

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
*«Металлургия – 2022»***

***Труды
XXIII Международной научно-практической конференции
23– 25 ноября 2022 г.***

Часть 1

**Новокузнецк
2022**

Редакционная коллегия

д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,
д.т.н., профессор С.В. Коновалов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., доцент Д.А. Чинахов,
к.т.н. Р.А. Шевченко, к.т.н., доцент О.А. Полях,
к.т.н. Е.Н. Темлянцева, д.т.н., доцент В.В. Зимин

М 540 Металлургия : технологии, инновации, качество : труды
XXIII Международной научно-практической конференции.
В 2 частях. Часть 1 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр.
ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2022. – 390 с. : ил.

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и практики металлургических процессов, технологий обработки материалов, автоматизации, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов металлургического производства.

Конференция проводится ежегодно.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

АДМИНИСТРАЦИЯ ПРАВИТЕЛЬСТВА КУЗБАССА
ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

АО «РУСАЛ-НОВОКУЗНЕЦК»

АО «КУЗНЕЦКИЕ ФЕРРОСПЛАВЫ»

АО «НЗРМК им. Н.Е. КРЮКОВА»

ЛЯОНИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ, Г. АНЫШАНЬ, КНР

ОАО «ЧЕРМЕТИНФОРМАЦИЯ»

ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ»

ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК СИБГИУ»

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР МИРОВОГО УРОВНЯ «КУЗБАСС»

АО «КУЗБАССКИЙ ТЕХНОПАРК»

ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТА Ti/TiB, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ <i>Озеров М.С., Поволяева Е.А., Громашова Д.В., Волокитина Е.И.</i>	298
ТЕРМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПРЕССОВОК ИЗ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА <i>Прудников А.Н., Прудников В.А., Рексис В.С.</i>	303
ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА В КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ <i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Жибинова И.А.</i>	310
ПРИМЕНЕНИЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ <i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Прудников А.Н., Жибинова И.А.</i>	315
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ МАРКИ К76Ф НА УДАРНУЮ СТОЙКОСТЬ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ <i>Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В., Сафонов С.О.</i>	323
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С ДОБАВКАМИ ДИОКСИДА ТИТАНА <i>Хамид. Махан М., Коновалов С.В., Куценко А.А., Цветков А.В., Панченко И.А.</i>	327
ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ <i>Васильев А.А., Колбасников Н.Г.</i>	332
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОКАТКИ РЕЛЬСЫ В НЕПРЕРЫВНОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ QFORM <i>Белопищевская Е.С., Соловьев В.Н.</i>	341
УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРУКТУРОЙ ТРУБНЫХ МАРК СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ <i>Колбасников Н.Г., Жуков Н.В.</i>	348
ПРИЧИНЫ И МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ТИПА «МОРЩИНА» ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ СОРТОВОЙ СТАЛИ <i>Колбасников Н.Г., Адигамов Р.Р., Шишов И.А., Зайцев А.М.</i>	356
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СПЛАВЫ СЕРИИ AL-MG-Si С ИЗБЫТКОМ КРЕМНИЯ И НЕБОЛЬШИМИ ДОБАВКАМИ СКАНДИЯ И ЦИРКОНИЯ <i>Арышенский Е.В., Лапшов М.А., Солопаев М.В., Коновалов С.В.</i>	367
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ РЕЛЬСОВ <i>Сарычев В.Д., Филяков А.Д., Чумаков И.И., Коновалов С.В.</i>	374
ВЛИЯНИЕ МЕДИ НА СТРУКТУРУ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ СПЛАВОВ AL – 40%Si <i>Афанасьев В. К., Попова М.В., Малюх М.А.</i>	379

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА В КИСЛОРОДСОДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Афанасьев В.К.¹, Попова М.В.¹, Жибинова И.А.²

¹*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, m.popova@rdtc.ru*

²*Кузбасский гуманитарно-педагогический институт КемГУ,
г. Новокузнецк, Россия*

Аннотация. Показано, что использование предварительного нагрева в стекле в интервале ($A_{c1} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) – A_{c1} для сталей марок 50 и 40Х приводит к формированию структуры с дисперсным зернистым перлитом и измельченными выделениями избыточного феррита. Установлено, что прочность возрастает в 1,2–1,3 раза при сохранении пластичности. Надежность полученных оценок характеристик механических свойств подтверждена результатами статистического анализа.

Ключевые слова: конструкционная сталь, термическая обработка, внешняя среда, микроструктура, механические свойства.

EVALUATION OF IMPACT OF PRE-HEATING IN OXYGEN- CONTAINING MEDIUM ON MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL STEELS

Afanasyev V.K.¹, Popova M.V.¹, Zhibinova I.A.²

¹*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, m.popova@rdtc.ru*

²*Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute KemGu,
Novokuznetsk, Russia*

Abstract. It has been shown that the use of preheating in glass in the range ($A_{c1} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) – A_{c1} for structural steels leads to the formation of a structure with dispersed granular pearlite and crushed emissions of excess ferrite. It was found that the strength increases 1.2-1.3 times while maintaining plasticity. The reliability of the obtained estimates of the characteristics of mechanical properties is confirmed by the results of statistical analysis.

Keywords: structural steel, heat treatment, external medium, microstructure, mechanical properties.

Одним из важнейших способов повышения прочностных свойств конструкционных сталей является термическая обработка – закалка с последующим отпуском. Однако традиционные виды термической обработки не все-

гда удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к конструкционным материалам. Это привело к появлению комбинированных технологий, совмещающих различные принципы воздействия на металл в процессе формирования полуфабрикатов и изделий [1]. К ним относятся химико-термическая, термомеханическая и термоциклическая обработки, а также совмещение термической обработки и физических методов воздействия, таких как лазерное облучение, обработка ультразвуком, обработка электромагнитным полем [2–5].

Известно, что состав внешней среды оказывает существенное влияние на формирование структуры и физико-механических свойств металлических сплавов [6]. Проведены исследования, подтверждающие активное участие среды нагрева в формировании структуры и свойств металлических сплавов при термической обработке. Установлено, что влияние внешней среды определяется тем, насколько сильно она изменяет соотношение в сплавах элементов внедрения – водорода, азота, кислорода и углерода. Термическая обработка в средах с повышенным содержанием водорода и азота ускоряет протекание фазовых превращений в алюминиевых и железных сплавах, поскольку активизирует диффузию водорода в них [7–9]. Повышенное содержание кислорода во внешней среде также ускоряет диффузионные процессы внутри металла при термической обработке. Доступной средой с повышенным содержанием кислорода является измельченное бутылочное стекло, представляющее собой смесь оксидов. В этом случае в качестве предварительного режима термической обработки прутков из конструкционных сталей вместо сфероидизирующего отжига можно использовать нагрев в стекле в интервале ($A_{c1}-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) – A_{c1} с последующим охлаждением на воздухе [10].

Исследование влияния предварительной термической обработки в стекломассе на микроструктуру и механические свойства проводили на образцах, выточенных из прутков сталей марок 50 и 40Х. В качестве режима предварительной термической обработки использовали нагрев образцов в стекле в интервале ($A_{c1}-30^{\circ}\text{C}$)– A_{c1} , выдержку при заданной температуре и охлаждение на воздухе.

Образцы из стали помещали в контейнер и засыпали измельченным до порошкообразного состояния стеклом. Химический состав бутылочного стекла (масс. %): 60, 4 % SiO_2 , 13,9% Na_2O , 11,8 % Al_2O_3 , 6,7 % CaO , 2,5% K_2O , 1,4 % Fe_2O_3 , 1,4 % TiO_2 , 1,3 % MnO_4 , 0, 3 % MgO , 0,3 % SO_3 . Контейнеры загружали в печь, нагретую до заданной температуры, и выдерживали в течение 1 часа. Охлаждение контейнера проводили на воздухе. По окончании предварительной обработки стекло механически удаляли с поверхности образцов. Для сравнения в качестве предварительной термической обработки проводили отжиг при температуре 750°C . Окончательная термическая обработка включала закалку и низкий отпуск. Нагрев проводили в печах сопротивления типа СНОЛ. Контроль температуры осуществляли с помощью термопары хромель-алюмель. Микроструктуру образцов изучали при помощи металлографического микроскопа OPTON при увеличении 500.

Характеристики механических свойств сталей – временное сопротивление, относительное удлинение и относительное сужение определяли методом статических испытаний на растяжение согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение». Испытания цилиндрических образцов проводили на разрывной машине УММ-5 при обычной температуре. На каждый режим обработки использовали по 20–25 образцов.

В случае, если разрыв образца происходил по рискам, в захватах испытательной машины или за пределами расчетной длины образца (при определении относительного удлинения), а также по дефектам металлургического производства, результаты испытаний при дальнейшей обработке данных не учитывали.

Статистическую обработку результатов механических испытаний проводили по известным методикам вычисления выборочных числовых характеристик при малом объеме выборки ($n < 50$) и проверки статистических гипотез в режимах «Описательная статистика» Microsoft Excel.

Рассчитывали выборочные числовые характеристики механических свойств, такие как среднее значение, медиана, выборочная дисперсия, выборочное среднее квадратическое отклонение, выборочный коэффициент вариации и доверительные интервалы с уровнем надежности 95 %.

При первичной обработке статистического материала, полученного в результате испытаний, принимая гипотезу о нормальном распределении опытных результатов, проверяли наличие выбросов по критерию Смирнова при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Для этого характеристики механических свойств располагали в виде вариационных рядов, то есть упорядоченными по мере возрастания и рассчитывали статистики u_1 и u_n первого или максимального члена вариационного ряда соответственно.

В случае, если вычисленные значения u_1 и u_n превышали критическое значение $u_{\alpha=0,05}$ элемент выборки признавался аномальным и исключался из массива. Для полученной выборки сокращенного объема цикл вычислений статистических показателей и процедуру проверки наличия выбросов повторяли.

Для стали 50 проводили предварительную термическую обработку в стекле по трем режимам: при 700, 720 и 730 °С, затем осуществляли закалку в воду от 830 °С и отпуск при 180 °С. Механические свойства стали 50 после различных режимов термической обработки приведены в таблице 1.

Для стали 40Х предварительную термическую обработку в стекле проводили при 715, 725 и 740 °С, затем осуществляли закалку от 850 °С в масло и отпуск при 180 °С.

Режимы термической обработки и механические свойства образцов из стали 40Х приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Механические свойства образцов из стали 50 после термической обработки

Ре- жим	Предваритель- ная термо- обработка	Окончатель- ная термооб- работка	Механические свойства (средние значения)		
			Временное сопротив- ление, σ_B , [МПа]	Относительное удлинение, δ , [%]	Относи- тельное сужение, Ψ , [%]
I	700°C, стекло	закалка от 830°C в воду и отпуск при 180°C	2003	5,5	39,1
II	720°C, стекло		2032	5,6	38,7
III	730°C, стекло		2087	5,4	37,7
IV	750°C, воздух		1527	5,9	37,1

Таблица 2 – Механические свойства образцов из стали 40X после термической обработки

Режим	Предварительная термообработка	Окончательная термообработка	Механические свойства (средние значения)		
			Времен- ное сопротив- ление, σ_B , [МПа]	Относительное удлинение, δ , [%]	Относительное сужение, Ψ , [%]
I	715°C, стекло	закалка от 850°C в масле и отпуск при 180°C	2082	5,5	38,6
II	725°C, стекло		1991	5,7	40,1
III	740°C, стекло		2014	5,6	36,5
IV	750°C, воздух		1620	5,8	36,4

Приведенные в таблицах 1 и 2 данные позволяют утверждать, что в случае проведения предварительной термической обработки в стекле (режимы I – III) среднеуглеродистая сталь 50 и низколегированная сталь 40X после закалки и отпуска имеют более высокую прочность по сравнению с обычным отжигом (режим IV). Временное сопротивление сталей возрастает в 1,2–1,3 раза, при этом относительное удлинение и относительное сужение не уменьшаются.

О надежности полученных оценок характеристик механических свойств свидетельствуют рассчитанные статистические показатели полученных по результатам испытаний рядов данных. Так, во всех случаях наблюдается удовлетворительная однородность выборок, коэффициент вариации в

рядах данных не превышает 0,04. Надежность средней величины в выборках подтверждается также наблюдаемым незначительным отклонением средних значений от медианы. Предельная ошибка выборки (уровень надежности Δ) при $R_{\text{дов}} = 0,95$ не превышает значений: ± 20 МПа - временное сопротивление; $\pm 0,1$ % - относительное удлинение; $\pm 1,1$ % - относительное сужение.

Изучение особенностей микроструктуры образцов, термически обработанных по режимам I – IV, позволило объяснить повышение их прочностных свойств после обработки в стекле. По результатам металлографического анализа было установлено, что в случае проведения предварительной термической обработки в стекле в сталях изученных марок формируется более мелкозернистая феррито-перлитная структура. Диспергирование структурных составляющих происходит вследствие того, что внешняя среда с повышенным содержанием кислорода ускоряет диффузию водорода внутри металла и меняет соотношение Н-С-N-O в нем [8]. В результате повышается диффузионная активность углерода и после обработки по изученным режимам в сталях формируется структура с дисперсным зернистым перлитом и мелкими округлыми зёрнами феррита. Такая структура при нагреве под закалку обеспечивает быстрое образование гомогенного аустенита и замедление роста аустенитного зёрна, что ведет к образованию мелкоиглочатого мартенсита после закалки.

Выводы

1. Оценка воздействия предварительного нагрева в кислородсодержащей среде на механические свойства конструкционных сталей показала, что при проведении предварительной термообработки в кислородсодержащей среде прочность стали увеличивается в 1,2–1,3 раза по сравнению с предварительным отжигом в воздушной среде, причем комплекс характеристик пластичности остается примерно на том же уровне.

2. Надежность полученных оценок характеристик механических свойств сталей после предварительной термообработки в кислородсодержащей среде подтверждена результатами статистического анализа.

Библиографический список

1. Малинов Л.С. Нетиповые режимы термической и деформационно-термической обработок, повышающие свойства сталей / Л.С. Малинов // Металлургия машиностроения. – 2018. – № 1. – С. 43–48.

2. Афанасьев В.К. Влияние термоциклической деформации и отжига на структуру и удельное электрическое сопротивление стали марки СтЗпс / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников, М.В. Попова, В.А. Прудников // Актуальные проблемы в машиностроении: сборник материалов 1-ой Международной научно-практической конференции. – Новосибирск, 2014. – С. 431–434.

3. Тарасова Т.В. Влияние тепловых полей на структуру коррозионно-стойких сталей при различных схемах лазерной обработки / Т.В. Тарасова, А.В. Гусаров, К.Э. Протасов, А.А. Филатова // Металловедение и термиче-

ская обработка металлов. – 2017. – №7 (745). – С. 37–44.

4. Яровчук А.В. Влияние малоциклового термоциклической обработки на коррозионные и механические свойства облученной нейтронами коррозионно-стойкой стали 12X18H10T / А.В. Яровчук, О.П. Максимкин, К.В. Цай // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2017. – №7 (745). – С. 49–56.

5. Счастливцев В.М. Влияние внешних воздействий и магнитного поля на мартенситное превращение в сталях и сплавах / В.М. Счастливцев, Ю.В. Калетина, Е.А. Фокина // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2016. – № 5 (731). – С. 3–9.

6. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов: монография / Г.В. Карпенко. – Киев: Наукова думка, 1976. – 127 с.

7. Afanasyev V.K. Effect of melt treatment with water vapor on thermal expansion of alloy Al – 20–40% Si / Afanasyev V.K., Popova M.V., Dolgova S.V., Gorshenin A.V., Malyukh M.A. // Metallurgist. – 2019. – Т. 63. – № 1-2. – С. 87-95.

8. Афанасьев В.К. Воздействие внешней среды на формирование свойств алюминиевых сплавов при термической обработке / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, В.В. Герцен, С.В. Долгова, В.А. Лейс // Обработка металлов. – 2013. – № 4 (61). – С. 28–34.

9. Афанасьев В.К. О новом понимании микроструктуры чистого железа / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, М.В. Попова, С.В. Магазов, А.П. Черныш // Металлургия машиностроения. – 2017. – № 2. – С. 29–33.

10. Afanasyev V.K. Improving Strength of Structural Steels by Preheating in an Oxygen-Containing Medium / V. Afanasyev, M. Popova, I. Zhibinova // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 946. – P. 58-62.

УДК 669.715'788.017

ПРИМЕНЕНИЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ

Афанасьев В.К.¹, Попова М.В.¹, Прудников А.Н.¹, Жибинова И.А.²

¹*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, m.popova@rdtc.ru*

²*Кузбасский гуманитарно-педагогический институт КемГУ,
г. Новокузнецк, Россия*

Аннотация. Установлено, что горячая пластическая деформация модифицированных заэвтектических силуминов с 15–30 % Si способствует диспергированию и сфероидизации первичных и эвтектических частиц кремнистой фазы. При этом значительно повышаются их механические свойства: временное сопротивление возрастает в 1,5 – 1,8 раза, относительное удлинение увеличивается в 2-4 раза по сравнению с литым состоянием.

Ключевые слова: силумины, обработка расплава, водород, кремний,