исследовано влияние плазменной закалки на процессы упрочнения тяжело нагруженных и поэтому быстро изнашивающихся деталей рабочих органов почворезущих машин. Показано, что при поверхностном упрочнении лемеха плуга из конструкционной стали 65Г в упрочненной зоне толщиной 0,8 мм формируется градиентно-слоистая (смешанная) структура, состоящая из мелкодисперсной смеси продуктов распада мелкозернистого аустенита с изменяющейся микротвердостью в интервале 760-395 HV. Установлено, что формирование тонкодисперсной структуры и условия ее образования после соответствующего поверхностного упрочнения объясняются достаточно высокими скоростями нагрева и охлаждения, которые не могут быть достигнуты при использовании классических методов термической обработки. При плазменной обработке деталей образуются метастабильные структуры с высокой прочностью и износостойкостью. Получен результат упрочнения лемеха плуга плазменной закалкой в виде модифицированного слоя с мелкодисперсной конфигурацией, наблюдается повышение износостойкости лемеха плуга по сравнению с серийными деталями, подвергающимися традиционной термообработке, и существенное снижение затрат на процесс упрочнения за счет применения экономичной, достаточно производительной технологии поверхностной плазменной закалки.

Ключевые слова: конструкционная сталь, плазменная закалка, упрочнение, тяжело нагруженные детали, градиентно-слоистая структура, микротвердость, микроструктура, свойства, мартенсит, термическая обработка.

Введение

В качестве особо ответственных рабочих деталей почворезущих машин используют плужные лемехи и лапы культиваторов, но в процессе эксплуатации подвергаются очень быстрому износу.

Высокий срок службы работы данных деталей обеспечивается правильно подобранным микрولةгированием и соответствующим режимом термической обработки.

В нашей стране для изготовления деталей – плужные лемехи и лапы культиваторов используют стали 65Г, 40Х, Л53, которые относят к классу недорогих углеродистых низколегированных ста-

лей. Детали, изготовленные из данных марок сталей, должны отвечать высокому уровню эксплуатационного ресурса (прочность и твердость), что обеспечивается соответствующей термической обработкой. Согласно ГОСТ 2590-2006 механические свойства изделий, которые будут изготовлены из данных марок сталей, должны соответствовать: ударная вязкость – в пределах 0,2-0,6 МДж/м², прочность порядка 900-1200 МПа, твердость изделий, изготовленных из этих сталей, в состоянии поставки не превышает 25-30 HRC (250-300 HV).

В зарубежных странах детали, имеющие низкий рабочий срок службы эксплуатации,

изготавливают из низколегированных среднеуглеродистых марок сталей. При использовании классических методов обработки достигается уровень механических свойств: повышение твердости до 50-60 HRC, превышение прочности до 1200 МПа, ударная вязкость повышается до 0,8-0,9 МДж/м². Вместе с тем западноевропейские фирмы «Conit»-KVERNELAND» (Норвегия), «Plasmabid»-Rabe (Германия), «OVERUM» (Швеция) успешно разработали и реализовали наукоемкие технологии с применением плазменных способов упрочнения поверхности деталей.

Отличительной особенностью этих изделий является двух- или трехслойная структура поперечного (упрочненного) слоя, так называемое диссипативное (градиентно-слоистое) строение. При таком строении верхний слой детали будет иметь твердость до 65HRC и прочность 1200-1800 МПа [1, 2]. Следует отметить, что для повышения твердости стали классические режимы термической обработки уже давно не используют. Поверхностное упрочнение на сегодняшний день является актуальным методом повышения эксплуатационного ресурса деталей почвообрабатывающих машин [3].

Материал и методика исследований

Поверхностную плазменную обработку плужных лемехов и лап культиваторов из марганцовистой стали 65Г (ГОСТ 14659-2004) выполняли на мобильной сертифицированной установке ручной плазменной закалки УДГЗ-200. Установка УДГЗ-200 состоит из регулятора расхода газа с указателем расхода АР-40. Указатель расхода АР-40 служит для снижения давления газа, который поступает из баллона и одновременно предназначен для постоянного поддержания.

Давление газа снижается за счет поступления его в регулятор из баллона и происходит это за счет его расширения при проходе между клапаном и седлом в камере рабочего давления.

За счет маховика производится необходимый расчет газа, а контроль давления газа контролируется манометром, состоящим из шкалы до 25 МПа (250 кг/см²).

Предохранительный клапан, установленный в корпусе регулятора, соединен с рабочей камерой и должен быть отрегулирован на старт выпуска газа с общим давлением в пределах от 0,6 до 1,0 МПа (6,0-10 кг/см²) АР-40. Через ниппель идет набор газа и к нему подсоединяется шланг диаметром 9 мм [4].

Для упрочнения тонкостенных деталей, не обладающих достаточной массой, применяются методы интенсификации охлаждения. На практике значительный интерес представляет случай, когда необходимая для закалки скорость охлаждения обеспечивается рациональным сочетанием параметров режима плазменной закалки, позволяющим получить заданные глубину и твердость поверхностного слоя. При этом важное значение

имеет то, что при нагреве поверхности детали плазменной дугой основные параметры режима плазменной закалки взаимосвязаны [5, 6]. В данной работе скорости движения плазматрона составляла 30-50 мм/с (скоростью перемещения дуги поддерживалось запотевание поверхности под дугой, но при этом нельзя допускать макроплавления), расход плазмообразующего газа варьировался в пределах 7,0-9,0 л/мин, расстояние между срезом сопла плазматрона и обрабатываемой поверхностью составляло ~ 10 мм, уровень тока плазменной дуги составлял 120-125 А при напряжении 40 В. Предварительные опыты показали, что угол заточки электрода (ГОСТ 759-78) влияет на стабильность горения плазменной струи [7].

Как показали проведенные эксперименты, наиболее ответственным моментом является правильное положение электрода в горелке, при этом электрод не должен выступать из керамического сопла, а быть на уровне его или утоплен на 0,5-1,0 мм. Электрод должен находиться строго по центру отверстия керамического сопла, в случае несоосности необходима замена сопла или электрода [8].

Полученные результаты и их обсуждение

Металлографические исследования показывают, что механические свойства (прочность, твердость) плазменно-закаленных деталей определяются формой, размерами, ориентацией зерен (субзерен) и характером распределения их в объеме металла. На рисунке 1 представлена исходная структура стали, состоящая из пластинчатых перлитных колоний, окруженных ферритной сеткой, что характерно структуре горячекатаного состояния с охлаждением проката на спокойном воздухе.

Как известно, такая крупнозернистая структура формируется при высокой температуре конца прокатки и свидетельствует о том, что до плазменной закалки образцы не подвергались упрочняющей термической обработке, что является недостатком действующей технологии.

После плазменной закалки формируется закаленный слой поверхности с высокой микротвердостью.

Структурные особенности и микротвердость упрочненного слоя лемеха плуга, а также поверхностная твердость исследованных образцов приведены в таблице 1.

По данным таблицы 1 и рисунка 2 видно, что для лемехов плугов из стали 65Г глубина упрочненного слоя составляет ~ 0,8 мм с микротвердостью по сечению в интервале 760-390 HV_{0,2}. В упрочненном слое образца сформировалась градиентно-слоистая (диссипативная) структура, состоящая из мелкодисперсной смеси продуктов распада мелкозернистого аустенита.

На расстоянии от поверхности ~ 15 мкм структура представляет собой мартенсито-бейнит-



Рисунок 1 – Исходная структура стали (горячекатаное состояние)

Таблица 1 – Структурные особенности и микротвердость упрочненного слоя исследованных образцов из стали 65Г

№ п/п	Расстояние от поверхности, мм	Микроструктура	Микротвердость по сечению, HV ₀₂	Поверхностная твердость, HRC
1	0,15	Мартенсит+Бейнит	760	(45-50)
2	0,30	Бейнито-трооститная	615	
3	0,45	Троосто-сорбит	595	
4	0,80	Перлит+феррит	390	

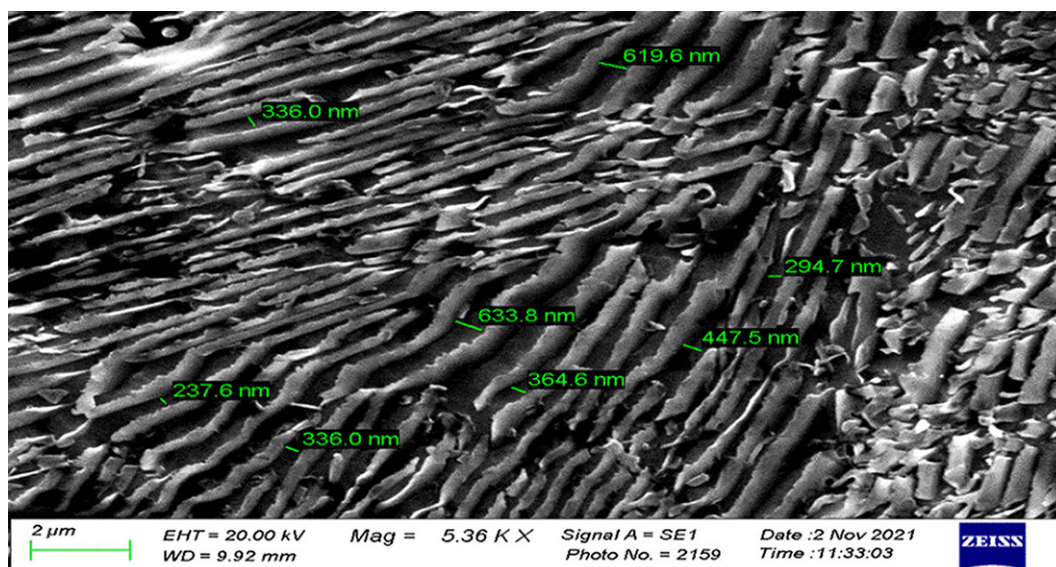


Рисунок 2 – Электронно-микроскопическая структура пластинчатого перлита (указаны межпластиночные расстояния феррито-цементитной смеси)

ную смесь с микротвердостью ~ 760 HV₀₂, далее с микротвердостью 615 HV₀₂ наблюдается трооститно-бейнитная конфигурация, также 10-25% аустенита. Затем сформирована узкая зона троосто-сорбитной структуры (~ 595 HV₀₂), плавно переходящая к исходному феррито-перлитному состоянию.

На рисунке 2 приведена электронно-микроскопическая структура пластинчатого перлита

с измеренным межпластиночным расстоянием феррито-цементитной смеси. Видно, что цементитные частицы в перлите представлены в виде параллельных пластинок, а межпластиночные расстояния между ферритом и цементитом в разных перлитных колониях колеблется от 237,6 nm до 633,8 nm с микротвердостью 390 HV₀₂.

В работе показано, что в сталях с преимущественной структурой пластинчатого перлита на

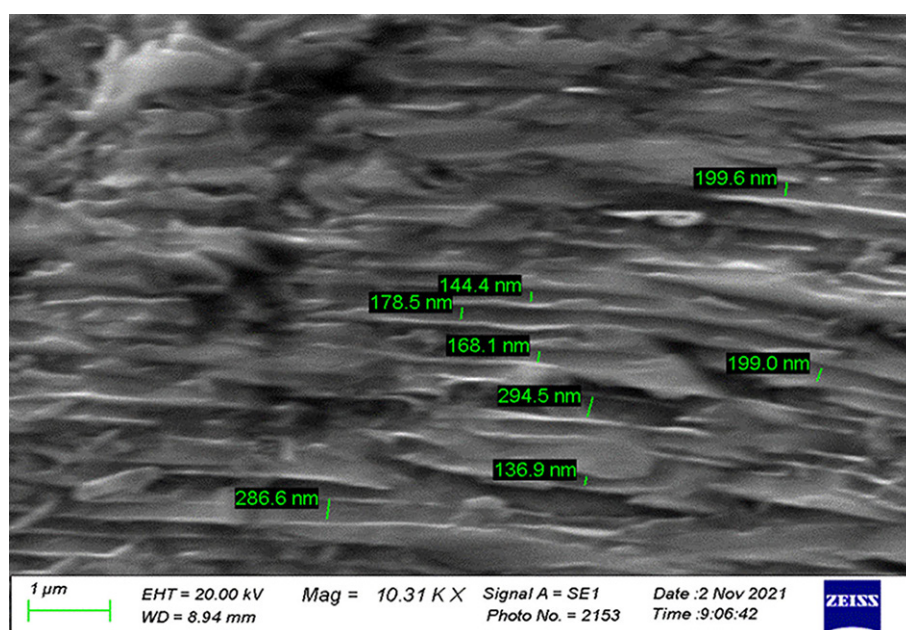
процессы упрочнения большое влияние оказывают цементитные пластины, поскольку именно они являются эффективным препятствием для движения дислокаций. Упрочнение перлита при уменьшении в нем межпластиночного расстояния может быть описано уравнением Холла-Петча ($\sigma_T = \sigma_i + k_y d^{-1/2}$), что позволяет сделать обоснованное предположение о том, что физическая природа упрочнения перлита может быть объяснена величиной свободного пробега дислокаций.

Как известно, мартенситное превращение углеродистой стали протекает при снижении температуры ниже точки начала мартенситного превращения M_n (230-250°C) при скорости охлаждения, превышающей 150°C [9]. Скорость охлаж-

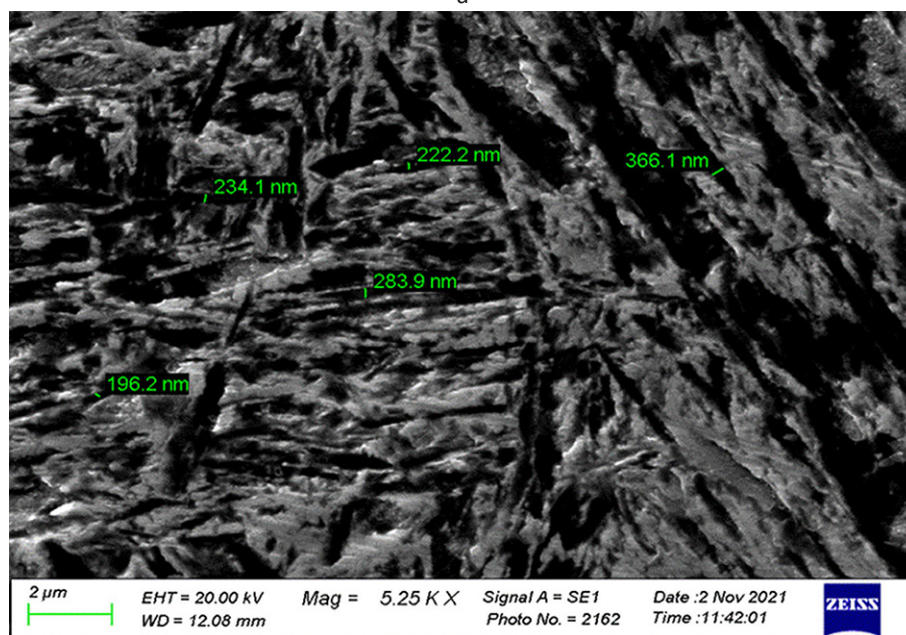
дения на рабочей поверхности лемеха достигает значений 700-800°C/с, а на расстоянии ~ 2 мм от поверхности изменяется в пределах 100-120°C/с.

Повышенная прочность и твердость бейнита обусловлена малым размером ферритных частиц, дисперсным выделением карбидов (цементита) повышенной плотностью дислокаций и искажением кристаллической решетки феррита из-за пересыщенности его углеродом и легирующими элементами [10]. Так, если феррит перлита при 723°C содержит 0,025% C, то феррит бейнита в интервале температур 500-300°C может содержать от 0,1 до 0,2% C, т.е. степень пересыщенности его углеродом составляет 5-10 раз.

Как видно из рисунков 2 и 3, в направлении от



a



б

Рисунок 3 – Электронно-микроскопическая структура поверхностной зоны, представлена а) пластинчатым (игольчатым) мартенситом и б) бейнитом пористой формы

поверхности к центральным зонам максимальное значение межпластиночного расстояния от 366,1 nm увеличивается до 499,2 nm, что свидетельствует о снижении степени упрочнения.

Были проведены исследования по анализу химического состава стали по глубине плазменного упрочнения и неупрочненной зоны на искровом спектрометре SPECTROLAB^{CC} фирмы Leica Microsystems. Данные химического анализа по глубине плазменного упрочнения и неупрочненной зоны представлены в таблице 2.

По данным таблицы наблюдается микронеоднородность структурных составляющих поверхности материала. Содержание углерода по глубине упрочненной поверхности составляет от 0,003 до 0,05% (ат.), другие постоянные добавки стали (V, Mn, Si и др.) также неоднородны. При режимах нагрева ($t \approx 1400-3000^\circ\text{C}$) и скорости охлаждения ($V_{\text{охл}} \approx 600-800^\circ\text{C/c}$), характерных для плазменного упрочнения, образуются неравновесные метастабильные конфигурации с высокой износостойкостью и прочностью.

Выводы

1. Сверхвысокие скорости нагрева и охлаждения являются основополагающими критериями образования градиентно-слоистой структуры, которые не могут быть достигнуты при использовании классических режимов термической обработки. Результат такой поверхностной плазменной обработки – это структура сплава с тонкодисперсными частицами, хорошо ориентированной микронеоднородностью и, как следствие, остаточные напряжения в поверхностном слое металла повышены.

2. Показано, что при поверхностной плазмен-

ной закалке лемеха плуга из стали 65Г в упрочненной зоне толщиной 0,8 мм формируется градиентно-слоистая (смешанная) структура, состоящая из мелкодисперсной смеси продуктов распада мелкозернистого аустенита с изменяющейся микротвердостью в интервале 760-395 HV. Меняя параметры нагрева (время выдержки, скорость нагрева), можно управлять размером зерна аустенита к моменту начала ($\alpha \rightarrow \gamma$) превращения, а меняя параметры охлаждения, управлять дисперсностью мартенсита при обратном ($\gamma \rightarrow \alpha$) превращении, следовательно, свойствами обрабатываемого материала.

3. Текущие параметры термической операции при нагреве поверхностного слоя детали плазменной дугой: предельная температура нагрева, выдержка при данной температуре выше критической точки A_{c3} , для полноты прохождения всех фазовых превращений, а также скорость нагрева и охлаждения напрямую зависят от технологии термической обработки, и от правильно выбранного режима термической обработки будет зависеть глубина твердости поверхности образца.

4. Техническим результатом упрочнения лемеха плуга плазменной закалкой является получение на поверхности детали модифицированного слоя с градиентно-слоистой структурой, повышение износостойкости лемеха плуга по сравнению с серийными деталями, подвергающимся традиционной термообработке (закалке и отпуску) и существенное снижение затрат на процесс упрочнения за счет применения экономичной (малозатратной), экологичной, достаточно производительной технологии поверхностной плазменной закалки.

Таблица 2 – Данные химического состава по глубине плазменного упрочнения и неупрочненной зоны

Наименование зон по глубине упрочнения	Химический состав, % (ат.)								
	C	Si	V	Mn	Fe	W	Ti	Cr	S
t 1	0,06	0,002	-	0,063	0,855	0,008	-	-	-
t 2	0,5	0,002	0	0,06	0,87	0,02	0,0002	-	0,0005
t 3	0,002	-	0,001	0,065	0,87	0,009	-	0,001	0,002
t 4	0,5	0,0005	0,001	0,062	0,86	0,018	0,004	-	0,002
t 5	0,047	0,0035	-	0,072	0,87	-	-	0,001	-
t 6	0,035	0,004	-	0,068	0,89	0,002	0,0026	-	-
t 7	0,02	0,0018	0,0027	0,07	0,88	0,019	-	-	-
t 8	0,027	0,0025	0,0023	0,065	0,88	-	-	-	-
t 9	0,03	0,004	-	0,074	0,86	0,026	-	-	-
t 10	0,04	0,004	0,001	0,069	0,88	-	0,003	-	-
Основа	0,008	-	-	0,059	0,90	-	-	-	-

Работа выполнена в рамках проекта № АР08052699 «Разработка и создание экспериментального участка по упрочнению тяжело нагруженных деталей почвотребующих машин с использованием инновационной плазменной технологии» в АО «АрселорМиттал Темиртау», лаборатории «Металловедение и дефектоскопия», телефон для связи 8 702 360 48 88, электронный адрес: ind_jm@mail.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самойлович Ю.А. Теплофизическая модель плазменной закалки плужного лемеха сельскохозяйственных машин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – № 12 (14). – С. 557-565.
2. Балановский А.Е. Оценка зерна аустенита при поверхностном плазменном упрочнении среднеуглеродистых сталей // Там же. – 2015. – № 6. – С.27-33.
3. Коротков В.А. Новое в поверхностной закалке // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 11. – С. 42-46.
4. Богданов В.М., Захаров С.М. Современные проблемы системы колесо-рельс // Железные дороги мира. – 2014. – № 1. – С. 57-62.
5. Kanayev A.T., Jaxymbetova M.A., Kossanova I.M. Quantitative assessment of the yield stress of ferrite-pearlitic steels by structure parameters // News of the Nat. Ac. of Sci. of the Republic of Kazakhstan. – 2021. – № 3 (447), С. 65-71.
6. Канаев А.Т., Сарсембаева Т.Е., Гуляренко А.А., Аязбаева А.Б. Градиентно-слоистая структура, сформированная на поверхности колесной стали при плазменной закалке // Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина. – 2020. – № 2 (105). – С. 265-273.
7. Коротков В.А., Ананьев С.П., Шекуров А.В. Исследование влияния скорости охлаждения на качество поверхностного слоя при плазменной закалке // Сварочное производство. – 2012. – № 3. – С. 23-27.
8. Сафонов Е.Н., Пыстогоев А.А. Плазменная закалка деталей малой массы // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 7. – С. 30-33.
9. 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. – С. 35-37.
10. Домбровский Ю.М. Физические основы и технологии плазменного поверхностного упрочнения // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 3. – С. 14-25.

Топырақ кескіш машиналардың ауыр жүктелген бөліктерінің қатаюу процестеріне плазмалық беріктендірудің әсерін зерттеу

¹*КОСАНОВА Индира Муратовна, докторант, ind_jm@mail.ru,

²ТОЛЕУОВА Айнагул Рымқұлқызы, PhD, доцент м.а., rymkul.ainagul@gmail.com,

³ҚАНАЕВ Амангельды Токешович, т.ғ.д., профессор, aman-kanaev2012@yandex.ru,

³БАЙЖАН Дарын, магистрант, daryn.baizhan@mail.ru,

⁴АМЕНОВА Алия Алихановна, PhD, доцент, aliya_a.a555@mail.ru,

¹«С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Қазақстан, Астана, Жеңіс даңғылы, 62,

²«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

³«Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті» КеАҚ, Қазақстан, Өскемен, 30-шы Гвардиялық дивизия көшесі, 34,

⁴«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Теміртау, Республика даңғылы, 30,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Топырақ кескіш машиналардың жұмыс бөлшектерінің ауыр жүктелген, сондықтан тозуы жоғары бөліктерінің беріктендіру процестеріне плазмалық қатаюдың әсері зерттелді. 65Г құрылымдық болаттан жасалған соқа түрінін беттік плазмалық шынықтыру кезінде қалыңдығы 0,8 мм шыңдалған аймақта градиентті-қабатты (аралас) құрылым түзілетіні көрсетілген, ол микроқаттылығы әртүрлі 760-395 HV диапозонында ұсақ түйіршікті аустенит ыдырау өнімдерінің ұсақ дисперсті қоспасынан тұрады. Ұсақ дисперсті құрылымның қалыптасуы және оның беткі плазмалық өңдеуден кейінгі қалыптасу ерекшеліктері дәстүрлі термиялық өңдеу әдістерімен қол жеткізу мүмкін емес ультра жоғары қыздыру және салқындату жылдамдығымен түсіндірілетіні анықталды. Бөлшектерді плазмалық өңдеу кезінде беріктілігі мен тозуға төзімділігі жоғары метатұрақты құрылымдар түзіледі. Ұсақ дисперсті конфигурациялы модификацияланған қабат түріндегі плазмалық шынықтыру арқылы соқа үлесін шынықтыру нәтижесі алынған, дәстүрлі термиялық өңдеуге ұшыраған сериялық бөлшектермен салыстырғанда соқа үлесінің тозуға төзімділігінің жоғарылауы байқалады. Үнемді, жеткілікті өнімді беттік плазмалық шынықтыру технологиясын қолдану есебінен шыңдау процесінің құнын төмендету байқалады.

Кілт сөздер: құрылымдық болат, плазмалық шынықтыру, шынықтыру, қатты жүктелген бөлшектер, градиенттік қабаттық құрылым, микроқаттылық, қасиеттері, мартенсит, термиялық өңдеу.

Investigation of the Influence of Plasma Hardening on the Processes of Hardening of Heavily Loaded Parts of Soil-cutting Machines

¹*KOSSANOVA Indira, Doctoral Student, ind_jm@mail.ru,

²TOLEUOVA Ainagul, PhD, Acting Associate Professor, rymkul.ainagul@gmail.com,

¹KANAYEV Amangel'di, Dr. of Tech. Sci., Professor, aman-kanaev2012@yandex.ru,

³BAIZHAN Daryn, Cand. of Tech. Sci., Master Student, daryn.baizhan@mail.ru,

⁴AMENOVA Aliya, PhD, Associate Professor, aliya_a.a555@mail.ru,

¹NCJSC «S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University», Kazakhstan, Astana, Zhenis Avenue, 62,

²NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

³NCJSC «Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University», Kazakhstan, Oskemen, 30th Guards Division Street, 34,

⁴NPJSC «Karaganda Industrial University», Kazakhstan, Temirtau, Republic Avenue, 30,

*corresponding author.

Abstract. The influence of plasma hardening on the processes of hardening of heavily loaded and, therefore, high-wear parts of the working bodies of soil-cutting machines has been studied. It is shown that during surface plasma hardening of a plow share made of 65G structural steel, a gradient-layered (mixed) structure is formed in a hardened zone 0.8 mm thick, consisting of a finely dispersed mixture of fine-grained austenite decomposition products with varying microhardness in the range of 760-395 HV. It has been established that the formation of a finely dispersed configuration and the features of its formation after surface plasma treatment are explained by ultra-high heating and cooling rates, which are unattainable with traditional heat treatment methods. During plasma treatment of parts, metastable structures with high strength and wear resistance are formed. The result of hardening the plow share by plasma hardening in the form of a modified layer with a finely dispersed configuration is obtained, an increase in the wear resistance of the plow share is observed compared to serial parts subjected to traditional heat treatment and a significant reduction in the cost of the hardening process due to the use of an economical, sufficiently productive surface plasma hardening technology.

Keywords: structural steel, plasma hardening, hardening, heavily loaded parts, gradient layered structure, microhardness, properties, martensite, heat treatment.

REFERENCES

1. Samojlovich YU.A. Teplofizicheskaya model' plazmennoj zakalki pluzhnogo lemekha sel'skohozyajstvennyh mashin // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. – 2018. – No. 12 (14). – Pp. 557-565.
2. Balanovskij A.E. Ocenka zerna austenita pri poverhnostnom plazmennom uprochnenii sredneuglerodistykh stalej // Tam zhe. – 2015. – No. 6. – Pp. 27-33.
3. Korotkov V.A. Novoe v poverhnostnoj zakalke // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. – 2011. – No. 11. – Pp. 42-46.
4. Bogdanov V.M., Zaharov S.M. Sovremennye problemy sistemy koleso-rel's // ZHeleznye dorogi mira. – 2014. – No. 1. – Pp. 57-62.
5. Kanayev A.T., Jaxymbetova M.A., Kossanova I.M. Quantitative assessment of the yield stress of ferrite-pearlitic steels by structure parameters // News of the Nat. Ac. of Sci. of the Republic of Kazakhstan. – 2021. – No. 3 (447), Pp. 65-71.
6. Kanaev A.T., Sarsembaeva T.E., Gulyarenko A.A., Ayazbaeva A.B. Gradientno-sloistaya struktura, sformirovannaya na poverhnosti kolesnoj stali pri plazmennoj zakalke // Vestnik nauki Kazahskogo agrotekhnicheskogo universiteta im. S. Seifullina. – 2020. – No. 2 (105). – Pp. 265-273.
7. Korotkov V.A., Anan'ev S.P., SHekurov A.V. Issledovanie vliyaniya skorosti ohlazhdeniya na kachestvo poverhnostnogo sloya pri plazmennoj zakalke // Svarochnoe proizvodstvo. – 2012. – No. 3. – Pp. 23-27.
8. Safonov E.N., Pystogov A.A. Plazmennaya zakalka detalej maloj massy // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. – 2016. – No. 7. – Pp. 30-33.
9. Bykov E.G., Efimov O.YU., Ivanov YU.F. i dr. Evolyuciya strukturno-fazovyh sostoyanij pri ekspluatatsii prokatnyh valkov // Izvestiya vuzov, seriya Chernaya metallurgiya. – 2010. – No. 12. – Pp. 35-37.
10. Dombrovskij YU.M. Fizicheskie osnovy i tekhnologii plazmennogo poverhnostnogo uprochneniya // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. – 2007. – No. 3. – Pp. 14-25.