ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ ПОСЛЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ

Б. Д. Лыгденов $^{1, 2}$, Мэй Шунчи 2 , В. А. Бутуханов 1 , А. М. Гурьев $^{2, 3}$, Б. С. Цыдыпов 1 , Люи Чао 2 , Е. А. Кошелева 3 Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,

г. Улан-Удэ, Россия

 2 Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай ³ Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Основным недостатком традиционной химико-термической обработки является крупнозернистая структура, формирующаяся в результате воздействия высокой температуры и длительной выдержки, что ведет к снижению ударной вязкости упрочняемого материала. Достижение высокой ударной вязкости возможно путем получения мелкого зерна с помощью термоциклирования стали, проводимого после диффузионного насыщения. В работе проведено исследование влияния термоциклирования и других видов термической обработки на измельчение зерна для повышения ударной вязкости эвтектоидной стали, подвергнутой химико-термической обработке. Нагрев при термоциклировании обеспечивался путем закладки образцов в печь, разогретую до 900 °C. Скорость нагрева образцов составила 3 °C / сек. Термоциклическая обработка заключалась в нагреве образцов исследуемой стали до температуры 900 °C для обеспечения условий формирования аустенита, последующем охлаждении на воздухе до температуры 600 - 650 °C, далее охлаждение в воде. Было проведено 1, 3 и 5 циклов «нагрев – охлаждение». Все режимы термоциклирования предусматривали на заключительной стадии отжиг стали на зернистый перлит при 650 °C, с последующим охлаждением до $600\,^{\circ}$ С на воздухе и далее – в воде. Показано, что термоциклирование с 3-мя циклами и последующим изотермическим отжигом при $650\,^{\circ}$ С приводит к измельчению действительного аустенитного зерна с 18 - 26 мкм (непосредственно после химико-термической обработки) до 6 - 8 мкм. Установлено, что измельчение зерна термоциклированием приводит к существенному повышению ударной вязкости стальных образцов, подвергнутых химико-термической обработке. Применение химикотермической обработки и последующего термоциклирования обусловливает одновременное повышение поверхностной твердости и ударной вязкости эвтектоидной стали и может быть применимо для штампов холодного деформирования.

Ключевые слова: термоциклирование, химико-термическая обработка, размер зерна, ударная вязкость

THE EFFECT OF THERMOCYCLING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF EUTECTOID STEEL AFTER THERMOCHEMICAL PROCESSING

B. D. Lygdenov ^{1, 2}, Mei Shunqi ², V. A. Butukhanov ¹, A. M. Guriev ^{2, 3}, B. S. Tsydypov ¹, Liu Chao ², E. A. Kosheleva ³ ¹ East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia ² Wuhan Textile University, Wuhan, China ³ Altai State Technical University, Barnaul, Russia

The coarse-grained structure is formed on steel by traditional thermochemical treatment with long duration at extremely high temperature. This main disadvantage of thermochemical treatment leads to decreasing of steel plasticity. Achieving of high plasticity is possible by formation of small grains by using thermocycling after thermochemical treatment. The work investigated the effect of thermocycling and other types of heat treatment on grain size for improving impact of eutectoid steel which was subjected to thermochemical treatment. The heating during thermocycling was provided by putting steel samples in a furnace preheated to 900 $^{\circ}$ C. Heating rate of samples was 3 °C / sec. Thermocycling treatment consists of heating of investigated steel to a temperature of 900 °C (to ensure the conditions for the formation of austenite), followed by cooling in air to a temperature of 600 - 650 °C, then - cooling in water. It was carried 1, 3 and 5 cycles of «heating - cooling». All thermocycling modes in the final

stage provide the formation of granular pearlite by isothermal annealing at $650\,^{\circ}$ C, followed by cooling to $600\,^{\circ}$ C in air and further – in water. It is shown that thermocycling with 3 cycles and isothermal annealing at $650\,^{\circ}$ C leads to a refinement of austenite grain from 18-26 microns (after the thermochemical treatment) to 6-8 microns. It is found that grain refinement by thermocycling leads to a significant increase in impact toughness of steel samples after thermochemical treatment. The use of thermochemical treatment and subsequent thermocycling causes simultaneous increase in the surface hardness and the impact toughness of the eutectoid steel and can be applied on dies for cold deformation.

Ключевые слова: thermocycling, thermochemical treatment, grain size, impact toughness

Введение

Обеспечение удовлетворительной стойкости холодноштампового инструмента обусловлено комплексом свойств материала, среди них: твердость, удовлетворительная высокая ударная вязкость. Очень часто преждевременный износ инструмента вызван выкрашиванием его рабочих кромок по причине недостаточной твердости. Износостойкость материала определяется главным образом его твердостью. Однако при работе штампа с динамическими нагрузками важное значение имеет ударная вязкость. При низком значении ударной вязкости вероятность хрупкого разрушения выше. Известно, что ударная вязкость тем меньше, чем больше твердость. Таким образом, актуальной задачей является получение одновременно высоких значений твердости и ударной вязкости штампов для холодного деформирования. В настоящее время указанный комплекс свойств обеспечивается путем подбора специальных легированных сталей. Химико-термическая обработка (ХТО) является одним из эффективных методов повышения износостойкости инструмента и технологической оснастки. ХТО обусловливает возможность замены легированных дорогостоящих сплавов менее дефицитными углеродистыми, упрочненными данным методом. Описано много способов ХТО, обеспечивающих значительное повышение твердости и износостойкости поверхностных слоев сплавов. Одним из недостатков традиционной XTO является крупнозернистая структура, формирующаяся в результате воздействия высокой температуры и длительной выдержки, что приводит к снижению ударной вязкости упрочняемого материала [1 – 5]. Достижение высокой ударной вязкости возможно путем получения мелкого зерна. Цель данной работы заключалась в исследовании влияния печного термоциклирования и других видов термической обработки на измельчение зерна для повышения ударной вязкости эвтектоидной стали, подвергнутой XTO.

Материалы и методы

В качестве материала исследования выбрана инструментальная углеродистая

стали У8А. Стальные образцы подвергались XTO в герметичных контейнерах при 1000 $^{\circ}$ C в течение 6 ч в порошке феррованадия. Затем образцы извлекались, очищались от остатков насыщающей смеси и подвергались термической обработке. Конечной структурой всех видов проводимой в работе термической обработки являлся зернистый перлит. Отжиг проводился по следующим режимам: 1) нагрев до 740 - 760 °C, выдержка, непрерывное охлаждение с печью до 600 °C со скоростью 30 – 50 °C / ч с дальнейшим охлаждением на воздухе; 2) нагрев до 740 - 760 °C, выдержка, охлаждение до температуры 650 °C, выдержку при этой температуре, охлаждение с печью до $600~^{\circ}$ C со скоростью $30-50~^{\circ}$ C / ч, а далее на воздухе. Графики приведены на рисунке 1.

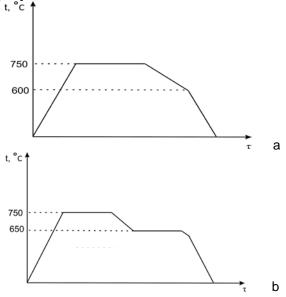


Рисунок 1 — Графики отжига на зернистый перлит эвтектоидной стали: нагрев до 740 — 760 $^{\circ}$ C, выдержка, охлаждение с печью до 600 $^{\circ}$ C; охлаждение на воздухе (а); нагрев до 740 — 760 $^{\circ}$ C, выдержка, охлаждение до температуры 650 $^{\circ}$ C, выдержка, охлаждение с печью до 600 $^{\circ}$ C; охлаждение на воздухе (b)

Нагрев при печном термоциклировании обеспечивался путем закладки образцов в

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ ПОСЛЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ

печь, разогретую до 900 °C. Для определения скорости нагрева к помещенному в печь образцу подводилась термопара (ХА), подключенная к мультиметру. Считывая показания термопары, определили скорость нагрева (3 °C / сек.) и время, необходимое для прогрева образцов. Графики термоциклирования стали У8А представлены на рисунке 2. Тер-

моциклическая обработка заключалась в нагреве образцов исследуемой стали до температуры 900 $^{\circ}$ С для обеспечения условий формирования аустенита, последующем охлаждении на воздухе до температуры 600 – 650 $^{\circ}$ С, далее — охлаждение в воде. Было проведено 1, 3 и 5 циклов «нагрев — охлаждение» (рисунок 2).

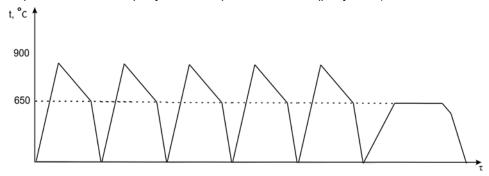


Рисунок 2 – График термоциклирования с 5 циклами и изотермическим отжигом на зернистый перлит эвтектоидной стали

Все режимы термоциклирования предусматривали на заключительной стадии отжиг стали на зернистый перлит при 650 0 C, с последующим охлаждением до 600 0 C на воздухе и далее – в воде.

Испытания образцов на ударный изгиб проводились при комнатной температуре на маятниковом копре в соответствии с ГОСТ 9454-78. В результате испытания определялась ударная вязкость материала, представляющая собой работу, затраченную на ударный излом образца, отнесенную к площади сечения в месте надреза.

Результаты и обсуждение

Предварительной термической обработкой любой инструментальной стали является отжиг. Детали из стали со структурой зернистого перлита обладают по сравнению с деталями со структурой пластинчатого перлита большей пластичностью и равномерным распределением твердости по сечению. Кроме того, структура зернистого перлита необходима для качественной закалки инструмента. Поэтому в качестве термической обработки после XTO рассматривались различные режимы, включающие отжиг на зернистый перлит. Выявление размеров зерна в эвтектоидной стали проблематично из-за отсутствия четких границ зерен, высокой степени разнозернистости, блочности, дисперсности структуры. Размер зерна перлита зависит в первую очередь от размера зерна аустенита. Чем крупнее зерна аустенита, тем большего размера образуются из них зерна перлита. Поэтому в работе определяли величину действительного зерна аустенита и на основе этого делали вывод о влиянии той или иной термической обработки на измельчение зерна после ХТО. Метод сетки троостита в соответствии с ГОСТ 5639 — 82 предпочтителен для сталей, близких по составу к эвтектоидным. Для образования сетки троостита образцы нагревали до температуры закалки, выдерживали и охлаждали погружением в воду до половины образца, вторая половина охлаждалась на воздухе. Границы зерен выявляются темнотравящейся сеткой троостита в переходной зоне образца (рисунок 3).

Для сравнительного анализа применяли также оценку размера действительного аустенитного зерна по изломам. Известно, что размеры мартенсита совпадают с размерами аустенита. Образцы (КСU) после ХТО и последующей термической обработки по указанным режимам нагревали до температуры закалки, выдерживали и охлаждали в воде для получения структуры мартенсита. Размеры аустенитного зерна определяли по изображениям изломов (рисунок 4).

Как видно из представленных рисунков, наибольшее измельчение зерна после XTO достигается при термоциклировании с 3-мя циклами. Для количественной оценки методом измерения длин хорд были построены гистограммы распределения размера зерна (рисунок 5).

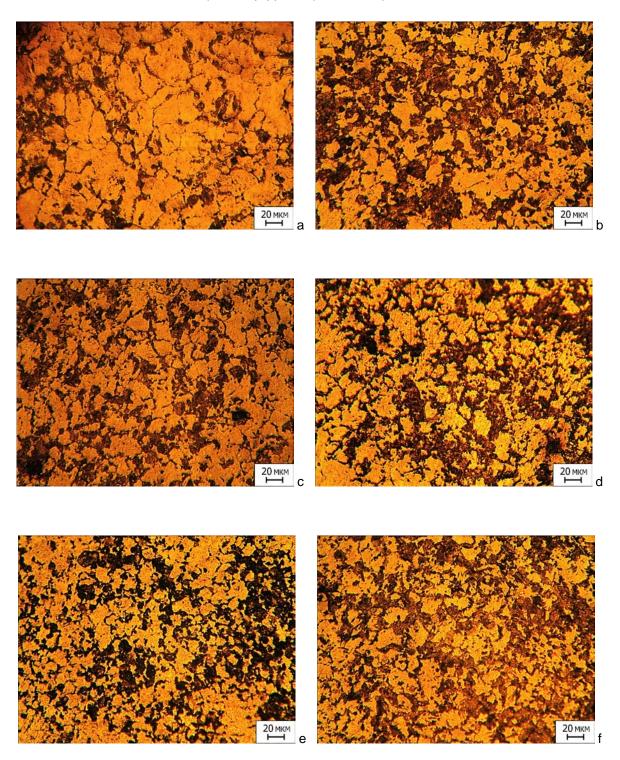


Рисунок 3 – Микроструктуры эвтектоидной стали с трооститной сеткой: а) после XTO (1000 0 C, 6 ч); b) после XTO и отжига по режиму: выдержка при 740 – 760 0 C, охлаждение с печью до 600 0 C; c) после XTO и отжига по режиму: выдержка при 740 – 760 0 C, охлаждение до 650 0 C, выдержка при 650 0 C; d) охлаждение; после XTO, 1 цикла ТЦО и отжига с выдержкой при 650 0 C; e) после XTO, 3 циклов ТЦО и отжига с выдержкой при 650 0 C; f) после XTO, 5 циклов ТЦО и отжига с выдержкой при 650 0 C

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ ПОСЛЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ

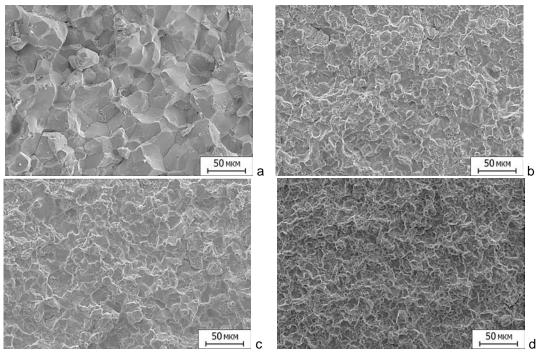


Рисунок 4 – Изломы эвтектоидной стали с мартенситной структурой: а) после XTO (1000 0 C, 6 ч.); b) после XTO и отжига по режиму: выдержка при 740 – 760 0 C, охлаждение с печью до 600 0 C; c) после XTO и отжига по режиму: выдержка при 740 – 760 0 C, охлаждение до 650 0 C, выдержка при 650 0 C, охлаждение; d) после XTO, 3 циклов TЦO и отжига с выдержкой при 650 0 C

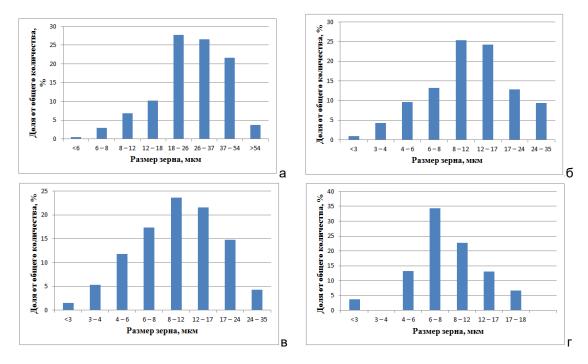


Рисунок 5 – Гистограммы распределения размера зерна: а – после XTO ($1000\,^{\circ}$ C, 6 ч.); б – после XTO и отжига по режиму: выдержка при $740-760\,^{\circ}$ C, охлаждение с печью до $600\,^{\circ}$ C; в – после XTO и отжига по режиму: выдержка при $740-760\,^{\circ}$ C, охлаждение до $650\,^{\circ}$ C, выдержка при $650\,^{\circ}$ C, охлаждение; г – после XTO, 1 цикла TЦO и отжига с выдержкой при $650\,^{\circ}$ C; д – после XTO, 3 циклов ТЦО и отжига с выдержкой при $650\,^{\circ}$ C; е – после XTO, 5 циклов ТЦО и отжига с выдержкой при $650\,^{\circ}$ C

Анализ гистограмм показывает, что после XTO, проведенной при $1000\,^{0}$ C в течение 6 ч, сталь У8А имеет крупные зерна с размерами 18-26 мкм и 26-37 мкм, также присутствуют зерна с размерами 37-54 мкм. Величина действительного аустенитного зерна после XTO соответствует G7-G8 по ГОСТ 5639-82, при TЦO с 3-мя циклами величина зерна составляет G11-G10.

Инструменты, подвергаемые XTO, в процессе эксплуатации часто подвергаются динамическому воздействию. Для проверки способности материала сопротивляться ударным нагрузкам и выявления склонности к хрупкому разрушению проводили испытания на удар.

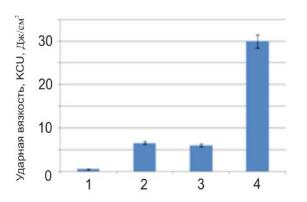


Рисунок 6 – Зависимость ударной вязкости стали У8А в зависимости от режимов химикотермической и термической обработки: 1 – после XTO; 2 – после XTO и отжига по режиму: выдержка при $740-760\,^{0}\mathrm{C}$, охлаждение с печью до $600\,^{0}\mathrm{C}$; 3 – после XTO и отжига по режиму: выдержка при $740-760\,^{0}\mathrm{C}$, охлаждение до $650\,^{0}\mathrm{C}$, выдержка при $650\,^{0}\mathrm{C}$, охлаждение; 4 – после XTO, 3 циклов ТЦО и отжига с выдержкой при $650\,^{0}\mathrm{C}$

Сталь У8А, подвергнутая ХТО при высоких температуре и длительности, имеет низкий показатель ударной вязкости (0,5 Дж/см²). При сравнении результатов испытаний, приведенных на рисунке, можно сделать вывод о том, что ТЦО с 3 циклами существенно повышает ударную вязкость стали У8А по сравнению со стандартными видами отжига. Так, показатели ударной вязкости после отжигов на зернистый перлит с выдержками при 740 – 760 $^{\circ}$ C и 650 $^{\circ}$ C составляет 6,5 – 6 Дж/см². Показатель ударной вязкости эвтектоидной стали после ХТО и последующей ТЦО (3 цикла) с изотермическим отжигом на 650 $^{\circ}$ C составляет 30 Дж/см².

Выводы

Эвтектоидная сталь, подвергнутая диффузионному насыщению в порошке феррованадия при 1000 °C в течение 6 ч, имеет крупнозернистую структуру с действительным аустенитным зерном размерами, соответствующими номерам G7 – G8.

Исследовано влияние 2-х видов отжига на зернистый перлит и ТЦО с 1, 3 и 5 циклами на структуру и свойства эвтектоидной стали, подвергнутой ХТО. Показано положительное влияние отжига на зернистый перлит и циклического теплового воздействия на измельчение зерна и уровень ударной вязкости эвтектоидной стали, подвергнутой диффузионному насыщению при высокой температуре и длительной выдержке.

Установлено, что максимальное измельчение действительного аустенитного зерна с 26-37 мкм до 6-8 мкм (G11 – G10) происходит при ТЦО с 3-мя циклами, а при дальнейшем отжиге с выдержкой при $650\,^{0}$ Спластинчатый перлит переводится в зернистый.

Установлено, что ТЦО с 3 циклами эвтектоидной стали, подвергнутой ХТО при $1000~^{0}$ С в течение 6 часов, приводит к существенному повышению уровня ударной вязкости (0,5 Дж/см² до 30 Дж/см²) по сравнению с отжигом на зернистый перлит (в 4,6 – 5 раз).

Список литературы

- 1. Fedyukin V.K., Smagorinsky M.E. Thermocycling of metals and machine parts. L.: Mechanical Engineering, 1989. 255 p. (in Russian) [Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. Л.: Машиностроение, 1989. 255 c.]
- 2. Lygdenov B.D., Kharaev Y.P., Greshilov A.D., Guriev A.M. Thermocycling. Structure and properties. Barnaul, 2014. (in Russian) [Лыгденов Б.Д., Хараев Ю.П., Грешилов А.Д., Гурьев А.М. Термоциклирование. Структура и свойства. Барнаул, 2014.]
- 3. I. G. Sizov, U. L. Mishigdorzhiyn, D. M. Maharov: 'A study of thermocycling boroaluminizing of carbon steel, Metal Science and Heat Treatment, 2012, 53, (11-12), 592-597
- 4. Perspective Diffusion Coatings. Lygdenov B.D., Guriev A.M., Mosorov V.I., Butukhanov V.A. Raleigh, North Carolina, USA, 2015. (in Russian) [Перспективные диффузионные покрытия. Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Мосоров В.И., Бутуханов В.А. Raleigh, North Carolina, USA, 2015.]
- 5. Mordasov D.P., Zotov S.V. Thermal Cycling of Hot-Forming Dies Made from X12MФ steel, Vestnik TGTU, 2016, 22, № 3, р. 481 490 (in Russian) [Д. П. Мордасов, С. В. Зотов. Термоциклическая обработка штампов для работы в условиях горячего деформирования из стали X12МФ // Вестник ТГТУ. 2016. Том 22. № 3. С. 481 490.]

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ ПОСЛЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ

- 6. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Попова Н.А., Козлов Э.В. Физические основы химикотермоциклической обработки сталей. Барнаул, 2008, 250 с.
- 7. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гармаева И.А., Гурьев М.А. Диффузионное термоциклическое упрочнение поверхности стальных изделий бором, титаном и хромом. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2007. Т. 4. № 1. С. 30-35.
- 8. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Власова О.А., Иванов С.Г., Козлов Э.В., Гармаева И.А. Фазовый состав и механизм образования диффузионного слоя при борировании сталей в условиях циклического теплового воздействия. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 1. С. 20-27.
- 9. Иванов С.Г., Гармаева И.А., Андросов А.П., Зобнев В.В., Гурьев А.М., Марков В.А. Фазовые превращения и структура комплексных боридных покрытий. // Ползуновский вестник. 2012. № 1-1. С. 106-108.
- 10.Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А., Земляков С.А. Новый способ диффузионного термоциклического упрочнения поверхностей железоуглеродистых сплавов. // Ползуновский альманах. 2008. № 3. С. 10-16.
- 11.Гурьев М.А., Иванов С.Г., Кошелева Е.А., Иванов А.Г., Грешилов А.Д., Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Околович Г.А. Комплексное диффузионное упрочнение тяжелонагруженных деталей машин и инструмента. // Ползуновский вестник. 2010. № 1. С. 114-121.
- 12.Гурьев М.А., Фильчаков Д.С., Гармаева И.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Околович Г.А. Технология нанесения многокомпонентных упрочняющих покрытий на стальные детали. // Ползуновский вестник. 2012. № 1-1. С. 73-78.
- 13..Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Власова О.А. Совершенствование технологии химикотермической обработки инструментальных сталей. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2009. № 1. С. 14-15.
- 14.Гурье́в А.М., Иванов С.Г., Гармаева И.А. Диффузионные покрытия сталей и сплавов. Барнаул, 2013.
- 15.Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г., Хараев Ю.П., Лыгденов Б.Д., Земляков С.А., Гурьева О.А., Колядин А.А., Попова О.В. Термоциклическое и химикотермоциклическое упрочнение сталей. // Ползуновский вестник. 2005. № 2-2. С. 36-43.
- 16.Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Махаров Д.М., Мосоров В.И., Черных Е.В., Гурьева О.А., Иванов С.Г. Особенности формирования структуры диффузионного слоя на литой стали при химикотермической обработке. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2005. Т. 2. № 1. С. 39-41.
- 17.Кошелева Е.А., Гурьев А.М. Оптимизация химического состава насыщающих смесей при диффузионном борировании инструментальных сталей. // Международный журнал прикладных и

- фундаментальных исследований. 2009. № 5. C. 76-77.
- 18.Гурьев А.М., Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Особенности формирования диффузионного слоя при термоциклическом борировании углеродистой стали. В книге: Эволюция дефектных структур в конденсированных средах сборник тезисов докладов 5-ой Международной школысеминара. 2000. С. 149-150.
- 19.Лыгденов Б.Д., Хараев Ю.П., Грешилов А.Д., Гурьев А.М. Термоциклирование. Структура и свойства. Барнаул, 2014.
- 20.Гурьев А.М., Козлов Э.В., Жданов А.Н., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Изменение фазового состава и механизм формирования структуры переходной зоны при термоциклическом борировании феррито-перлитной стали. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2001. № 2. С. 58.
- 21.Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М. Влияние состава насыщающей среды на структуру и свойства диффузионного слоя при титанировании сталей. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2000. Т. 43. № 11. С. 269.
- 22. Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Гармаева И.А., Мижитов А.Ц., Мосоров В.И. Особенности формирования структуры диффузионного слоя и разработка технологии упрочнения литых инструментальных сталей с учетом дендритной ликвации. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2006. Т. 3. № 3. С. 84-86.
- 23.Гурьев А.М., Хараев Ю.П., Гурьева О.А., Лыгденов Б.Д. Исследование процессов диффузии в стали при циклическом тепловом воздействии. // Современные проблемы науки и образования. 2006. № 3. С. 65-66.
- 24.Гурьев А.М., Иванов С.Г., Лыгденов Б.Д., Земляков С.А., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А. Способ упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей. Патент на изобретение RUS 2345175 03.04.2007
- 25. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Власова О.А. Интенсификация процессов химико-термической обработки металлов и сплавов. // Фундаментальные исследования. 2008. № 8. С. 10.
- 26.Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Мосоров В.И., Инхеев Б.С. Распределение атомов бора и углерода в диффузионном слое после борирования стали 08КП. // Современные наукоемкие технологии. 2006. № 5. С. 35-36.
- 27.Гармаева И.А., Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Власова О.А. Исследование влияния различных факторов при борировании на механические свойства стали с применением математической модели. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 10. С. 30-32.
- 28.Гурьев М.А., Гурьев А.М., Иванов А.Г., Иванов С.Г. Анализ влияния природы легирующих элементов в высоколегированных сталях на процессы комплексного многокомпонентного диффузионного борирования. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2010. № 5. С. 155-157.

29.Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г., Власова О.А., Гармаева И.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А. Новые методы диффузионного термоциклического упрочнения поверхности стальных изделий бором совместно с титаном и хромом. // Успехи современного естествознания. - 2007. - № 10. - С. 84-85.

30.Власова О.А., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Кошелева Е.А., Гурьев А.М. Повышение прочности диффузионных карбоборидных покрытий термоциклированием в процессе их получения. // В сборнике: Наука и молодежь - 2007 (НиМ - 2007) Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь - 2007" (НиМ-2007). - 2007. - С. 110-112.

31.Иванов С.Г., Гурьев А.М., Кошелева Е.А., Власова О.А., Гурьев М.А. Исследование процессов диффузионного насыщения сталей из смесей на основе карбида бора. // Современные наукоемкие технологии. - 2008. - № 3. - С. 33.

32.Гурьев А.М., Власова О.А., Лыгденов Б.Д., Гармаева И.А., Кириенко А.М., Иванов С.Г., Кошелева Е.А. Термоциклическое борирование как метод повышения прочности инструментальных сталей. // Ползуновский альманах. - 2007. - № 1-2. - С. 85-88.

33.Гурьев А.М., Иванов С.Г., Земляков С.А., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А. Способ упрочнения деталей из штамповых сталей. Патент на изобретение RUS 2360031 18.07.2007

34.Власова О.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Кошелева Е.А., Чех С.А. Оптимизация многокомпонентной химико-термической обработки стали 30Х. // Современные наукоемкие технологии. - 2008. - № 3. - С. 32.

35.Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г., Хараев Ю.П., Лыгденов Б.Д., Черных Е.В. Циклическое тепловое воздействие при термической и химикотермической обработке инструментальных сталей. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2005. - Т. 2. - № 3. - С. 37-45.

36.Лыгденов Б.Д., Гармаева И.А., Попова Н.А., Козлов Э.В., Гурьев А.М., Иванов С.Г. Исследование фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированных сталей 20Л, 45, 55 И 5ХНВ. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2012. - Т. 9. - № 4-2. - С. 681-689.

37.Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Гармаева И.А. Влияние режимов борирования на упрочнение поверхности уплотнительного кольца из стали 40ХН2МА. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2007. - Т. 4. - № 2. - С. 90-93.

38.Гурьев А.М., Иванов С.Г., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А., Лыгденов Б.Д. Способ упрочнения стальных деталей. Патент на изобретение RUS 2381299 12.05.2008

39.Гурьев М.А., Кошелева Е.А., Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Галаа О. // Перспективные методы получения упрочняющих покрытий. - Барнаул, 2016.

40.Гурьев А.М., Околович Г.А., Чепрасов Д.П., Земляков С.А. Способ термоциклической обработки инструментальной стали. Патент на изобретение RUS 2131469 06.05.1998.

41.Mei Shunqi, Lygdenov B., Huang J, Zheng W.L., Dong Y.J., Liu C., Butukhanov V. The microstructure and properties of the coating with vanadium borides on carbon steel by use of electron beam in vacuum treatment/ Proceeding of the 4th 2016International Conference on Material Science and Engineering (ICMSE 2016). AER Advances Engineering Research. T.101. 302-307 c.

42.Mei Shunqi, Dong Y.J.A.M. Guriev, Zheng W.L., ,Chao Liu., S.G. Ivanov, M.A. Guriev, T.G. Ivanova, E.V. Chernykh.Morphology and Wear Resistance of Multicomponent Diffusion Coatings/ Proceeding of the 4th 2016 International Conference on Material Science and Engineering (ICMSE 2016). AER Advances Engineering Research. T.101. 308-313 c.

Лыгденов Бурьял Дондокович ^{1, 2} – д. т. н., профессор Мэй Шунчи ² – профессор Бутуханов Вячеслав Александрович ¹ – инженер ЦКП Гурьев Алексей Михайлович ^{2, 3} – д. т. н., профессор Цыдыпов Булат Саянович ¹ – аспирант Люи Чао ² – аспирант Кошелева Елена Алексеевна ³ – к. т. н., доцент

ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» (ВСГУТУ), г. Улан-Удэ, Россия
Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

³ ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия