

## **Актуальность темы исследования**

Предлагаются новые варианты решения актуальной проблемы улучшения структуры и повышения технологических и эксплуатационных свойств конструкционных сталей и сплавов для устранения причин преждевременного разрушения гидравлических систем транспортной техники путем разработки новых режимов термической обработки и упрочнения поверхностного слоя.

Настоящая работа позволит установить новые закономерности структурно-фазовых превращений, протекающих в конструкционных сталях и сплавах при тепловых воздействиях и упрочнении поверхностного слоя. Детали транспортной техники в современных условиях испытывают все возрастающие нагрузки. Данное исследование научных работ направлено на разработку новых технологий термической и поверхностной упрочняющей обработок, в том числе вакуумной, плазменной, ЛПЛ, HVOF, ХТО.

## **Основные результаты научной работы, их анализ и обобщение**

Установлены причины и механизмы преждевременного разрушения корпусов поглощающих аппаратов из стали 30ХГСН2А. Одной из причин может являться недостаточная прочность гальванического хромового покрытия на штоке поглощающего устройства, его разрушение и образование твердых частиц (твердость 61 HRC), которые приводят к повреждению внутренней поверхности корпуса (появлению задиров) и последующему его разрушению при эксплуатации.

В такой ситуации в качестве причины разрушения хромового покрытия следует рассматривать его замедленное разрушение, как объекта, находящегося длительное время под действием статических напряжений. Нельзя также исключать и пониженные износостойкость или прирабатываемость покрытия вследствие возможных отклонений в подготовке поверхности штока или в самой технологии нанесения хрома. В этой связи оправданными выглядят рекомендации о замене процесса нанесения электролитического покрытия на более прогрессивные, экологически чистые и технологически стабильные процессы

поверхностной обработки штоков - методы термического напыления (плазменным или сверхзвуковым газопламенным напылением в модификации HVOF).

Для ряда плавов установлено формирование недостаточной степени чистоты стали 30ХГСН2А по азоту в отдельных зонах корпуса. Образование таких зон происходит на этапах выплавки стали и получения горячекатанных прутков. Это является причиной повышенной склонности к обезуглероживанию и пониженной прокаливаемости, что не позволяет обеспечить требуемый уровень свойств стали после типовой окончательной термической обработки. При этом корпуса разрушаются в ходе приемо-сдаточных испытаний.

Уменьшение температуры и длительности отпуска позволяет уменьшить степень распада мартенсита, это позволяет повысить твердость стали и скомпенсировать ее снижение, что может быть необходимо в случае проявления начальных стадий обезуглероживания в сталях с избытком азота, если сокращение  $t_3$  полностью предотвратить это не позволяет.

Предложенный режим обработки позволяет обеспечить требуемый уровень механических свойств стали даже при появлении случаев неконтролируемой недостаточной зональной степени чистоты стали по азоту и легкоплавким примесям.

#### **Области возможного применения результатов работы:**

Технологии создания авиационной, ракетно-космической и транспортной технике нового поколения.

**Цель исследования:** разработать режимы термической и поверхностной обработок конструкционных сталей и сплавов, обеспечивающих предотвращение преждевременного разрушения поглощающих аппаратов и демпферов транспортной техники.

#### **Научная новизна работы:**

- установлена взаимосвязь между содержанием примеси азота в сталях и склонностью к обезуглероживанию и прокаливаемостью; зональное повышение содержания азота обуславливает повышение склонности к обезуглероживанию и понижение прокаливаемости;

- выявлены особенности формирования структуры и свойств высокопрочных сталей (30ХГСН2А, ВКЛ-3, 14Х17Н2, 20Х, 40Х, 95Х18), титанового сплава ВТ22 и алюминиевого сплава 1933, В93 в процессе варьирования видов и режимов термической обработки;

- установлены закономерности влияния исходного состояния порошковых смесей и параметров газотермического напыления (в вариантах APS и HVOF) на характеристики качества износостойких и антифрикционных покрытий, наносимых на высокопрочные стали и титановые сплавы;

- установлены закономерности формирования фазового состава по глубине поверхностного слоя, получаемого при лазерном поверхностном легировании титана медью.

#### **Практическая значимость работы:**

- разработаны режимы термической обработки высокопрочных сталей для корпусов поглощающих аппаратов железнодорожного назначения, обеспечивающие повышение их надежности, за счет исключения случаев их преждевременного разрушения;

- разработаны вид и режимы повторной термической обработки высокопрочных сталей, титановых и алюминиевых сплавов для авиационного назначения, позволяющие достигать требуемого уровня свойств, в случае его неудовлетворительного уровня после первой термической обработки;

- разработаны режимы нанесения газотермических покрытий (в вариантах APS и HVOF) на высокопрочные стали и титановые сплавы, позволяющие получать износостойкие и антифрикционные покрытия с характеристиками, отвечающими требованиям нормативных документов для поглощающих аппаратов и демпферов;

- предложены режимы поверхностного лазерного легирования медью технического титана, позволяющие значительно повысить его жаростойкость и износостойкость, что позволяет перейти к отработке этого процесса на высокопрочных титановых сплавах для демпферов.

#### **Экономическая часть**

Ряд режимов термической обработки внедрен в действующее производство, что подтверждает их экономическую эффективность. С момента внедрения (2020 г.) новых режимов термической обработки эффект составил более 15 млн.р.

#### **Методология и методы исследования:**

Методология работы состояла из теоретического изучения литературных источников, а также практических экспериментальных методов исследования, к которым относятся сканирующая электронная микроскопия, рентгеновский фазовый анализ, микрорентгеноспектральный анализ, оптико-эмиссионный анализ, оптическая микроскопия, механические испытания.

**В первой части работы** проанализированы условия эксплуатации поглощающих аппаратов и демпферов, используемых в транспортной технике; выявлены требования по характеристикам свойств применяемых сталей и сплавов.

**Во второй части работы исследованы** материалы, методы и методики исследований.

**В третьей части работы исследованы** случаи преждевременного разрушения железнодорожных поглощающих эластомерных аппаратов и авиационных гидравлических демпферов. **В разделе 1 третьей части** Проанализированы случаи разрушения поглощающих аппаратов в ходе приемосдаточных испытаний. В зоне разрушения корпусов из стали 30ХГСН2А выявляется вязкий излом статического характера. Процесс разрушения инициирован в донной части корпуса, а затем развивается вдоль его образующей по направлению волокон макроструктуры.



Выполнен химический анализ (оптико-эмиссионный метод) образцов, вырезанных из разрушенных деталей. Установлено, что содержание углерода, основных легирующих элементов и вредных контролируемых примесей (серы и фосфора) соответствует нормативным документам. Вместе с тем, содержание азота

в отдельных зонах сечения корпуса существенно превышает требования ( $\leq 0,012$  мас. %) и результаты определения по ковшовой пробе (0,01- 0,009 мас. %) при выплавке стали. Следует обратить внимание и на весьма значительное суммарное содержание легкоплавких примесей (мышьяк, свинец, сурьма, олово), достигающее 0,025 мас.%. Известно, что содержание последних в количествах даже 0,003- 0,005 мас. % ухудшает служебные характеристики легированных сталей, их пластичность и вязкость.

**В третьей части работы исследованы** случаи преждевременного разрушения железнодорожных поглощающих эластомерных аппаратов и авиационных гидравлических демпферов. **В разделе 2 третьей части проанализирован** очаг разрушения расположен на внутренней поверхности корпуса поглощающего аппарата и далее разрушение развивается вдоль его образующей.

Излом имеет строение, характерное для усталостного разрушения. На внутренней поверхности корпуса в области зарождения усталостного повреждения обнаружены продольные задиры от перемещения штока. Непосредственно в месте задира выявлены трещины и внедренные в поверхность частицы хромового покрытия, нанесенного на шток. Частицы имеют твердость 61 HRC. В процесс электролитического хромирования на поверхность штока наносится слой хрома толщиной 90 мкм, который затем подвергают шлифованию до толщины 30-60 мкм.



Таким образом, причиной разрушения изделий в процессе эксплуатации является разрушение хромового покрытия штока, появление задигов на поверхности корпуса и последующее зарождение в зоне задира усталостной трещины

**В четвертой части работы** выполнена разработка режимов термической обработки сталей, используемых в конструкциях поглощающих аппаратов. **В разделе 1 четвертой части реализован** поиск режимов окончательной

термической обработки корпусов из стали 30ХГСН2А, которые позволили бы устранить возможное негативное влияние зональной ликвации на прокаливаемость и обезуглероживание, уровень твердости и других свойств.

Установлено, что полностью годные партии деталей обеспечивают режимы А -  $T_3 = 900$  °С,  $\tau_3 = 180$  мин,  $T_0 = 210$  °С,  $\tau_0 = 180$  мин и Б - нагрев в вакууме,  $T_3 = 900$  °С,  $\tau_3 = 360$  мин,  $T_0 = 210$  °С,  $\tau_0 = 240$  мин. Причем применение режима А в качестве повторной термической обработки позволяет исправлять нежелательные последствия обработки и по другим исследованным режимам.

Уменьшение длительности выдержки при закалке приводит к уменьшению глубины развития обезуглероживания, что позволяет полностью избавляться от него при использовании припуска на механическую обработку равного 1 мм. Уменьшение температуры и длительности отпуска позволяет уменьшить степень распада мартенсита, это позволяет повысить твердость стали и скомпенсировать ее снижение, что может быть необходимо в случае проявления начальных стадий обезуглероживания в сталях с избытком азота, если сокращение  $\tau_3$  полностью предотвратить это не позволяет.

Далее выполнена дополнительная отработка возможных вариантов корректирующей термической обработки корпусов поглощающих аппаратов из стали 30ХГСН2А для устранения их несоответствий по уровню механических свойств. Такая ситуация выявлена при содержании углерода в стали на нижнем допустимом уровне. В этой связи, исследованы различные варианты корректирующей термической обработки. Установлено, что режим окончательной термической обработки с временем выдержки при температуре закалки 150 мин и временем пребывания изделий в масле при закалке не менее 90 мин позволяет увеличить количество годных изделий до 95% (в лучшем случае 50-63% при иных режимах).

**В пятой части исследования** выполнена разработка режимов поверхностного упрочнения штоков с поршнем железнодорожных эластомерных поглощающих аппаратов. В разделе исследованы процессы газотермического напыления покрытий. Для нанесения защитных износостойких покрытий методами

воздушно-плазменного напыления (APS) и сверхзвукового газопламенного напыления в модификации HVOF использована порошковая смесь ПС – 85КдХ + 15Х20Н80. Для реализации метода HVOF – смесь на основе карбида хрома –  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  – 20NiCr, а также смесь WC – Co- Cr – 86/10/4.

Исследования показали, что покрытия с наилучшими показателями качества получены при использовании сферической формы частиц. Выполнен микрорентгеноспектральный анализ по толщине полученных покрытий. Установлено, что в покрытии ПС – 85КдХ + 15Х20Н80, полученном методом APS, присутствуют карбиды сложной формы, расположенные в хромово-никелевой связке. Выявлено наличие карбидов двух стехиометрических составов –  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , химический состав ат. % (рис. а – восьмая точка снизу; рис. б) и  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , химический состав ат.% (рис. а – шестая точка снизу; рис. в).

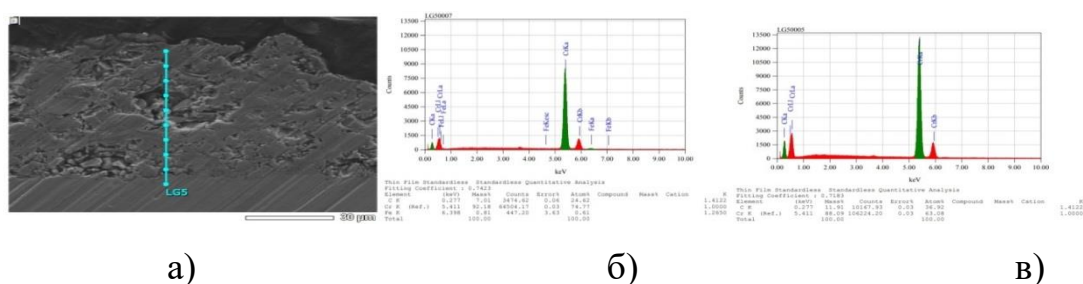


Рисунок - Микроструктура покрытия ПС – 85КдХ + 15Х20Н80 (а); микрорентгеновский спектр и химический состав в точке восьмой снизу (б) и шестой снизу (в) на линии LG5.

В покрытии WC – Co- Cr – 86/10/4, полученном методом HVOF, присутствуют карбиды WC (основное количество) и  $\text{W}_2\text{C}$  (незначительное количество).

**В пятой части проведена** обработка режимов поверхностной обработки штоков и поршней демпферов авиационного назначения.

Выполнены исследования процесса нанесения антифрикционного бронзового покрытия на сплав ВТ22 методом APS на установке напыления HVP. Реализованы два варианта формирования покрытий: первый – нанесение бронзового покрытия непосредственно на поверхность сплава ВТ22; второй – нанесение бронзового покрытия с использованием подслоя. При проведении напыления использован порошок ПР-БрА9. Установлено, что предлагаемые режимы плазменного

напыления позволяют получать на установке APS бронзовое покрытие с характеристиками, удовлетворяющими требованиям нормативных документов, при бронзировании с подслоем ВКНА. Нанесение слоя бронзы без подслоя не обеспечивает требуемый уровень прочности сцепления.

Исследовано лазерное поверхностное легирование (ЛПЛ) медью технически чистого титана ВТІ-0, микротвердость поверхности которого составляла 1800 МПа. Для нанесения исходного медного слоя толщиной 10 мкм использовался метод вакуумного напыления. Для формирования зоны лазерного легирования медью использовался источник с мощностью  $P=160$  Вт, диаметр пятна лазерного луча 2,5 мм, что обеспечивало плотность мощности излучения  $32,6$  Вт/мм<sup>2</sup>. Скорость перемещения луча  $V_{л}$  по поверхности составляла 1,66 и 2,5 мм/с. Режим со скоростью 2,5 мм/с обеспечивает получение наиболее однородной структуры зоны оплавления с высоким содержанием меди и повышенными значениями микротвердости 7000 – 7200 МПа.

#### **Основные результаты и выводы:**

1. Установлены причины и механизмы преждевременного разрушения корпусов железнодорожных поглощающих аппаратов из стали 30ХГСН2А.

2. Установлено, что количественно неконтролируемая в производстве недостаточная степень чистоты стали 30ХГСН2А по азоту в отдельных зонах корпуса, сформированная при выплавке стали и получении горячекатанных прутков, является причиной повышенной склонности к обезуглероживанию и пониженной прокаливаемости, что не позволяет обеспечить требуемый уровень свойств стали после типовой окончательной термической обработки.

3. Предложен скорректированный режим окончательной термической обработки корпусов из стали 30ХГСН2А, предусматривающий назначение сокращенного времени выдержки при температуре закалки (900 °С) - 180 минут и отпуск при температуре 210 °С в течении 180 минут. Данный режим обработки позволяет обеспечить требуемый уровень механических свойств стали при появлении случаев неконтролируемой недостаточной зональной степени чистоты стали по азоту и легкоплавким примесям.



4. Предложены варианты корректирующей термической обработки корпусов из стали 30ХГСН2А для дополнительного увеличения закаливаемости и прокаливаемости стали. Обработка, предусматривающая увеличение времени пребывания изделий в масле при закалке до значений не менее 90 мин позволяет обеспечить количество годных изделий в партии (отсутствуют при типовой обработке) до 95%.

5. Отработаны варианты воздушно-плазменного напыления (APS) и сверхзвукового газопламенного напыления в модификации HVOF износостойких покрытий на установке HVP на сталь 30ХГСН2А и сплав ВТ22, удовлетворяющих требованиям к покрытиям штоков из порошков ПС – 85КдХ + 15Х20Н80,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  – 20NiCr, WC – Co- Cr – 86/10/4. Установлен фазовый состав покрытий, в частности, в карбидохромовом покрытии присутствуют карбиды  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  и  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , в карбидовольфрамовом - WC и  $\text{W}_2\text{C}$ . Предложены режимы APS, позволяющие получать бронзовое покрытие на сплаве ВТ22 с характеристиками, удовлетворяющими требованиям нормативных документов, при бронзировании с подслоем покрытия из ПН75Ю23В (ВКНА). Нанесение слоя бронзы без подслоя не обеспечивает требуемый уровень прочности сцепления.

6. Установлено, что оптимальным режимом лазерного поверхностного легирования титана марки ВТ1-0 медью является режим с толщиной медного исходного покрытия 10 мкм и скоростью перемещения лазерного луча  $V_{\text{л}}=2,5$  мм/с при плотности мощности излучения 32,6 Вт/мм<sup>2</sup>. Лазерное поверхностное легирование титана марки ВТ1-0 медью обеспечивает повышение твердости до 7000-7200 МПа и износостойкости повышается в 3-3,2 раза.