Плазменная закалка лемеха плуга из конструкционной стали 65Г

А.Т. Канаев[1], А.А. Гуляренко[1], П.А. Тополянский[2], Т.Е. Сарсембаева[1]

[1]Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, пр. Женис, 62, Нур-Султан, Казахстан
[2]НПО «ПлазмаЦентр» Санкт-Петербургского политехнического университета им. П.Великого, пр. Малоохтинский, 68, Санкт-Петербург, Россия

Дата поступления:
4 мая 2020

Принято на печать:
8 июня 2020

Доступно онлайн:
30 июня 2020

УДК: 631.3-03, 621.039.6

АННОТАЦИЯ

Экспериментально показано, что в плазменно-закаленной стали 65Г по глубине упрочненной зоны формируется градиентно-слоистая структура с закономерно изменяющейся дисперсностью и микротвёрдостью структурных составляющих. Причиной мелкодисперсного характера формируемой градиентно-слоистой структуры является сверхвысокая скорость охлаждения, вызывающая высокий градиент температуры вблизи поверхности. Отмечено, что присутствие небольшого количества остаточного аустенита в структуре поверхностного и приповерхностного слоев является положительным фактором, поскольку аустенитные прослойки с повышенной вязкостью по границам мартенситных пластин являются барьерами для распространения трещин из закаленного слоя в основной металл. Показано, что при сверхскоростном нагреве и охлаждении желаемые свойства металла достигаются не в результате выделения равновесных фаз при превращениях, а благодаря формированию тех или иных метастабильных фаз и структур, характеризующихся ярко выраженной химической неоднородностью.

Ключевые слова: плазменная закалка, градиент температуры, слоистая структура, аустенит, мартенсит, метастабильные фазы, неоднородность.

Введение

Как известно, технический уровень почворежущих машин определяется, прежде всего, долговечностью и надежностью сменных деталей рабочих органов. У плуга – это корпус, наиболее тяжелонагруженной частью которого является лемех. Поэтому к нему предъявляются особые требования как материала для изготовления, так и режимов для термической обработки. Материал для лемеха должен быть износостойким, прочным и обладать высокой ударной вязкостью, так как лемех работает в абразивной среде, испытывая значительные динамические нагрузки. При встрече плужного корпуса на препятствия в почве в виде камней, почвенных уплотнений и твердых участков нагрузка на лемех возрастает многократно по сравнению с ее значением при нормальной вспашке [1,2,3]. Это представляет серьезную опасность для прочности всех составных элементов плуга, в первую очередь – лемеха.

Как показывают результаты многочисленных испытаний на долговечность, от 10 до 40% лемехов в условиях суглинистых почв выбраковывается из-за изгиба и поломки, не достигнув предельного состояния по износу [4,5]. Учитывая ударный характер нагрузки лемеха при наезде на препятствия, важное значение имеет ударная вязкость материала. Поэтому ударная вязкость, наряду с прочностью, является одним из важнейших критериев материала, определяющих надежность такой ответственной детали, как лемех.

В настоящей работе для повышения износостойкости и трещиностойкости, обеспечивающей долговечность и надежность тяжелонагруженных деталей, каким является лемех, используется плазменная обработка. Применимость и перспективность плазменной технологии обработки в сравнении с другими способами высококонцентрированным источником энергии (лазерное излучение, обработка ионными и электронными пучками) обусловлено ее меньшей стоимостью, доступностью технологического оборудования, экологичностью и

**Ответственный автор*
E-mail: gulyarenko@mail.ru (А.А. Гуляренко).

© 2020 Институт проблем горения.
Издательство «Қазақ университеті»

экономической эффективностью использования

Сверхвысокие скорости нагрева и охлаждения (~ 103-105 К/с) при плазменной закалке и кратковременность воздействия на материал (10^{-2}-10^{-3} с) приводят к сильному измельчению структуры закаливаемого материала с формированием наноструктурированных элементов субзерен. При этом создается комплекс высоких физико-механических и эксплуатационных свойств материала, недостижимый при традиционных методах термической обработки, что, в свою очередь, обеспечивает гарантированное снижение интенсивности износа трущихся поверхностей [6, 7].

Целью настоящей работы является исследование особенностей формирования структуры и свойств поверхностного слоя плазменно-закаленного лемеха плуга, изготовленного из конструкционной стали 65Г.

Методика исследования

В работе использовали мобильную специализированную установку плазменной закалки УДГЗ-200. Небольшие размеры плазматрона допускает ручное ведение процесса обработки, а отсутствие подачи на деталь охлаждающей воды существенно упрощает технологию плазменной закалки. Требуемая скорость охлаждения обеспечивается теплоотводом в тело детали и поэтому закалка (упрочнение) происходит без соответствующего охлаждения водой. Сильное измельчение структуры закаливаемого материала при плазменной закалке приводит к комплексу высоких физико-механических и эксплуатационных свойств материала, недостижимый при традиционных методах термической обработки, что, в свою очередь, обеспечивает гарантированное снижение интенсивности износа трущихся поверхностей [8,9].

Установка обеспечивает безконтактный поджег дуги с плавным нарастанием тока, плавную регулировку тока закалки, а также продувку газа до начала закалки и после ее окончания.

На рисунке 1 и 2 приведены схемы соединений и управления плазмотроном (1) и соединений установки УДГЗ -200 (2).

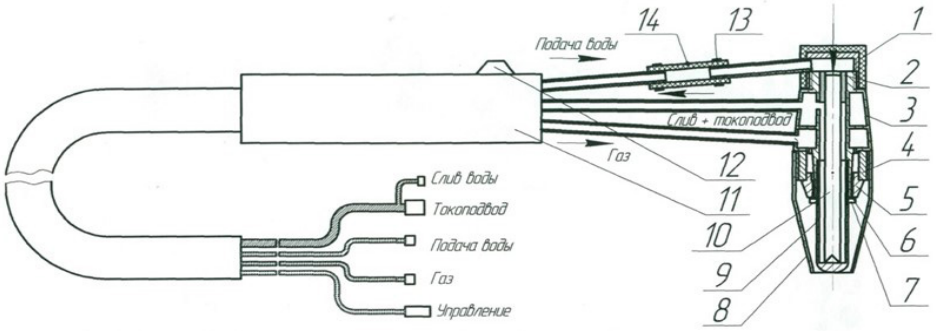
Плазменной закалке подвергали лемех плуга из конструкционной стали 65Г (ГОСТ14659-200 и 4) при следующем режиме: ток дуги ~135 А, электрод с коническим концом, диаметр керамического сопла - 9 мм, расход аргона - 8 л/мин., длина дуги - 20мм. При этом поверхность детали в результате правильной закалки окрашивается в цвета «побежалости» с преобладанием черно-серых и темно-синих тонов. Это достигается линейной скоростью перемещения плазмотрона 35-45 мм/с, что обеспечивает глубину упрочненного слоя 0,8-1,5 мм. Время воздействия плазменной струи на обрабатываемую поверхность в наших экспериментах не измерялось, по литературным данным оно составляет ~ 10^{-2}-10^{-3} с.

Результаты и обсуждение

Известно, что процессы изнашивания, возникновение и развитие трещин при статических, динамических и знакопеременных нагрузках начинаются с поверхности, следовательно, определяются свойствами относительно тонкого поверхностного слоя, выполняющего важную роль в обеспечении долговечности и надежности машин и механизмов. В поверхностном слое

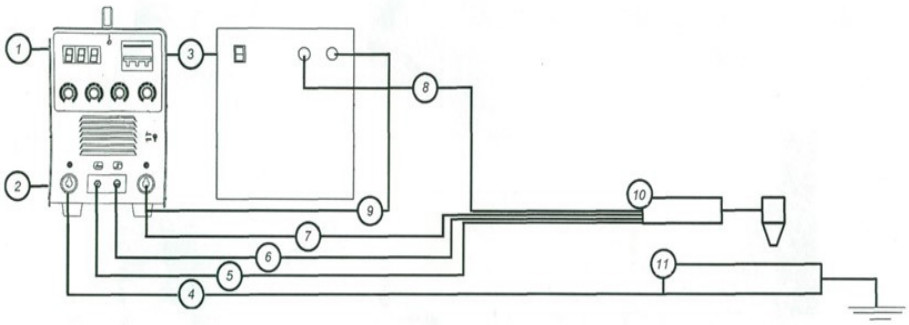
Таблица 1
Краткая техническая характеристика установки УДГЗ-200

№	Наименование параметра	Значение
Источник питания		
1	Напряжение питающей сети, В	3 х 380 ± 10 %
2	Номинальный ток при цикле 1 час, А	200
3	Номинальное рабочее напряжение, В	22
4	Потребляемая мощность, кВт, не более	6,3
Блок охлаждения		
1	Номинальное напряжение питающей сети, В	2 х 380
2	Емкость бака для охлаждающей жидкости, л	8
3	Расход жидкости при давлении 3,2 кгс/см^2, л/мин	до 7
4	Потребляемая мощность, кВт	0,3
Закалочная горелка		
1	Номинальный ток при цикле 1 час, А	200
2	Масса, кг	2



1- гайка, 2,6 –уплот. прокладка, 3 – корпус, 4 – резьбовая втулка, 5 – рассекатель, 7 – гайка для электрода, 8 – керамическое сопло, 9 - электрод, 10 - трубка, 11 - ручка, 12 - кнопка, 13 - хомут, 14 - соединительный рукав

Рис. 1. Схема соединений плазмообразующего газа (аргона), подачи и слива охлаждающей воды, подвода тока и управления технологического плазмотрона



1- сетевой кабель, 2 - подвод плазмообразующего газа к установке, 3 – кабель питания блока охлаждения, 4 – кабель обратного провода, 5 - рукав подачи газа к плазмотрону, 7 – рукав слива воды и токоподвод, 8- рукав воды в плазмотрону, 9 – рукав слива воды, 10 – корпус плазмотрона, 11 – изделие

Рис. 2. Схема соединений установки плазменной закалки УДГЗ -200

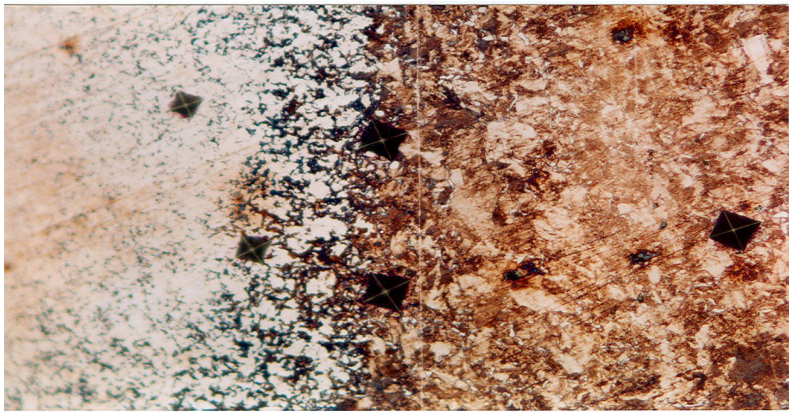
стали при плазменном нагреве происходит релаксация возникающих термических напряжений в результате пластической деформации и синхронно развивающихся процессов возврата, полигонизации и начальных стадий динамической первичной рекристаллизации. Поэтому здесь имеется явная аналогия между поверхностной плазменной закалкой и термомеханической обработкой, при которых имеют место общие факторы и механизмы упрочнения, приводящие к созданию градиентно-слоистых структур.. Если раньше широко распространенное требование однородности структуры представлялось обоснованным и очевидным, то в настоящее время во многих случаях наличие градиентной структуры позволяет материалу приобрести новые, ранее неизвестные, свойства [10].

На рисунке 3 представлена структура поверхностного слоя, состоящая из зоны микрооплавления, переходной зоны со смешанной (градиентной) структурой с различной микротвердостью структурных и фазовых составляющих и исходной зоны.

1) Зона микрооплавления, состоит из неравновесной мелкодисперсной структуры, близкой к аморфной. Эта зона микроструктурно выявляется в виде белого не травящегося слоя исключительно высокой твердости.

2) Непосредственно под белым не травящимся слоем расположена переходная зона со смешанной (градиентной) структурой с микротвердостью, соответствующей твердости мелкоигольчатого мартенсита и троосто–мартенсита, переходящая в мелкодисперсный сорбит отпуска ближе к основной (исходной) структуре.

3) Зона исходной структуры и твердости, представляющая смесь тонкопластинчатого перлита и структурно свободного феррита (рисунок 4).



а б в

Рис.3. Микроструктура поверхностного слоя по сечению упрочненной зоны: аморфная – а, переходная - б и исходная зона – в, х500

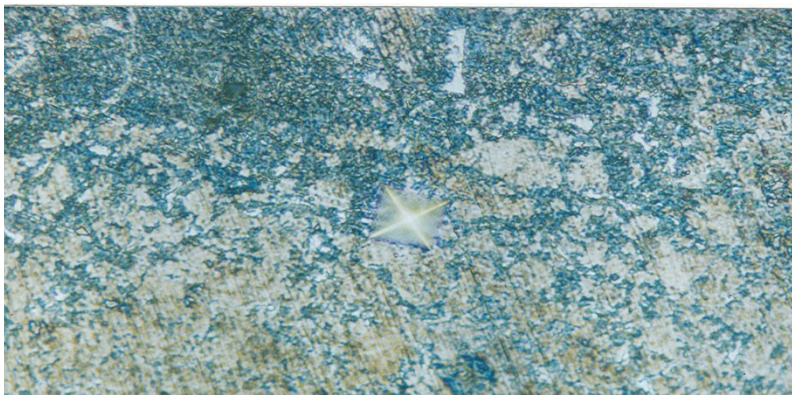


Рис.4. Зона исходной структуры, х100

Таблица 2
Изменение микротвердости и структуры по глубине упрочненного слоя

Расстояние от поверхности, мм	Микротвердость, $HV0_2$	Микроструктура	Расстояние от поверхности, мм	Микротвердость, $HV0_2$	Микроструктура
0,10	860	Мелкодисперсный мартенсит	0,78	592	Сорбит + троостит
0,16	837		0,90	566	
0,21	831		1,12	540	
0,27	792		1,25	528	Сорбит+феррит
0,33	750	Троосто-мартенсит	1,40	487	
0,45	673		1,53	455	
0,58	608		1,60	417-420	Перли+ феррит

Как видно из таблицы 2, изменение микротвердости происходит в диапазоне от 860 $HV0_2$ до 417-420 $HV0_2$. На глубине 0,10 - 0,27 мм наблюдается мартенситная структура с микротвердостью 860- 792 $HV0_2$, на глубине 0,33-0,65 мм троосто-мартенситная структура с микротвердостью 750-594 $HV0_2$, затем сорбито-трооститная структура на глубине 0,78 - 1,12 мм с микротвердостью 592-540 $HV0_2$, сорбитная на глубине 1,25 -1,53 мм с микротвердостью 528- - 455 $HV0_2$, далее структура основного металла с феррито-перлитной структурой.

Как выше отмечалось, по глубине упрочнения отчетливо наблюдается образование нескольких

структурных зон различной микротвердости. На поверхности находится зона химический состав которой соответствует составу стали с содержанием углерода 0,65 %. При резком охлаждении происходит превращение мелкозернистого аустенита в игольчатый мартенсит с дисперсностью 5-15 мкм. За ней следует зона мелкодисперсного троосто-мартенсита. В микроструктуре этих слоев наблюдается присутствие небольшого количества остаточного аустенита, количество которого колеблется и зависит от глубины закаленного слоя. Следует отметить, что наличие в структуре закаленной стали до 15-20% аустенитной составляющей положительно влияет на сопротивление разрушению в результате образования вязких прослоек аустенита по границам мартенситных пластин.

Далее следует слой сорбита-троостита, где микротвердость снижается и зависит от объемного содержания присутствующих фаз, затем в структуре появляется сорбит. Область расположения появляющегося сорбита определяется центральными участками бывших аустенитных зерен, характеризуется меньшей дисперсностью ферритых и цементитных составляющих в них по сравнению с трооститом. Микротвердость в этой области также зависит от объемного количества присутствующих фаз. Далее, по мере углубления внутрь образца, на стыке границ бывших аустенитных зерен появляется феррит и его количество постепенно возрастает. Структура остается феррито-сорбитной и затем плавно переходит в феррито-перлитную. Суммарная микротвердость снижается до исходной. Исходная структура представляет собой смесь ферритных и перлитных зерен с различной степени дисперсности с микротвердостью 417-420 $HV0_2$. В зависимости от мощности дуги общая глубина зоны упрочнения составляет 1,5-1,7 мм

Таким образом, при скоростном нагреве и охлаждении, имеющем место при плазменной закалке, в поверхностной зоне формируется градиентно-смешанная структура различной степени дисперсности. При этом оптимальной структурой металла с позиции обеспечения требуемого комплекса механических свойств (прочности, твердости, и ударной вязкости) является высокодисперсный мартенсит, мартенситно-троостит и троосто-сорбит.

Такая смешанная микроструктура и высокая твердость, полученная в результате плазменного упрочнения, объясняются сверхвысокими скоростями нагрева и охлаждения, недостижимыми при традиционных методах термической обработки. Заметим, что при плазменной закалке особое значение приобретают неравновесные и нестационарные процессы, которые имеют важное значение при формировании конечной структуры. При скоростном нагреве и охлаждении желаемые свойства металла чаще всего достигаются не в результате выделения равновесных фаз при превращениях, а благодаря формированию тех или иных метастабильных фаз и структур. Это обстоятельство сильно влияет на кинетику возникновения и роста зародышей новой фазы. Отсюда следует вывод о том, что регулируя

Таблица 3

Данные химического состава по глубине плазменного упрочнения и не упрочненной зоны

Наименование зон по глубине упрочнения	Химический состав, % (ат.)								
	C	Si	V	Mn	Fe	W	Ti	Cr	S
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t 2	0,06	0,002	-	0,063	0,855	0,008	-	-	-
t 3	0,5	0,002	0	0,06	0,87	0,02	0,0002	-	0,0005
t 4	0,002	-	0,001	0,065	0,87	0,009	-	0,001	0,002
t 5	0,05	0,0005	0,001	0,062	0,86	0,018	0,004	-	0,002
t 6	0,047	0,0035	-	0,072	0,87	-	-	0,001	-
t 7	0,035	0,004	-	0,068	0,89	0,002	0,0026	-	-
t 8	0,02	0,0018	0,0027	0,07	0,88	0,019	-	-	-
t 9	0,027	0,0025	0,0023	0,065	0,88	-	-	-	-
t 10	0,03	0,004	-	0,074	0,86	0,026	-	-	-
t 11	0,04	0,004	0,001	0,069	0,88	-	0,003	-	
Основа	0,008	-	-	0,059	0,90	-	-	-	

количество введенной энергии можно создать такие условия протекания $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, когда единственной возможностью перехода исходных фаз в аустенит оказывается процесс зарождения. При этом открывается возможность получения сверхмелкозернистого аустенита, когда размеры зерен окажутся соизмеримыми с критическим размером при температуре, достигаемой в процессе высокотемпературного скоростного нагрева. Структурные и фазовые составляющие стали после плазменной обработки (аустенит, мартенсит, троостит, сорбит) характеризуются повышенной дисперсностью и более высоким уровнем внутренних (фазовых и структурных) напряжений второго рода, а также ярко выраженной химической микронеоднородностью.

Для экспериментальной проверки этих утверждений были проведены специальные исследования по определению химического состава сплава с возбуждением спектра в искре на искровом спектрометре SPECTROLABJrCCД фирмы Leica Microsystems. Данные химического анализа по глубине плазменного упрочнения и не упрочненной зоны, представленные в табл. 3 подтверждают химическую неоднородность структурных и фазовых составляющих исследованной стали. Видно, что содержание углерода по глубине упрочненной зоны колеблется от 0,002 до 0,06 % (ат.). Такую же неоднородность по глубине закаленной зоны имеют и другие постоянные примеси стали (Si, Mn, V и др.).

При параметрах нагрева и скорости охлаждения, характерных для плазменной обработки, процессы, связанные с гомогенизацией твердых растворов, не успевают завершиться в объеме структур высокой твердости с хорошим сопротивлением износу и микросхватыванию в процессе трения.

Выводы

1. Исследовано влияние плазменной закалки конструкционной стали 65Г на структуру и микротвердость локальной зоны упрочнения лемеха плуга. Показано, что по глубине зоны формируется градиентно-слоистая структура с закономерно изменяющейся дисперсностью и микротвердостью структурных составляющих. Сверхвысокая скорость охлаждения, вызывающая высокий градиент температуры вблизи поверхности, является причиной мелкодисперсного характера формируемой градиентно-слоистой структуры.

2. Присутствие небольшого количества остаточного аустенита (15-20 %) в структуре поверхностного и приповерхностного слоев является положительным фактором, поскольку аустенитные прослойки с повышенной вязкостью по границам мартенситных пластин являются барьерами для распространения трещин из закаленного слоя в основной металл.

3. Подтверждено, что при сверхскоростном нагреве и охлаждении, имеющем место при плазменной закалке, желаемые свойства металла достигаются не в результате выделения равновесных фаз при превращениях, а благодаря формированию тех или иных метастабильных фаз и структур, которые характеризуются ярко выраженной химической неоднородностью.

4. Показано, что все постоянные (C, Si, Mn, S) и легирующие (V, Cr, Ti и др.) примеси железа имеют неоднородность по глубине закаленной зоны, их содержание (в атомных процентах) колеблется в довольно широких пределах, что связано с незавершенностью процессов гомогенизации твердого раствора в условиях скоростного нагрева и охлаждения и кратковременности воздействия плазменной струи на обрабатываемую поверхность.

Благодарность

Работа выполнена в рамках проекта № AP08052699 «Разработка и создание экспериментального участка по упрочнению тяжело-нагруженных деталей почво-режущих машин с использованием инновационной плазменной технологии».

Список литературы

[1]. Соловьев С.А., Лялякин В.П. Состояние и перспективы упрочнения и восстановления деталей почвообрабатывающих машин. Тр. ГОСНИТИ, 2014, т.115, с.96 -104.

[2]. Сидоров С.А. Технический уровень и ресурс рабочих органов сельхозмашин. Тракторы и сельско-хозяйственные машины, 1998, № 3, с.29.

[3]. Канаев А.Т., Тополянский П.А., Гуляренко А.А., Жусин Б.Т. Плазменная закалка сменных деталей рабочих органов почворежущих машин [Текст] / Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина № 1(96) технические науки/ КАТУ им. С. Сейфуллина ; – Астана, 2018. С. 150 – 155. –192 с.

[4]. Кравченко Н.Н., Пузряков А.Ф., Пузряков А.А. Плазменные методы упрочнения и восстановления рабочих органов дорожно-строительных и почвообрабатывающих машин. М.: Эко-Пресс, 2013,328 с.

[5]. Ерохин М.Н., Новиков В.С., Сабуркин Д.А. Выбор марки стали для лемеха плуга. Тракторы и сельско-хозяйственные машины, 2008, № 1, с.5-8.

[6]. Балановский А.Е. Основные вопросы плазменного поверхностного упрочнения металлов. Упрочняющие технологий и покрытия, 2016, №2, с.20-30.

[7]. Канаев А.Т. Модернизация структуры поверхностного слоя конструкционной стали, Астана, Изд-во ТОО

«Мастер-ПО», 2019, 235 с.
[8]. Коротков В.А. Износостойкость материалов с плазменной закалкой. Трение и износ, 2011, №1, т.32, с. 232-29.
[9]. Киселев П.А., Булушев В.Р, Тополянский П.А. Технология восстановления плужных лемехов. Технология упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика. Материалы международной научно-практической конференции. 14-15 апреля 2016г. Санкт-Петербург, 2016, с.36-38
[10]. Канаев А.Т., Богомолов А.В. Формирование градиентно-слоистых структур в колесной стали при плазменной закалке. Wschodnio europejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Jornal) Nauki inzynieryjne I techniczne, Польща, Технические науки, # 9, 2016, p 5-10.

Конструкционды 65Г болатынан жасалған соқаның жүзін плазмалық шынықтыру

А.Т. Канаев[1], А.А. Гуляренко[1], П.А. Тополянский[2], Т.Е. Сарсембаева[1]

[1]С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Жеңіс даңғылы, 62, Нұр-Сұлтан, Қазақстан
[2]НПО «ПлазмаЦентр» Санкт-Петербург политехникалық университетінің П.Великого, Малоохтинский, 68, Санкт-Петербург, Ресей

АҢДАТПА

Плазмадық шынықтырылған 65Г болатының беріктендірілген бетінде градиентті-қабатты, белгілі бір заңдылықпен ұсақталып отыратын микроқаттылықты құрылым түзілетіні көрсетілген. Өте ұсақ градиентті-қабатты құрылымның пайда болуының негізгі себебі – болаттың сыртқы қабатының температура градиетіне әкелетін өте жоғары салқындату жылдамдығы. Беріктендірілген болаттың сыртқы қабатының құрылымында шамалы қалдық аустениттің болуы оң фактор болып есептеледі, себебі тұтқұрлы аустенит шынықтырылған қабатта пайда болатын жарықшақтардың таралуына, морт сынғыш мартенситке кедергі келтіреді. Өте жоғары қыздыру мен салқындату кезінде беріктендіруден күтілетін оң нәтижелерге фазалық түрлендіру кезінде бөлініп шығатын қалыпты фазалар арқылы емес, керісінше, тұрақты емес фазалардыі түзілуі негізінде қол жеткізуге болатыны расталған. Тұрақты емес фазалар өздерінің айшықты химиялық микробірегей еместігімен сипатталанатыны көрсетілген.

Түйінсөздер: плазмалық шынықтыру, температура градиенті, қабатты құрылым, аустенит, мартенсит, тұрақты емес фазалар, микробірегей еместік.

Plasma hardening of a plow share made of 65G structural steel

A.T. Kanaev[1], A.A. Gulyarenko[1], П.А. Topolyanskij[2], T.E. Sarsembaeva[1]

[1]S.Seifullin Kazakh Agro Technical University, Zhenis avenue, 62, Nur-Sultan, Kazakhstan
[2]RPC «Plasmacentre» Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, Maloohtinskiy, 68, St.Petersburg, Russia

ABSTRACT

It is shown that in the plasma-hardened steel 65G along the depth of the hardened zone, a gradient-layered structure is formed with regularly varying dispersion and microhardness of the structural components. The reason for the finely dispersed nature of the formed gradient-layered structure is the ultra-high cooling rate, which causes a high temperature gradient near the surface. It is noted that the presence of a small amount of retained austenite in the structure of the surface and near-surface layers is a positive factor, since austenite interlayers with increased viscosity along the boundaries of martensitic plates are barriers to crack propagation from the hardened layer to the base metal. It was confirmed that with ultrafast heating and cooling, the desired properties of the metal are achieved not because of the precipitation of equilibrium phases during transformations, but due to the formation of certain metastable phases and structures that are characterized by a pronounced chemical micro-heterogeneity.

Keywords: plasma hardening, temperature gradient, layered structure, austenite, martensite, metastable phases, heterogeneity.