

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Шабуровой Наталии Александровны
«Научно-технологические основы термодиффузионного хромирования конструкционных сталей с добавками эмиттеров в насыщающую смесь», представленной на соискание
ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

В настоящее время перед отечественным машиностроением и нефтегазовой отраслью стоит острая задача повышения ресурса ответственных деталей и узлов, работающих в условиях агрессивных сред, высоких температур и интенсивного износа. Технология термодиффузионного хромирования (ТДХ) является одним из наиболее эффективных методов поверхностного легирования, однако существующие промышленные решения характеризуются большой длительностью процесса насыщения и необходимостью высокотемпературных нагревов, приводящих к нежелательным структурным изменениям в обрабатываемом металле. В этой связи разработка энергоэкономных подходов к интенсификации диффузионных процессов при ТДХ без применения внешних источников энергии представляет собой крайне актуальную и практически значимую научно-техническую задачу. Диссертационная работа Шабуровой Н.А., направленная на разработку научно-технологических основ термодиффузионного хромирования конструкционных сталей с добавками эмиттеров в насыщающую смесь, является весьма актуальным и своевременным исследованием, открывающим новое направление в области химико-термической обработки.

Научная новизна работы заключается в установлении и экспериментальном подтверждении возникновения термоэмиссионного тока в насыщающих смесях при температурах ТДХ, а также в выявлении линейной взаимосвязи между силой этого тока и глубиной формирующегося диффузионного слоя хрома. Впервые определены температуры начала термоэмиссии для широкого круга металлических (W, Mo, Ni, FeTi и др.) и оксидных (CaWO_4 , $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_7$, $\gamma\text{-2CaO}\cdot\text{SiO}_2$, TiO_2 и др.) добавок. Предложен и теоретически обоснован физический механизм ускорения диффузионных процессов за счёт создания в насыщающей смеси двух сонаправленных потоков – диффузионного и термоэмиссионного. Обоснована конструкция кумулятивной решётки, обеспечивающей дополнительное усиление диффузионно-эмиссионного потока и увеличение глубины диффузионного слоя в 1,2–1,8 раза. Установлено, что для многокомпонентных оксидных добавок сила термоэмиссионного потока не определяется аддитивным эффектом, а её оценка эффективно осуществляется методом Бокса-Уилсона.

Теоретическая и практическая значимость работы не вызывают сомнений. Разработанные научно-технологические основы ТДХ с добавками эмиттеров позволяют целенаправленно управлять размерами, фазовым составом и механическими свойствами формирующихся покрытий без применения дополнительного оборудования и внешних источников энергии, что обеспечивает возможность реализации технологии на существующих производственных мощностях. Предложенная конструкция измерительной ячейки для непрерывного мониторинга кинетики изменения термоэмиссионного тока в объёме насыщающей смеси является оригинальным методическим решением, не имеющим аналогов. Использование оксидных добавок-эмиттеров позволяет снизить содержание хрома в технологической засыпке, что

способствует экономии легирующих материалов и улучшению выбиваемости деталей. Разработанные технические решения защищены четырьмя патентами РФ на изобретение. Результаты работы успешно апробированы в производственных условиях на участке химико-термической обработки ООО «ВИКА-ГАЛ» при термодиффузионном хромировании втулок топливного насоса высокого давления из стали 25Х5М, что подтверждено соответствующим актом внедрения.

Достоверность полученных результатов подтверждается значительным объёмом экспериментальных исследований с использованием комплекса современных взаимодополняющих методов металловедческого анализа, включающего оптическую и растровую электронную микроскопию с энергодисперсионным микроанализом, рентгенофазовый анализ, микроиндентирование и термогравиметрический анализ. Эксперименты проводились на современном аттестованном оборудовании с обеспечением статистической значимости результатов (оценка размеров покрытия не менее чем на трёх участках каждого образца). Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, включая конференции в Курске, Челябинске, Ялте и Воронеже. Результаты работы опубликованы в 23 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 2 статьях в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, а также защищены 4 патентами РФ на изобретение. Структура и объём работы (362 страницы, 116 рисунков, 68 таблиц, 345 источников литературы, 4 приложения) свидетельствуют о глубокой и всесторонней проработке темы.

Тем не менее к работе есть следующие замечания:

1. В автореферате подробно описан физический механизм ускорения диффузионных процессов под действием термоэмиссионного потока, однако недостаточно глубоко раскрыты атомарные процессы, протекающие непосредственно на границе раздела «насыщаемая поверхность – газовая фаза» при совместном воздействии диффузионного и термоэмиссионного потоков. В частности, следовало бы более детально обсудить, каким образом дополнительные свободные электроны влияют на энергию активации диффузии хрома в решётке γ -железа и меняется ли при этом механизм диффузии (объёмная, по границам зёрен, по дислокациям) по сравнению с классическим ТДХ.
2. В работе продемонстрирована высокая эффективность кумулятивных решёток для интенсификации процесса насыщения, однако в автореферате недостаточно полно освещены вопросы их долговечности и стабильности работы при многократном использовании в условиях длительного высокотемпературного нагрева (1000–1150 °С). Представляется целесообразным более подробно обсудить деградационные процессы в материале решёток (окисление, эрозия, изменение геометрии отверстий) и их влияние на воспроизводимость результатов при промышленном применении.
3. Несмотря на убедительную демонстрацию линейной зависимости глубины диффузионного слоя хрома от силы термоэмиссионного тока для условий насыщения при 1000 °С в течение 1 и 24 часов, в автореферате не в полной мере обсуждены границы применимости установленных закономерностей. В частности, остаётся неясным, сохраняется ли линейный характер этой зависимости при существенно иных температурах ТДХ (например, 900 °С или 1150 °С) и при значительно большей длительности выдержки, что важно для прогнозирования поведения технологии при масштабировании на промышленные режимы.

Указанные замечания носят дискуссионный характер, не снижают общей высокой оценки диссертационной работы и не влияют на её научную и практическую значимость.

Диссертация «Научно-технологические основы термодиффузионного хромирования конструкционных сталей с добавками эмиттеров в насыщающую смесь», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, полностью отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, изложенным в п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней. Работа представляет собой завершённое научное исследование, содержащее решение крупной научно-технической задачи, имеющей существенное значение для развития технологии химико-термической обработки конструкционных сталей.

Автор работы, Шабурова Наталия Александровна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Технический директор

ООО «Ласмет», к.т.н. по специальности

05.16.01 - «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

На обработку персональных данных согласен.

Мазничевский Александр Николаевич

10.09.2026 г.

Подпись заверяю

Главный бухгалтер



Рябухина Татьяна Александровна

Адрес: 454047, Российская Федерация, Челябинская область, г. Челябинск,

ООО «Ласмет», ул. 2-я Павелецкая, д. 18,

e-mail: chieftch@lasmet.ru, тел. +7 (351) 735-97-12