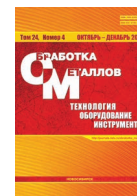




Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Проблемы исследования остаточных напряжений в упрочненном поверхностном слое инструментальных штамповых сталей после диффузионного бороалитирования

Николай Улаханов^{1, 2, a, *}, Александр Тихонов^{3, b}, Ундрах Мишигдоржийн^{1, c},
 Владимир Иванцовский^{4, d}, Никита Вахрушев^{4, e}

¹ Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Сахьяновой 6, г. Улан-Удэ, 670047, Россия

² Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, ул. Ключевская 40В, г. Улан-Удэ, 670013, Россия

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, г. Иркутск, 664074, Россия

⁴ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-0635-4577>, nulahanov@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-4917-9916>, tihonovalex90@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7863-9045>, undrakh@ipms.bscnet.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-9244-225X>, ivancivskij@corp.nstu.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0002-2273-5329>, vah_nikit@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.011

История статьи:

Поступила: 28 сентября 2022

Рецензирование: 14 октября 2022

Принята к печати: 03 ноября 2022

Доступно онлайн: 15 декабря 2022

Ключевые слова:

Химико-термическая обработка (ХТО)

Бороалитирование

Остаточные напряжения

Штамповая сталь

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовом обеспечении гранта Российского Научного Фонда (проект 19-79-10163-П).

Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Диффузионное бороалитирование позволяет обеспечить на поверхности штамповых сталей повышенные эксплуатационные свойства, такие как износостойкость, высокая твердость и коррозионная стойкость. Упрочняющие технологии могут вносить значительный вклад в возникновение на поверхности технологических остаточных напряжений. Применительно к диффузионному бороалитированию работы по исследованию напряженного состояния отсутствуют. **Цель настоящей работы** заключается в разработке метода определения технологических остаточных напряжений (ТОН) в диффузионных слоях на поверхности штамповых сталей 5ХНМ и 3Х2В8Ф после бороалитирования механическим методом и исследование характера их распределения. **В работе рассмотрены** результаты экспериментальных исследований по определению нормальных компонентов ТОН механическим методом в диффузионных слоях штамповых сталей. Проведенные в рамках данной работы исследования показали, что при рассматриваемых видах химико-термической обработки (ХТО) указанных сталей в целом происходит образование растягивающих ТОН по глубине упрочненного слоя, что является неблагоприятным фактором. **Результаты и обсуждения.** Рассмотрены основные методы определения ТОН в поверхностном слое после упрочнения методами ХТО инструментальных штамповых сталей 3Х2В8Ф и 5ХНМ. Выявлены проблемы при определении ТОН механическим методом на установке УДИОН-2, предложено их решение. Показана целесообразность использования метода анодного растворения для непрерывного удаления напряженных слоев с образцов при исследовании ТОН механическим методом на установке УДИОН-2 в образцах после ХТО. Для процесса анодного растворения подобран оптимальный состав электролита, состоящий из $\text{NaNO}_3 - 60 \text{ г/л}$; $\text{NaNO}_2 - 5 \text{ г/л}$; $\text{Na}_2\text{CO}_3 - 5 \text{ г/л}$; $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3 - 15 \text{ г/л}$; H_2O – остальное. Выявлены распределения нормальных компонентов ТОН в диффузионном слое образцов из штамповых сталей. Установлено, что при ХТО указанных сталей в поверхностном слое происходит образование преимущественно растягивающих ТОН. Дальнейшие исследования будут направлены на выработку мер для снижения растягивающих ТОН при диффузионном бороалитировании штамповых сталей.

Для цитирования: Проблемы исследования остаточных напряжений в упрочненном поверхностном слое инструментальных штамповых сталей после диффузионного бороалитирования / Н.С. Улаханов, А.С. Тихонов, У.Л. Мишигдоржийн, В.В. Иванцовский, Н.В. Вахрушев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 18–32. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-18-32.

*Адрес для переписки

Улаханов Николай Сергеевич, м.н.с.

Институт физического материаловедения

Сибирского отделения Российской академии наук,

ул. Сахьяновой 6,

670047, г. Улан-Удэ, Россия

Тел.: 8 (3012) 43-48-70, e-mail: nulahanov@mail.ru

Введение

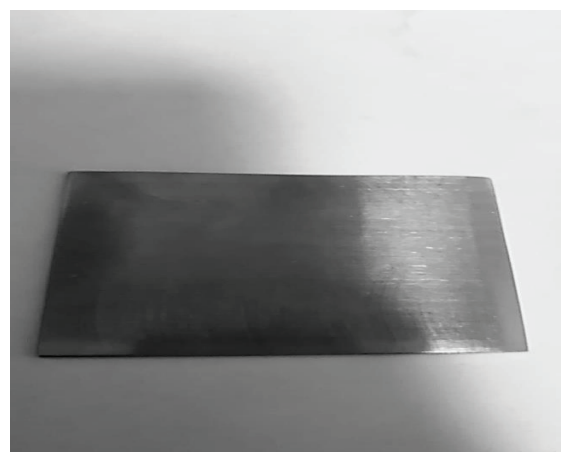
Химико-термическая обработка (ХТО) металлов широко используется для повышения механических свойств деталей машин и инструментов [1]. Науглероживание, хромирование и азотирование являются термохимическими процессами, которые улучшают износостойкость и коррозионную стойкость компонентов [2–12]. Одной из эффективных технологий модификации поверхностных слоев штамповых сталей может служить многокомпонентная ХТО, такая, как бороалитирование, позволяющая в значительной мере увеличить сопротивление износу, а также повысить жаростойкость, коррозионную стойкость и ряд других свойств поверхностных слоев деталей машин и инструмента [13–16]. Срок службы изделий после упрочнения в значительной степени зависит от распределения технологических остаточных напряжений (ТОН) в диффузионном слое и прилегающих слоях материала подложки и от общего характера микроструктуры всего участка, измененного в процессе ХТО [8, 17–20]. Контроль и управление ТОН является одной из важнейших задач технологии машиностроения [21, 22]. Следовательно, в разработке Fe-Me-B-покрытий методами диффузионного насыщения на поверхности стальных изделий усилия должны быть направлены на поиск распределений ТОН, улучшающих эксплуатационные свойства изделий.

Известно, что исследование напряженно-деформационного состояния (НДС) борированных слоев может осуществляться методами разрушающего и неразрушающего контроля [23–26].

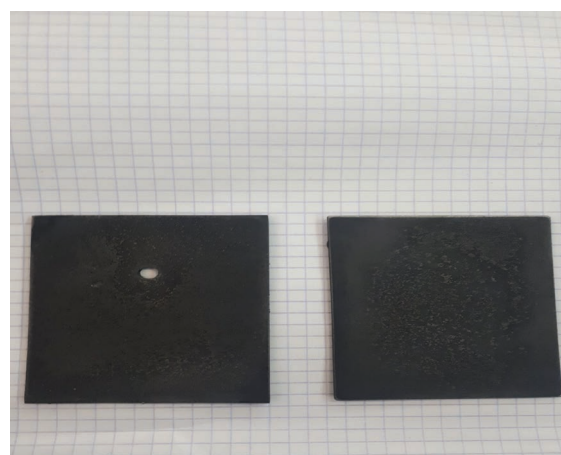
В нашей работе [27] были представлены первые данные по оценке напряженного состояния боридных слоев. В данной работе выполнен обзор методов определения ТОН, которые могут применяться после упрочняющей ХТО, в частности, в Fe-Me-B-покрытиях в поверхностном слое углеродистых и легированных сталей, а также рассмотрены проблемы измерения остаточных напряжений механическим методом и их решение. Представлены результаты экспериментальных исследований по выявлению распределения ТОН в диффузионных слоях инструментальных сталей 3Х2В8Ф и 5ХНМ после высокотемпературного бороалитирования (ВБА).

Методика исследований

ХТО осуществляли в насыщающих пастах, содержащих порошки карбида бора, алюминия и фторида натрия в качестве активатора следующего состава: 80 % B_4C + 16 % Al + 4 % NaF [15]. Образцы с размерами в плане 80×60 мм и толщиной 1,8 мм (рис. 1, а) – из инструментальной стали 5ХНМ и 3Х2В8Ф (см. табл. 1 и 2). После утрамбовки формы удаляли, а полученные брикеты просушивали при температуре 50...100 °С в течение двух часов в сушильной камере. После этого брикеты загружали в предварительно нагретую до температуры обработки печь. Длительность обработки составляла 2 ч, температура – 950 и 1050 °С. Охлаждение образцов проводили вне печи на спокойном воздухе при комнатной температуре. Образец после ХТО представлен на рис. 1, б.



а



б

Рис. 1. Образцы-пластины

Fig. 1. Flat samples

Таблица 1

Table 1

Химический состав стали 5ХНМ, % мас.
Chemical composition of 5CrNiMo steel, wt. %

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	Cu
						не более		
0,50...0,60	0,10...0,40	0,50...0,80	0,50...0,60	0,15...0,30	1,40...1,80	0,03	0,03	0,30

Таблица 2

Table 2

Химический состав стали 3Х2В8Ф, % мас.
Chemical composition of 3Cr2W8V steel, wt. %

C	Si	Mn	W	V	Cr	Ni	P	S	Cu
							не более		
0,3...0,4	0,15...0,4	0,15...0,4	8,5...10,0	0,3...0,6	2,2...2,7	до 0,35	0,03	0,03	0,03

Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе «МЕТАМ РВ-34» с цифровой камерой «*Altami Studio*».

Напряженное состояние боридных покрытий после ХТО измеряли с помощью установки для определения остаточных напряжений УДИОН-2 (рис. 2), разработанной в ИРНТУ [23–27].

Из исходных образцов-пластин вырезали элементарные образцы-полоски на отрезном станке Discotom-10 фирмы Struers с помощью абразивного дискового отрезного круга с применением обильного охлаждения (рис. 3, а). Вырезку полосок проводили во взаимно перпендикулярном направлении вдоль осей X и Z (рис. 3, б), номинальная длина полосок составляла 60 мм, ширина – 8 мм.

После вырезки образцов-полосок измерялись их геометрические параметры (ширина *b* и толщина *h*), стрела прогиба и исходная масса. Эти данные необходимы для последующего расчета ТОН.

Образцы-полоски монтировались в приспособления установки УДИОН-2 и производилось их электрохимическое травление (анодное растворение) в электролите состава № 3 (табл. 4) с одновременной записью деформации образца в режиме реального времени. После травления образцы демонтировались и повторно взвешива-

лись, по формуле $\bar{V}_{\text{тр}} = \frac{1000\Delta m}{S_{\text{рт}}}$ определялась

средняя скорость травления. Завершающим этапом являлся расчет ТОН в программе XUDion [28] и построение эпюр распределения ТОН.

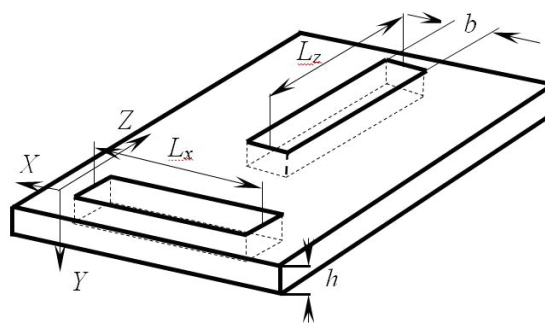


Рис. 2. Установка для измерения остаточных напряжений механическим методом УДИОН-2

Fig. 2. Installation for measuring residual stresses by mechanical method (UDION-2)



а



б

Рис. 3. Вырезка элементарных образцов-полосок из исходных пластин

Fig. 3. Cutting elementary samples-strips from initial plates

Результаты и их обсуждение

Проблема исследования технологических остаточных напряжений механическим методом

Обозначим проблемы, связанные с измерением остаточных напряжений механическим методом после упрочняющей ХТО. Определение ТОН механическим методом на установке УДИОН-2 [23–28] связано с регистрацией перемещений элементарных образцов-полосок (при измерении остаточных напряжений в пластинах) в процессе удаления напряженных слоев исследуемого материала в функции толщины удаленного слоя. Удаление напряженных слоев с исследуемой поверхности в данной установке реализовано посредством химического травления – постепенного растворения материала в растворах электролитов. В основном составы электролитов, используемые при химическом травлении, представляют собой комбинацию растворов неорганических кислот с водой. При этом для обеспечения точности и минимизации погрешности измерения необходимо обеспечить следующие параметры качества поверхности в процессе травления: низкую шероховатость, отсутствие питтинга, подтравов под защитным покрытием, ямок, непотравов, а также по возможности добиться постоянства скорости травления на протяжении всего процесса. Для стабильного протекания процесса и установления оптимальной продолжительности эксперимента рекомендуемая скорость травления должна составлять 0,005...0,01 мм/мин.

При обработке изделий методами ХТО [1; 13–16] поверхностный слой металла приобретает следующие свойства:

- понижение магнитной проницаемости;
- увеличение электросопротивления;
- увеличение жесткости при кручении;
- увеличение твердости;
- повышение износостойкости;
- повышение коррозионной стойкости, в частности, кислотостойкости.

Последнее свойство делает затруднительным исследование ТОН в изделиях, подвергающихся рассматриваемым видам ХТО, по крайней мере, при химическом травлении в кислотных растворах. Для подтверждения этого нами был проведен ряд исследований по химическому травлению тестовых образцов из стали 3Х2В8Ф после бороалитирования в различных составах кислотных электролитов (табл. 3). Тестовые образцы были изготовлены в виде полосок длиной 60 мм, шириной 8 мм и толщиной 1,7 мм. Травлению подвергалась площадь в 80 мм², для защиты остальной части образца использовали каучуковую эмаль. Травление производилось в малом объеме электролита, не превышающем 200 мл, в термостатирующей ванне установки УДИОН-2 с контролем средней скорости удаления слоев (травления), рассчитываемой по формуле [29]

$$\bar{V}_{\text{тр}} = \frac{1000 \Delta m}{S \rho t} \text{ (мм/мин),}$$

где Δm – масса удаленного материала, г; S – площадь поверхности, с которой удалялся материал, мм²;

Составы электролитов, параметры и результаты химического травления образцов после ХТО
 Electrolyte compositions, parameters, and results of chemical etching of samples after CTT

Номер состава	Состав электролита	t , °C	$\bar{V}_{\text{тр}}$, мм/мин	Комментарий
1	(г/л): HF – 30; H ₂ SO ₄ – 150; H ₂ O – остальное	23	–	Признаки травления практически отсутствуют
2	(г/л): HF – 120; H ₂ SO ₄ – 590; H ₂ O – остальное	35	0,0014	Поверхность темно-серая с большими количествами непротравов (рис. 4, а)
3	(% об.): HF – 10; H ₂ SO ₄ – 8; HNO ₃ – 9; H ₂ O – остальное	35	0,0076	Черная рельефная поверхность с многочисленными буграми и впадинами небольшого размера (рис. 4, б)
4	(% об.): HCl – 565; HNO ₃ – 237; NaF – 30; H ₂ O – остальное	37	0,0063	Серая волнистая поверхность с непротравом посередине (рис. 4, в)

ρ – плотность материала, г/см³; τ – время испытания (травления), мин.

В качестве исходного электролита был взят состав № 1 (табл. 3) [29], данный электролит показал плохой результат, поверхность образца при этом практически не травилась. Состав № 2 получен увеличением концентрации компонентов

состава № 1 с повышением температуры раствора. Состав № 3 является модификацией предыдущего состава с добавлением азотной кислоты в качестве окислителя. Состав № 4 ориентирован на химическую размерную обработку сталей [30]. Состояние поверхности образцов после химического травления представлено на рис. 4.



Рис. 4. Поверхность образцов в результате химического травления образцов из стали 3Х2В8Ф после ХТО:

а – состав № 2; б – состав № 3; в – состав № 4

Fig. 4. The surface of specimens as a result of chemical etching of specimens made of 3Cr2W8V steel after CTT:

a – composition No. 2; б – composition No. 3; в – composition No. 4

Как видно из экспериментов, химическое травление не дает приемлемых результатов, поэтому для послойного удаления материала с образцов, обработанных ХТО, при исследовании ТОН на установке УДИОН-2 было предложено применить электрохимическое травление, в частности, анодное растворение.

Удаление материала при электрохимической обработке происходит под действием электрического тока в среде электролита. В основе процесса электрохимической обработки лежит явление анодного растворения металлов. Анодное растворение может протекать в электролитах разного состава, в том числе и неагрессивных – водных растворах солей, которые дешевле и безвредны [31, 32] по сравнению с кислотными.

Под действием электрического тока в электролите материал анода, коим является исследуемый образец, растворяется в виде продуктов обработки. Катод при этом не изнашивается, что является одной из положительных особенностей процесса. В результате реакций на катоде про-

исходит выделение водорода, на аноде – осадка в виде нерастворимого гидроксида металла и кислорода. Нерастворимый гидроксид зашламляет электролит и снижает производительность процесса. В связи с этим необходимо предусмотреть процессы регенерации и очистки электролита от продуктов реакции (отстаивание, фильтрация, декантация).

Для отработки процесса, параметров и состава электролита был проведен ряд исследований по анодному растворению образцов из стали 3Х2В8Ф после ХТО (табл. 4). Для этого в термостатирующую ванну установки УДИОН-2 была помещена электрохимическая ячейка (рис. 5), состоящая из химического стакана на 250 мл, свинцового катода, к которому подведен отрицательный вывод источника тока, и анода-образца, подключенного к положительному выводу источника. В качестве источника питания электрохимической цепи был использован лабораторный источник постоянного тока Mastech NY3010 с регулировкой выходного напряжения в диапазоне

Таблица 4

Table 4

Составы электролитов, параметры и результаты электрохимического травления (анодного растворения) образцов после ХТО

Electrolyte compositions; parameters, and results of electrochemical etching (anodic dissolution) of samples after CTT

Номер состава	Состав электролита	$t, ^\circ\text{C}$	Плотность тока $j, \text{А/дм}^2$	Напряжение $U, \text{В}$	$\bar{V}_{\text{тр}}, \text{мм/мин}$	Комментарий
1	(% вес.): $\text{KNO}_3 - 12$; $\text{NaF} - 2$; $\text{NaCl} - 1$; $\text{H}_2\text{O} - \text{остальное}$	30	75	5	0,0062	Поверхность темно-серая, гладкая, ровная в центре, по краям небольшая волнистость (рис. 6, а)
2	(% вес.): $\text{H}_3\text{PO}_4 - 49,5$; $\text{H}_2\text{SO}_4 - 40$; $\text{H}_2\text{O} - \text{остальное}$	32	100	8,5	0,007	Поверхность фактурная светлая с металлическим блеском, случай электролитического полирования (рис. 6, б)
3	(г/л): $\text{NaNO}_3 - 60$; $\text{NaNO}_2 - 5$; $\text{Na}_2\text{CO}_3 - 5$; $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3 - 15$; $\text{H}_2\text{O} - \text{остальное}$	30	100	10	0,0056	Поверхность темно-серая, матовая ровная, гладкая с единичными незначительными микровыступами (рис. 6, в)

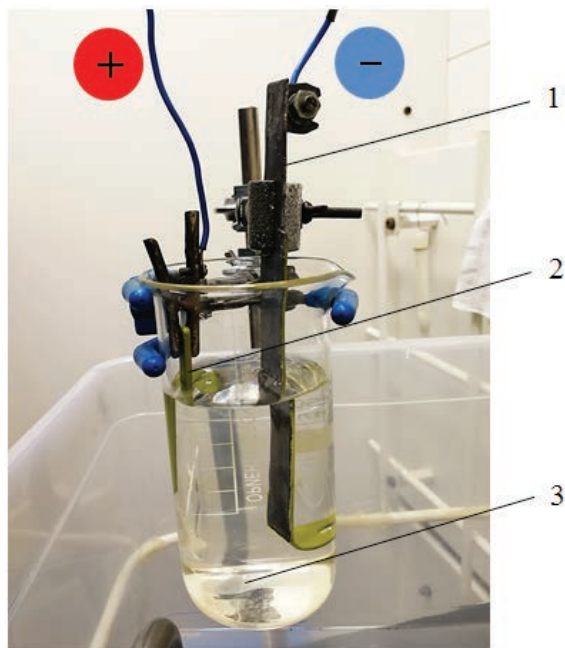


Рис. 5. Электрохимическая ячейка для обработки процесса анодного растворения:
1 – катод (свинцовая пластина); 2 – анод (образец); 3 – химический стакан с раствором электролита

Fig. 5. Electrochemical cell for testing the process of anodic dissolution:
1 – cathode (lead plate); 2 – anode (sample); 3 – beaker with electrolyte solution

0...30 В при выходном токе 0...10 А, с функцией источника стабилизированного тока. Как и в случае химического травления при анодном растворении рассчитывали среднюю скорость удаления слоев по приведенной выше формуле.

Состав № 1 (см. табл. 4) [30], рекомендуемый для электрохимической размерной обработки инструментальных сталей, в целом показал неплохие результаты, за исключением небольшой волнистости поверхности (рис. 6, а). Состав № 2 [29] дает блестящую, хотя и фактурную, ровную поверхность (рис. 6, б), но только для этого типа стали. Состав № 3, рекомендуемый для абразивно-электрохимической обработки металлов [33], показал хорошие результаты, поверхности образцов матовые, ровные, серого цвета с минимальной шероховатостью (рис. 6, в).

Проведенные подготовительные исследования показали, что для послойного удаления материала при исследовании ТОН механическим методом в образцах после диффузионного бор-алитирования наиболее приемлемые результаты дает процесс анодного растворения. Следует отметить, что в каждом конкретном случае подбор состава электролита и необходимых электрических и температурных режимов производится

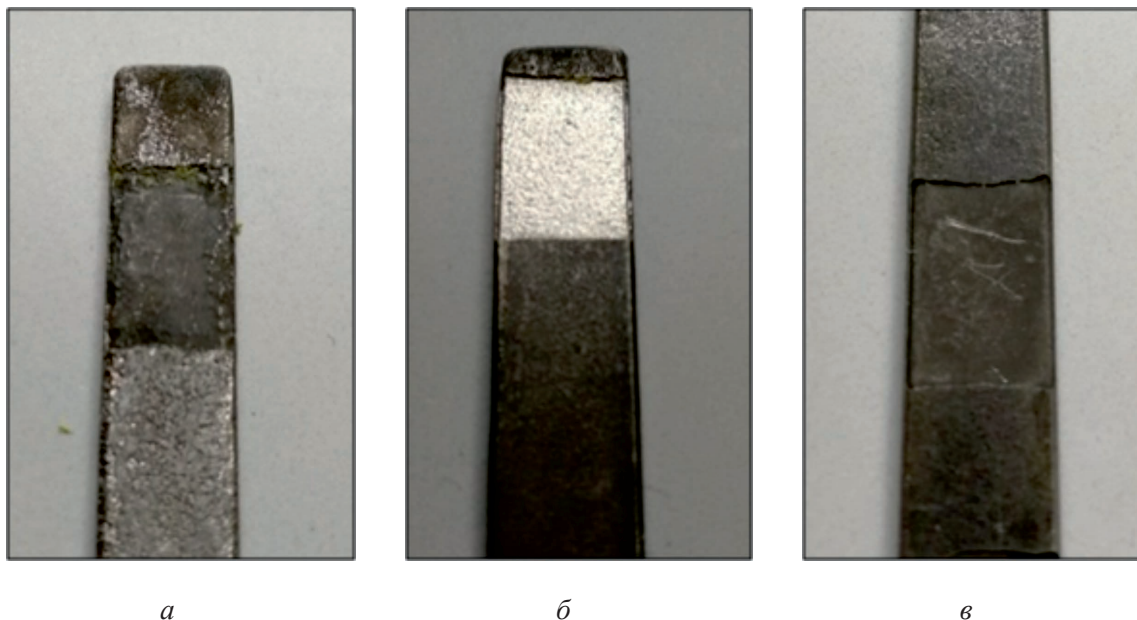


Рис. 6. Поверхность образцов в результате электрохимического травления (анодного растворения) образцов из стали 3X2B8Ф после ХТО:
а – состав № 1; б – состав № 2; в – состав № 3

Fig. 6. The surface of specimens as a result of electrochemical etching of specimens made of 3Cr2W8V steel after CTT:
а – composition No. 1; б – composition No. 2; в – composition No. 3

индивидуально под каждый материал с учетом вида его обработки, данная процедура трудоемка и требует наличия тестовых образцов для обработки процесса.

В проведенных исследованиях лучший результат показал состав электролита № 3 для анодного растворения (см. табл. 4). Этот электролит также показал хорошие результаты и при анодном растворении поверхностного слоя образцов из стали 5ХНМ после ХТО. Для управления процессом анодного растворения материала, в частности, установления необходимой его скорости, может быть применена корректировка температуры электролита и электрических параметров процесса (напряжения, анодной плотности тока).

Исследование технологических остаточных напряжений после диффузионного бороалитирования

В контрольных образцах после отжига (рис. 7) на поверхности наблюдаются ТОН сжатия: у 5ХНМ (рис. 7, а) они составляют $-325 \dots -570$ МПа с резким подъемом и установлением околонулевых значений с глубины $0,05 \dots 0,075$ мм; у стали 3Х2В8Ф (рис. 7, б) в пределах $-155 \dots -235$ МПа. Причем эпюра ТОН после отжига пластины из 5ХНМ является самоуравновешенной (рис. 7, а).

После ХТО стали 5ХНМ при температуре 950 °С (рис. 8, а) формируется диффузионный слой $400 \dots 450$ мкм [15], в котором компоненты

ТОН растягивающие. На поверхности образца они принимают значения 210 МПа, на глубине $0,08$ мм достигают максимума в $620 \dots 687$ МПа и плавно снижаются, принимая на глубине $0,9$ мм нулевые значения. Глубина залегания ТОН в данном случае оценивается в пределах $0,5$ мм.

После ХТО стали 5ХНМ при температуре 1050 °С (рис. 8, б) формируются слои глубиной $750 \dots 900$ мкм [15], в которых компоненты ТОН растягивающие, на поверхности принимают околонулевые значения. Компонент σ_z имеет максимум в 436 МПа на глубине $0,05$ мм с дальнейшим общим трендом на спад, хотя и с незначительными повышениями значений на глубине $0,2$ и $0,375$ мм. Компонент σ_x имеет сначала резкий подъем до 250 МПа, а потом плавный до 330 МПа на глубине $0,2$ мм и далее общий тренд на спад с незначительным повышением значений на глубине $0,4$ мм. Глубина залегания ТОН в данном случае более $0,8$ мм.

Можно сказать, что у компонента σ_x как бы нет первого пикового значения, как в случае с σ_z , хотя незначительные области повышения значений при общем тренде на спад они имеют практически на одинаковых глубинах.

После ХТО стали 3Х2В8Ф при температуре 950 °С (рис. 9, а) при глубине диффузионного слоя до $130 \dots 150$ мкм [15] наблюдаются две зоны на эпюре ТОН: растягивающая и сжимающая, можно сказать, что эпюры ТОН в данном случае являются самоуравновешенными. На поверхности компоненты ТОН имеют значения

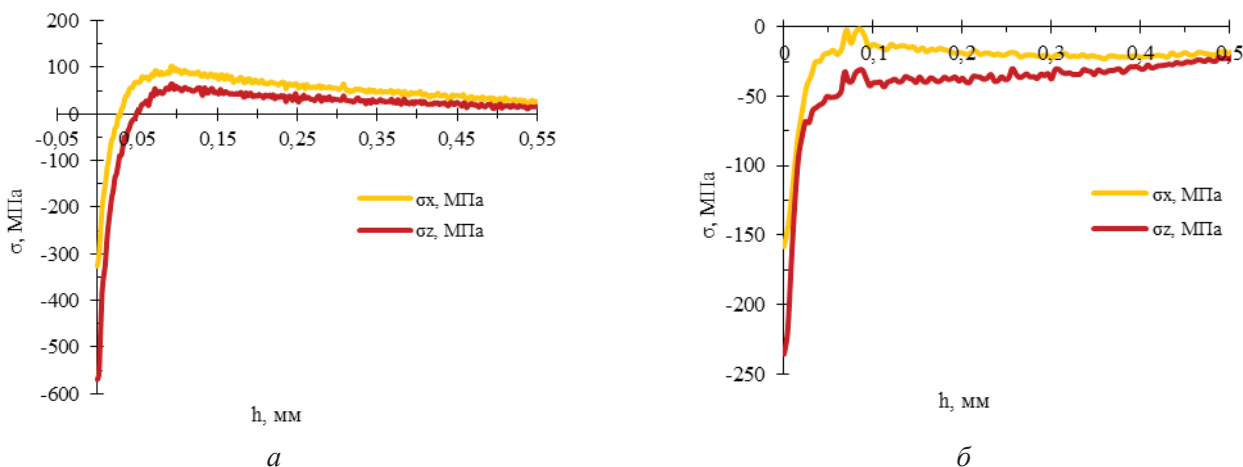


Рис. 7. Эпюры ТОН в пластинах после отжига:

а – на стали 5ХНМ после отжига при 790 °С; б – на стали 3Х2В8Ф после отжига при 880 °С

Fig. 7. Diagrams of residual stresses in a plate:

а – of steel 5CrNiMo after annealing at 790 °С; б – of steel 3Cr2W8V after annealing at 880 °С

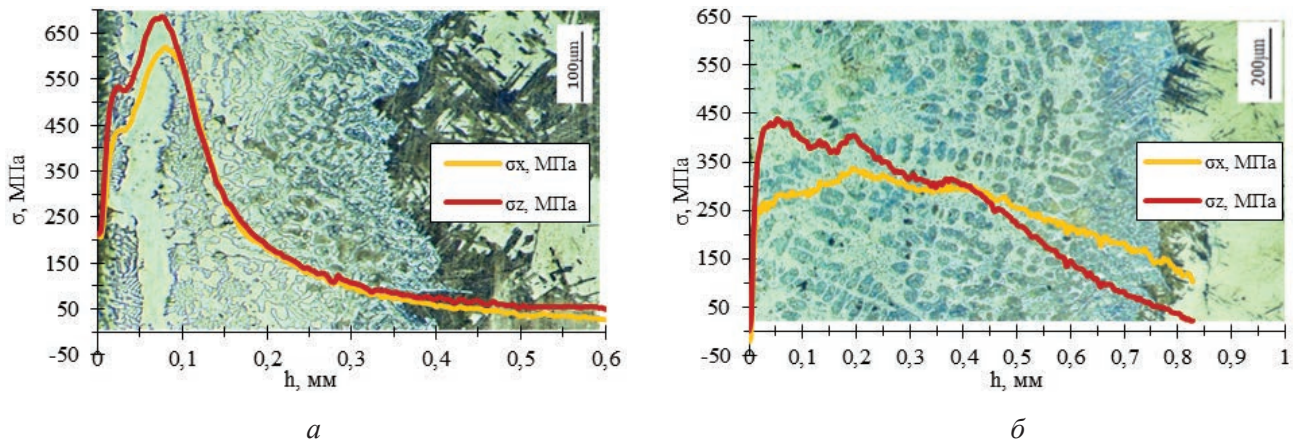


Рис. 8. Эпюры ТОН в пластине из стали 5ХНМ при температуре обработки:
 а – 950 °С; б – 1050 °С

Fig. 8. Diagrams of residual stresses in a plate made of 5CrNiMo steel at a treatment temperature:
 а – 950 °С; б – 1050 °С

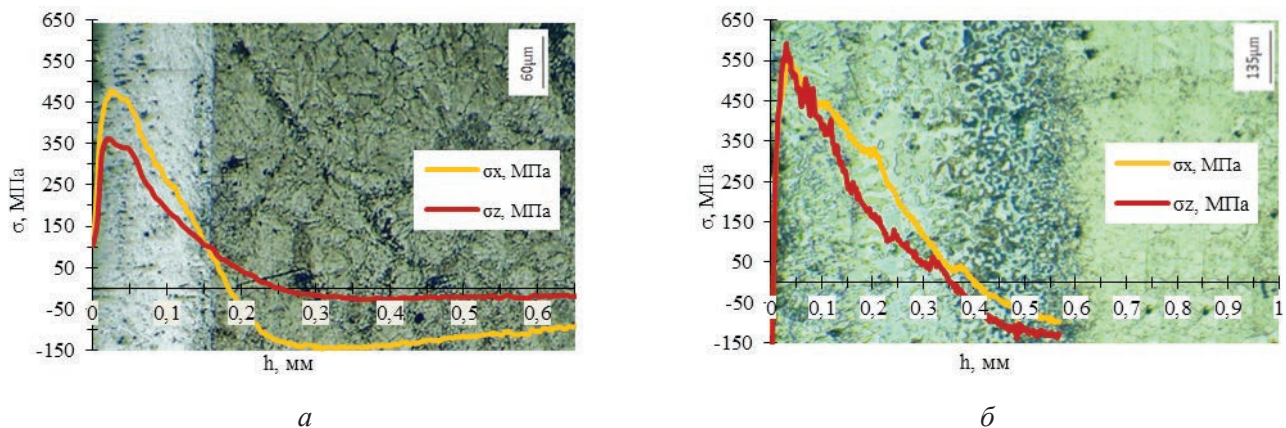


Рис. 9. Эпюры ТОН в пластине из стали 3Х2В8Ф при температуре обработки:
 а – 950 °С; б – 1050 °С

Fig. 9. Diagrams of residual stresses in a plate made of 3Cr2W8V steel at a processing temperature:
 а – 950 °С; б – 1050 °С

100 МПа и достигают максимума в 360...470 МПа на глубине 0,025 мм, далее происходит спад, и на глубине 0,18...0,25 мм они переходят в сжимающие ($\sigma_x = -150$ МПа на глубине 0,3 мм). Глубина залегания ТОН составляет при этом 0,3 мм.

После ВБА стали 3Х2В8Ф при температуре 1050 °С (рис. 9, б) в диффузионном слое глубиной до 500...600 мкм [15] компоненты ТОН на поверхности являются сжимающими со значениями $-125...-210$ МПа, но резко переходят в растягивающие и достигают максимума в 565 МПа на глубине 0,03 мм. Далее происходит плавный спад компонентов до нуля на глубине 0,35...0,4 мм и переход в сжимающую область

до $-100...-130$ МПа. Глубина залегания ТОН при этом составляет более 0,55 мм.

Так как процессы ХТО протекают во всем объеме материала и образуют плоское НДС однородного вида, т. е. любое направление в плоскости обработки является главным, то компоненты ТОН должны быть одинаковы во всех направлениях.

Подобные диффузионные слои, получаемые на поверхности сталей 5ХНМ и 3Х2В8Ф бороалитированием, можно классифицировать как композиционные слои с гетерогенной дисперсной морфологией расположения боридных кристаллов [35,36]. Данные слои характеризуются сложным распределением микротвердо-

сти по глубине, объясняемым градиентным распределением В, Al и легирующих элементов из стали-основы [15]. В работе [15] показано, что в результате ХТО на сталях 3Х2В8Ф и 5ХНМ при температуре 1050 °С и на стали 5ХНМ при температуре 950 °С на поверхности стали формируются диффузионные слои, в которых твердые структурные составляющие (бориды и карбиды) располагаются в матрице из пластичных фаз (алюминиды, твердые растворы алюминия и углерода в α -Fe). Получаемые свойства положительно влияют на износостойкость рабочей поверхности, однако остается малоизученным характер распределения ТОН в диффузионных слоях и их зависимость от структурно-фазового состояния, получаемого в результате упрочняющей ХТО.

Как известно, растягивающие ТОН являются неблагоприятными и могут привести к появлению трещин и разрушению изделия, усилению межкристаллитной коррозии, способствуют усталостному разрушению особенно для деталей, работающих при ударных и знакопеременных нагрузках. В данном случае необходимо предусмотреть комплекс мер для снижения растягивающих ТОН после ХТО или для образования благоприятных ТОН сжатия. В качестве таких мер могут быть предложены: последующая термическая обработка (отпуск), закалка с последующим отпуском, плазменная или лазерная обработка, проработка режимов и технологии ХТО, что будет являться продолжением дальнейших исследований.

Выводы

Рассмотрены основные методы определения ТОН в поверхностном слое после упрочнения методами ХТО инструментальных штамповых сталей 3Х2В8Ф и 5ХНМ. Выявлены проблемы при определении ТОН механическим методом на установке УДИОН-2 в образцах после диффузионного бороалитирования, предложено их решение. Показана целесообразность использования метода анодного растворения для непрерывного удаления напряженных слоев с образцов при исследовании ТОН механическим методом на установке УДИОН-2 в образцах после ХТО. Для процесса анодного растворения подобран оптимальный состав электролита, состоящий

из NaNO_3 – 60 г/л; NaNO_2 – 5 г/л; Na_2CO_3 – 5 г/л; $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ – 15 г/л; H_2O – остальное. Выявлены распределения нормальных компонентов ТОН в диффузионном слое образцов из штамповых сталей после бороалитирования. Установлено, что при ХТО указанных сталей в поверхностном слое происходит образование преимущественно растягивающих ТОН. Дальнейшие исследования будут направлены на выработку технологических способов для снижения растягивающих ТОН при диффузионном бороалитировании штамповых сталей.

Список литературы

1. Ворошин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А. Теория и технология химико-термической обработки. – М.: Новое знание, 2010. – 304 с. – ISBN 978-5-94735-149-1.
2. Gagandeep S., Gurbhinder B. Modification of EN9 steel surface by salt bath nitrocarburising process // Journal of Materials Science and Surface Engineering. – 2017. – Vol. 5, N 4. – P. 577–580.
3. Boriding kinetics of Fe₂B layers formed on AISI 1045 steel / J. Zuno-Silva, M. Ortiz-Domínguez, M. Keddam, M. Elias-Espinosa, O. Damián-Mejía, E. Cardoso-Legorreta, M. Abreu-Quijano // Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy. – 2014. – Vol. 50 (2). – P. 101–107.
4. Балановский А.Е., Гюи В.В. Плазменная поверхностная цементация с использованием графитового покрытия // Письма о материалах. – 2017. – Т. 7, № 2. – С. 175–179. – DOI: 10.22226/2410-3535-2017-2-175-179.
5. Comparative evaluation of austenite grain in high-strength rail steel during welding, thermal processing and plasma surface hardening / A.D. Kolosov, V.E. Gozbenko, M.G. Shtayger, S.K. Kargapoltsev, A.E. Balanovskiy, A.I. Karlina, A.V. Sivtsov, S.A. Nebogin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – P. 012185. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012185.
6. Balanovskii A.E., Huy V.V. Estimation of wear resistance of plasma-carburized steel surface in conditions of abrasive wear // Journal of Friction and Wear. – 2018. – Vol. 39. – P. 311–318. – DOI: 10.3103/S1068366618040025.
7. Surface hardening of structural steel by cathode spot of welding arc / A.E. Balanovskiy, M.G. Shtayger, A.I. Karlina, S.K. Kargapoltsev, V.E. Gozbenko, Yu.I. Karlina, A.S. Govorkov, B.O. Kuznetsov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. – Vol. 560. – P. 012138. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012138.

8. *Nguyen V.T., Astafeva N.A., Balanovskiy A.E.* Study of the formation of the alloyed surface layer during plasma heating of mixtures of Cu-Sn/CrXCY alloys // *Tribology in Industry*. – 2021. – Vol. 43. – P. 386–396. – DOI: 10.24874/ti.1070.03.21.05.
9. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions / R.A. Mamadaliev, P.V. Bakhmatov, N.V. Martyshev, V.Yu. Skeebe, A.I. Karlina // *Metallurgist*. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1255–1264.
10. Alloying and modification of iron-carbon melts with natural and man-made materials / O.I. Nokhrina, R.A. Gizatuln, M.A. Golodova, I.E. Proshunin, D.V. Valuev, N.V. Martyshev, A.I. Karlina // *Metallurgist*. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1429–1448.
11. Strengthening of metallurgical equipment parts by plasma surfacing in nitrogen atmosphere / N.N. Malushin, N.V. Martyshev, D.V. Valuev, A.I. Karlina, A.P. Kovalev, R.A. Gizatuln // *Metallurgist*. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1468–1475.
12. Study of matrix and rare elements in ash and slag waste of a thermal power plant concerning the possibility of their extraction / T.G. Cherkasova, E.V. Cherkasova, A.V. Tikhomirova, N.V. Gilyazidinova, R.V. Klyuev, N.V. Martyshev, A.I. Karlina, V.Yu. Skiba // *Metallurgist*. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1324–1330.
13. *Sizov I.G., Mishigdorzhyn U.L., Polyansky I.P.* Boroaluminized carbon steel // *Encyclopedia of Iron, Steel and Their Alloys* / R. Colás, G.E. Totten. – New York: Taylor and Francis, 2016. – P. 346–357. – DOI: 10.1081/e-eisa-120049887.
14. *Mishigdorzhyn U., Sizov I.* The Influence of boroaluminizing temperature on Microstructure and wear resistance in low-carbon steels // *Materials Performance and Characterization*. – 2018. – Vol. 7, N 3. – P. 252–265. – DOI: 10.1520/MPC20170074.
15. Модификация поверхностного слоя штамповых сталей созданием В-Аl-слоев химико-термической обработкой / Н.С. Улаханов, У.Л. Мишигдоржийн, А.Г. Тихонов, А.И. Шустов, А.С. Пятых // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2021. – Т. 17, № 12 (204). – С. 557–564. – DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564.
16. Microstructure and wear behavior of tungsten hot-work steel after boriding and boroaluminizing / U. Mishigdorzhyn, Y. Chen, N. Ulakhanov, H. Liang // *Lubricants*. – 2020. – Vol. 8, iss. 3. – P. 26. – DOI: 10.3390/lubricants8030026.
17. Surface boriding and titanization stainless steel by integrated processes / Y.F. Ivanov, V.E. Gromov, D.A. Romanov, O.V. Ivanova, Yu.A. Rubannikova // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2021. – Vol. 15. – P. 200–209. – DOI: 10.1134/S1027451021010080.
18. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovsky, A.Yu. Teplykh, V.G. Burov, S.V. Veselov // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – Vol. 207. – P. 245–253. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.081.
19. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovsky, D.S. Krivizhenko, A.A. Losinskaya, O.G. Lenivtseva // *Applied Surface Science*. – 2013. – Vol. 284. – P. 472–481. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.
20. *Kulka M.* Trends in physical techniques of boriding // *Current Trends in Boriding*. – Cham: Springer, 2019. – P. 99–253. – (Engineering Materials). – DOI: 10.1007/978-3-030-06782-3_5.
21. *Металлургия. Остаточные напряжения в металлопродукции: учебное пособие для СПО / С.П. Буркин, Г.В. Шимов, Е.А. Андрюкова*. – М.: Юрайт; Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 247 с.
22. *Бургер И.А.* Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
23. Патент № 2121666 Российская Федерация, МКИ 3 G 01 L 1/06. Способ определения остаточных напряжений: № 96107536/28: заявл. 18.04.96: опубл. 10.11.98, Бюл. № 31 / Замашиков Ю.И.
24. *Tikhonov A.G., Pashkov A.E.* Comparative study of residual stresses when turning HSS-5 steel with varying feed // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 632. – P. 012113. – DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012113.
25. *Zamashchikov Y.I.* Surface residual stress measurements by layer removal method // *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. – 2014. – Vol. 16 (3–4). – P. 187–211. – DOI: 10.1504/IJMMM.2014.067307.
26. Study of residual stresses, microstructure, and hardness in FeB and Fe₂B ultra-hard layers / Z. Pala, J. Fojtikova, T. Koubsky, R. Musalek, J. Strasky, J. Capek, J. Kyncl, L. Beranek, K. Kolarik // *Powder Diffraction*. – 2015. – Vol. 30 (S1). – P. S83–S89. – DOI: 10.1017/S0885715615000019.
27. Оценка структурно-фазового и напряженного состояния диффузионных боридных слоев, полученных химико-термической обработкой на поверхности штамповой стали 3Х2В8Ф / У.Л. Мишигдоржийн, Н.С. Улаханов, А.Г. Тихонов, П.А. Гуляшинов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 147–162. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-147-162.
28. Программный модуль расчета остаточных напряжений по данным, полученным методом удаления слоев: свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2015663438 Рос. Федерация /

Ю.И. Замашиков, К.В. Толстихин. – № 2015619838; заявл. 16.10.15; опублик. 20.01.16, Бюл. № 2.

29. *Мирзоев Р.А., Давыдов А.Д.* Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 382 с.

30. *Попилов Л.Я.* Советы заводскому технологу: справочное пособие. – Л.: Лениздат, 1975. – 264 с.

31. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента / под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высшая школа, 1983. – 247 с.

32. *Байсунов Н.А., Волосатов В.А.* Справочник молодого рабочего по электрохимической обработ-

ке. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 176 с.

33. *Гродзинский Э.Я.* Абразивно-электрохимическая обработка. – М.: Машиностроение, 1976. – 55 с.

34. *Домбровский Ю.М., Степанов М.С.* Создание композитных диффузионных боридных покрытий при микродуговом упрочнении в порошковых средах // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – № 5 (160). – С. 61–63.

35. *Шматов А.А.* Композиционные структуры, сформированные при диффузионном насыщении стали несколькими переходными металлами // Ползуновский альманах. – 2015. – № 2. – С. 78–84.

Конфликт интересов

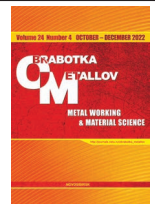
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



The features of residual stresses investigation in the hardened surface layer of die steels after diffusion boroaluminizing

Nikolay Ulakhanov^{1, 2, a, *}, *Aleksandr Tikhonov*^{3, b}, *Undrakh Mishigdorzhiiyn*^{1, c},
Vladimir Ivancivsky^{4, d}, *Nikita Vakhrushev*^{4, e}

¹ Institute of Physical Material Science of the Siberian Branch of the RAS, 6 Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047, Russian Federation

² East Siberia State University of Technology and Management, 40V Kluchevskaya str, Ulan-Ude, 670013, Russian Federation

³ Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

⁴ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-0635-4577>, nulakhanov@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-4917-9916>, tihonovalex90@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7863-9045>, undrakh@ipms.bsnet.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-9244-225X>, ivancivskij@corp.nstu.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0002-2273-5329>, vah_nikit@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 28 September 2022

Revised: 14 October 2022

Accepted: 03 November 2022

Available online: 15 December 2022

Keywords:

Thermal-Chemical Treatment (TCT)

Boroaluminizing

Residual Stresses

Die steel

Funding

The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project 19-79-10163-P).

Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility “Structure, mechanical and physical properties of materials”.

ABSTRACT

Introduction. Diffusion boroaluminizing provides improved performance properties of the die steels' surface such as wear resistance, high hardness, and corrosion resistance. Surface hardening can significantly contribute to the occurrence of technological residual stresses (*TRS*) on the surface. Currently, there are no studies on the topic of the stress state of diffusion boroaluminizing. **The purpose** of this work is to develop a method for determining the *TRS* and a nature of its distribution in the diffusion layers on the surface of *5CrNiMo* and *3Cr2W8V* die steels after boroaluminizing by a mechanical method. **The paper considers** the results of experimental studies on the determination of the normal components of *TRS* by the mechanical method in diffusion layers of die steels. The conducted studies showed that the formation of unfavorable tensile *TRS* occurs along the depth of the hardened layer in the case of the investigated *TCT* method and types of steels. **Results and discussions.** The main approaches for determining the *TRS* in the surface layer of *3Cr2W8V* and *5CrNiMo* die steels after *TCT* are considered. Problems in the determination of *TRS* by the mechanical method on the *UDION-2* unit are identified, and its solution is proposed. The efficiency of using the anodic dissolution method for the continuous removal of stressed layers during the *TRS* study by the mechanical method on the *UDION-2* unit is shown. The optimal electrolyte composition is selected for the process of anodic dissolution consisting of: $NaNO_3 - 60 \text{ g/l}$; $NaNO_2 - 5 \text{ g/l}$; $Na_2CO_3 - 5 \text{ g/l}$; $C_3H_8O_3 - 15 \text{ g/l}$; H_2O – the rest. The distributions of the normal *TRS* components in the diffusion layer of die steel specimens are revealed. It is established that, during the *TCT* of these steels predominantly tensile *TRS* are formed in the surface layer. Further research will be aimed at developing measures to reduce tensile *TRS* during diffusion boroaluminizing of die steels.

For citation: Ulakhanov N.S., Tikhonov A.G., Mishigdorzhiiyn U.L., Ivancivsky V.V., Vakhrushev N.V. The features of residual stresses investigation in the hardened surface layer of die steels after diffusion boroaluminizing. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 18–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-18-32. (In Russian).

References

1. Voroshnin L.G., Mendeleeva O.L., Smetkin V.A. *Teoriya i tekhnologiya khimiko-termicheskoi obrabotki* [Theory and technology of chemical and heat treatment]. Moscow, Novoe znanie Publ., 2010. 304 p. ISBN 978-5-94735-149-1.

* Corresponding author

Ulakhanov Nikolay S., Junior researcher

Institute of Physical Material Science of the Siberian Branch of the RAS,

6 Sakhyanovoy str.,

670047, Ulan-Ude, Russian Federation

Tel.: 8 (3012) 43-48-70, e-mail: nulakhanov@mail.ru



2. Gagandeep S., Gurbhinder B. Modification of EN9 steel surface by salt bath nitrocarburising process. *Journal of Materials Science and Surface Engineering*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 577–580.
3. Zuno-Silva J., Ortiz-Domínguez M., Keddam M., Elias-Espinosa M., Damián-Mejía O., Cardoso-Legorreta E., Abreu-Quijano M. Boriding kinetics of Fe2B layers formed on AISI 1045 steel. *Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy*, 2014, vol. 50 (2), pp. 101–107.
4. Balanovskii A., Huy V.V. (2017). Plazmennaya poverkhnostnaya tsementatsiya s ispol'zovaniem grafitovogo pokrytiya [Plasma surface carburizing with graphite paste]. *Pis'ma o materialakh = Letters on Materials*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 175–179. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-2-175-179.
5. Kolosov A.D., Gozbenko V.E., Shtayger M.G., Kargapoltsev S.K., Balanovskiy A.E., Karlina A.I., Sivtsov A.V., Nebogin S.A. Comparative evaluation of austenite grain in high-strength rail steel during welding, thermal processing and plasma surface hardening. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, p. 012185. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012185.
6. Balanovskii A.E., Huy V.V. Estimation of wear resistance of plasma-carburized steel surface in conditions of abrasive wear. *Journal of Friction and Wear*, 2018, vol. 39, pp. 311–318. DOI: 10.3103/S1068366618040025.
7. Balanovskiy A., Shtayger M., Karlina I., Kargapoltsev S., Gozbenko V., Karlina Yu., Govorkov A., Kuznetsov B. Surface hardening of structural steel by cathode spot of welding arc. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, p. 012138. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012138.
8. Nguyen V.T., Astafeva N.A., Balanovskiy A.E. Study of the formation of the alloyed surface layer during plasma heating of mixtures of Cu-Sn/CrXCY alloys. *Tribology in Industry*, 2021, vol. 43, pp. 386–396. DOI: 10.24874/ti.1070.03.21.05.
9. Mamadaliev R.A., Bakhmatov P.V., Martyushev N.V., Skeebe V.Yu., Karlina A.I. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1255–1264.
10. Nokhrina O.I., Gizatulin R.A., Golodova M.A., Proshunin I.E., Valuev D.V., Martyushev N.V., Karlina A.I. Alloying and modification of iron-carbon melts with natural and man-made materials. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1429–1448.
11. Malushin N.N., Martyushev N.V., Valuev D.V., Karlina A.I., Kovalev A.P., Gizatulin R.A. Strengthening of metallurgical equipment parts by plasma surfacing in nitrogen atmosphere. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1468–1475.
12. Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Gilyazidinova N.V., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Karlina A.I., Skiba V.Yu. Study of matrix and rare elements in ash and slag waste of a thermal power plant concerning the possibility of their extraction. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1324–1330.
13. Sizov I.G., Mishigdorzhyn U.L., Polyansky I.P. Boroaluminized carbon steel. *Encyclopedia of Iron, Steel and Their Alloys*. Ed. by R. Colás, G.E. Totten. New York, Taylor and Francis, 2016, pp. 346–357. DOI: 10.1081/e-eisa-120049887.
14. Mishigdorzhyn U., Sizov I. The influence of boroaluminizing temperature on microstructure and wear resistance in low-carbon steels. *Materials Performance and Characterization*, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 252–265. DOI: 10.1520/MPC20170074.
15. Ulahanov N.S., Mishigdorzhyn U.L., Tihonov A.G., Shustov A.I., Pyatyih A.S. Modifikatsiya poverkhnostnogo sloya shtampovykh staley sozdaniem B-Al-sloev khimiko-termicheskoi obrabotkoi [Surface modification of die steels with B–Al-layers by thermal-chemical treatment]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening technologies and coatings*, 2021, vol. 17, no. 12 (204), pp. 557–564. DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564.
16. Mishigdorzhyn U., Chen Y., Ulakhanov N., Liang H. Microstructure and wear behavior of tungsten hot-work steel after boriding and boroaluminizing. *Lubricants*, 2020, vol. 8, iss. 3, p. 26. DOI: 10.3390/lubricants8030026.
17. Ivanov Y.F., Gromov V.E., Romanov D.A., Ivanova O.V., Rubannikova Y.A. Surface boriding and titanization stainless steel by integrated processes. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2021, vol. 15, pp. 200–209. DOI: 10.1134/S1027451021010080.
18. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Teplykh A.Yu., Burov V.G., Veselov S.V. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 207, pp. 245–253. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.081.
19. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Krivizhenko D.S., Losinskaya A.A., Lenivtseva O.G. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 284, pp. 472–481. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.
20. Kulka M. Trends in physical techniques of boriding. *Current trends in boriding. Engineering aterials*. Cham, Springer, 2019, pp. 99–253. DOI: 10.1007/978-3-030-06782-3_5.

21. Burkin S.P., Shimov G.V., Andryukova E.A. *Metallurgiya. Ostatochnye napryazheniya v metalloproduksii* [Metallurgy. Residual stresses in metal products]. Moscow, Yurait Publ., 2018. 247 p.
22. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 232 p.
23. Zamashchikov Yu.I. *Sposob opredeleniya ostatochnykh napryazhenii* [Method for determining residual stresses]. Patent RF, no. 2121666, 1998.
24. Tikhonov A.G., Pashkov A.E. Comparative study of residual stresses when turning HSS-5 steel with varying feed. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 632, p. 012113. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012113.
25. Zamashchikov Y.I. Surface residual stress measurements by layer removal method. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2014, vol. 16 (3–4), pp. 187–211. DOI: 10.1504/IJMMM.2014.067307.
26. Pala Z., Fojtikova J., Koubsky T., Musalek R., Strasky J., Capek J., Kyncl J., Beranek L., Kolarik K. Study of residual stresses, microstructure, and hardness in FeB and Fe₂B ultra-hard layers. *Powder Diffraction*, 2015, vol. 30 (S1), pp. S83–S89. DOI: 10.1017/S0885715615000019.
27. Mishigdorzhyn U.L., Ulakhanov N.S., Tikhonov A.G., Gulyashinov P.A. Otsenka strukturno-fazovogo i napryazhennogo sostoyaniya diffuzionnykh boridnykh sloev, poluchennykh khimiko-termicheskoi obrabotkoi na poverkhnosti shtampovoi stali 3Kh2V8F [The structure, phase composition, and residual stresses of diffusion boride layers formed by thermal-chemical treatment on the die steel surface]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 147–162. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-147-162.
28. Zamashchikov Yu.I., Tolstikhin K.V. *Programmnyi modul' rascheta ostatochnykh napryazhenii po dannym, poluchennym metodom udaleniya sloev* [Software module for calculating residual stresses based on data obtained by the layer removal method]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2015619838, 2016.
29. Mirzoev R.A., Davydov A.D. *Anodnye protsessy elektrokhimicheskoi i khimicheskoi obrabotki metallov* [Anode processes of electrochemical and chemical processing of metals]. St. Petersburg, SPbPU Publ., 2013. 382 p.
30. Popilov L.Ya. *Sovety zavodskomu tekhnologu* [Tips for the factory technologist]. Leningrad, Lenizdat Publ., 1975. 264 p.
31. Smolentsev V.P., ed. *Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov*. V 2 t. T. 1. *Obrabotka materialov s primeneniem instrumenta* [Electrophysical and electrochemical methods of material processing. In 2 vol. Vol. 1. Processing materials using a tool]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 247 p.
32. Baisupov N.A., Volosatov V.A. *Spravochnik mladogo rabochego po elektrokhimicheskoi obrabotke* [Electrochemical machining young worker's handbook]. 2 nd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 176 p.
33. Grodzinskii E.Ya. *Abrazivno-elektrokhimicheskaya obrabotka* [Abrasive-electrochemical processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 55 p.
34. Dombrovskii Yu.M., Stepanov M.S. Sozdanie kompozitnykh diffuzionnykh boridnykh pokrytii pri mikrodogovom uprochnenii v poroshkovykh sredakh [Creation of composite diffusion boride coatings during microarc hardening in powder media]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2015, no. 5 (160), pp. 61–63.
35. Shmatov A.A. Kompozitsionnye struktury, sformirovannye pri diffuzionnom nasyschenii stali neskol'kimi perekhodnymi metallami [Composite structures formed during diffusion saturation of steel with several transition metals]. *Polzunovskii al'manakh = Polzunov Almanac*, 2015, no. 2, pp. 78–84.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).