

Литература

1. **Минкевич, А.Н.** Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А.Н. Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – 491 с.
2. **Крукович, М.Г.** Пластичность борированных слоев / М.Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 384 с.
3. **Matijevic, B.** Evaluation of boride layer growth on carbon steel surfaces / B. Matijevic // Metal science and Heat treatment. – 2014. – Vol. 56. – № 5-6. – P. 269–273.
4. **Дукаревич, И.С.** Перераспределение элементов в борированном слое / И.С. Дукаревич, М.В. Можаров, А.В. Шигаев // МиТОМ, 1973. – № 2. – С. 64–66.
5. **Константинов, В.М.** Изменение морфологии термодиффузионного боридного слоя при предварительном меднении основы / В.М. Константинов, В.Г. Дашкевич, М.А. Судников // Инженерия поверхности и реновация изделий : материалы 17-й Международ. науч.-техн. конф., Одесса, 29 мая–2 июня 2017 г. – Киев: АТМ Украины, 2017. – С. 65–68.

УДК 620.181

А.Н. ГРИГОРЧИК, канд. техн. наук
(ОИМ НАН Б),
Е.В. АСТРАШАБ (БНТУ)

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ 40X13, НАПЫЛЕННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОГО ГАЗА МАФ

Введение. Метод газотермического напыления (ГТН) покрытий с использованием проволочных материалов относится к аддитивным технологиям и основан на использовании продуктов сгорания горючих газов для распыления расплавленных частиц, что позволяет формировать поверхностные слои деталей машин и механизмов машиностроительного профиля с требуемыми физико-

механическими характеристиками. Одной из наиболее эффективных разновидностей ГТН является технология высокоскоростной металлизации (ВМ) [1]. При этом нагретые до температуры 2000–3000 К продукты сгорания газа, истекая через сопло Лавала, приобретают скорость 900–1100 м/с, что позволяет разогнать частицы распыляемого материала до скоростей порядка 500 м/с и формировать покрытия, имеющие повышенную прочность сцепления с подложкой, чем при обычной электрометаллизации. Традиционно в качестве горючего газа для распыления капель металла при ВМ используется пропан. В частности, в работах [2, 3] показано, что среди алканов пропан (C_3H_8) является достаточно подходящим горючим газом для процесса высокоскоростной металлизации, поскольку обладает максимальной теплоемкостью, достаточно высокой температурой горения на воздухе, при этом не требуется чрезмерного количества воздуха для горения факела и охлаждения камеры. Вместе с тем, существуют высокоэнтальпийные газы с более высокими параметрами горения по сравнению с пропаном, например, метилацетилен-алленовая фракция (МАФ). В связи с этим представляло интерес оценить возможность использования МАФ при металлизации с целью повышения прочностных эксплуатационных показателей покрытий из высокохромистых сталей. Целью данной работы являлось исследование структурно-фазового состояния и трибомеханических свойств газотермического покрытия из высокохромистой стали 40X13, полученного высокоскоростной металлизацией с использованием горючего газа МАФ.

Образцы и методики исследований. Для исследований были выбраны газотермические покрытия из высокохромистой стали мартенситного класса 40X13, напыленные с помощью газа МАФ (режим 1), а также традиционно используемого пропана (режим 2). Для нанесения газотермических покрытий использовался метод высокоскоростной металлизации и, в частности, установка АДМ-10, разработанная в ОИМ НАН Беларуси [2]. Скорость полета напыляемых частиц составляла 400–500 м/с, размер частиц 5–40 мкм. Температура распыляющего факела не превышала 3000 К. С целью повышения прочности сцепления покрытия с основой, наносился промежуточный слой напылением проволоки из сплава X20H80. Покрытия подвергались механической шлифовке с финишной обработкой на абразивной бумаге (P320). Толщина напыленных по-

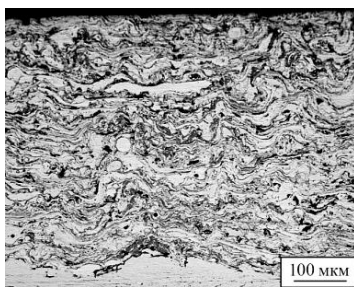
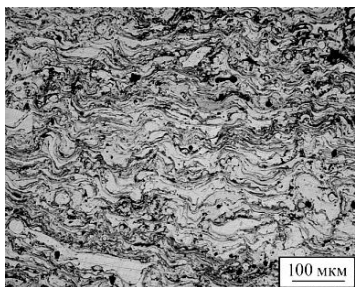
крытый составляла $\approx 1,2-1,6$ мм. Пористость покрытий, нанесенных на пластины ($70 \times 70 \times 6$ мм) из стали 45 по режимам 1 и 2, составляла $\approx 2-5$ об.%. Химический состав распыляемой проволоки представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав проволочной стали 40X13

Содержание элементов, мас. %					
C	Cr	Ni	Mn	Si	Fe
0,42	13,20	0,60	0,35	0,40	основа

Исследование фазового состояния напыленных газотермических покрытий из стали 40X13 с использованием различных горючих газов осуществляли на дифрактометре ДРОН-2.0 в монохроматизированном кобальтовом (CoK α) излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Расшифровка рентгенограмм осуществлялась при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ. Измерения твердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор $P = 25$ г и 10 кг. Триботехнические испытания образцов покрытий проводились на трибометре АТВП. Испытания осуществлялись по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел при средней скорости взаимного перемещения $\approx 0,1$ м/с в режиме трения без смазочного материала (удельная нагрузка испытаний составляла $p = 1,5$ МПа). При испытаниях использовалось контртело, изготовленное из закаленной стали У8 (800 HV10). Испытания проводились до достижения 20000 циклов с промежуточными взвешиваниями. Путь трения составлял ≈ 1200 м.

Результаты исследований и их обсуждение. При газотермическом напылении мартенситной стали 40X13 по режимам 1 и 2 формируются покрытия, характеризующиеся слоистой структурой (рисунок 1), включающей прослойки металла (светлые участки) и оксидов (темные участки). Содержание оксидов в напыленных покрытиях составляет ≈ 25 об.%.



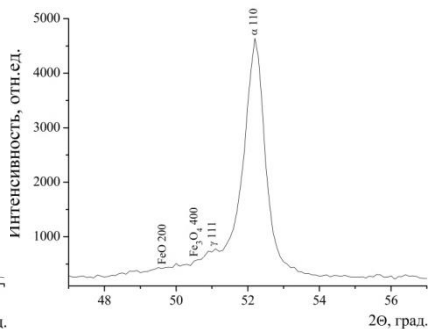
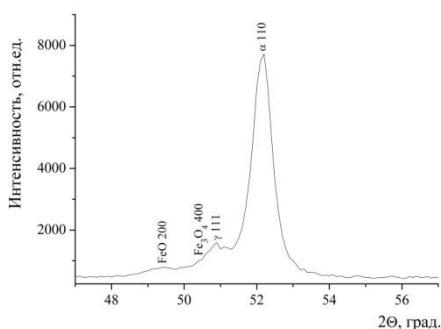
а

б

а – режим 1; б – режим 2

Рисунок 1 – Характерные микроструктуры газотермических покрытий из высокохромистой стали 40X13, напыленных по различным режимам

Фазовый состав механически шлифованных газотермических покрытий из стали 40X13, полученных по режимам 1 и 2, включает в себя: α -Fe, γ -Fe, оксиды Fe_3O_4 и FeO (рисунок 2, таблица 2).



а – режим 1; б – режим 2

Рисунок 2 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK α) от поверхностных слоев газотермических покрытий из мартенситной стали 40X13, полученных по различным режимам напыления

Таблица 2 – Фазовый состав газотермических покрытий из высокохромистой стали 40X13, напыленных по различным режимам

Режим напыления	V_{α} , об. %	V_{γ} , об. %	FeO + Fe ₃ O ₄
Режим 1	58	18	24
Режим 2	63	12	25

Можно видеть, что покрытия из мартенситной стали 40X13, полученные по режимам 1 и 2, содержат аномально высокое количество метастабильного аустенита 18 и 12 об.%, соответственно. Необходимо отметить, что содержание аустенита в монолитной закаленной стали 40X13 обычно не превышает 3–5 об.%. Аномально высокое содержание аустенитной фазы в высокохромистых газотермических покрытиях связано с особыми условиями их формирования при напылении, заключающимися в реализации изотермической выдержки покрытия в области температур бейнитного превращения, приводящей к стабилизации γ -фазы [4]. Рентгеноструктурный анализ показал, что покрытие из стали 40X13, полученное по режиму напыления 1, содержит несколько большее количество γ -фазы по сравнению с покрытием, напыленным по режиму 2 (таблица 2). Повышенное содержание аустенитной фазы в напыленном по режиму 1 газотермическом покрытии из стали 40X13 связано, по нашему мнению, с его более глубокой термической стабилизацией в процессе изотермической выдержки в области бейнитного превращения при напылении. При этом использование МАФ с более высокой теплотворной способностью приводит к повышению температуры распыляемых частиц, а также температуры и времени изотермической выдержки покрытия в области бейнитного превращения, по сравнению со случаем распыления частиц продуктами сгорания пропана.

Твердость покрытия из стали 40X13, напыленного распыляющим газом МАФ (режим 1), составляет ≈ 410 HV 10 (≈ 500 HV 0,01), а твердость покрытия, напыленного с использованием пропана, составляет ≈ 600 HV 10 (≈ 650 HV 0,01). Таким образом, покрытие, полученное по режиму 2, имеет более высокие значения твердости/микротвердости по сравнению с покрытием, полученным по режиму напыления 1. Указанное

различие значений твердости/микротвердости покрытий обусловлено различным содержанием в них количества γ -фазы (таблица 2).

Результаты триботехнических испытаний в условиях трения без смазочного материала газотермических покрытий, напыленных по различным режимам, представлены в таблице 3 и на рисунке 3. Необходимо отметить, что газотермические покрытия из мартенситной стали 40X13 имеют высокую износостойкость по сравнению с покрытиями из низколегированных проволочных сталей. Последнее связано с протеканием в поверхностных слоях покрытий из высокохромистых сталей деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, придающего покрытиям высокую износостойкость и микротвердость [5, 6].

Таблица 3 – Интенсивность массового изнашивания на стадии установившегося трения газотермических покрытий из стали 40X13, напыленных по различным режимам

Режим напыления	Интенсивность массового изнашивания $I_q, \times 10^{-3}$ мг/м
Режим 1	1,25
Режим 2	4,20

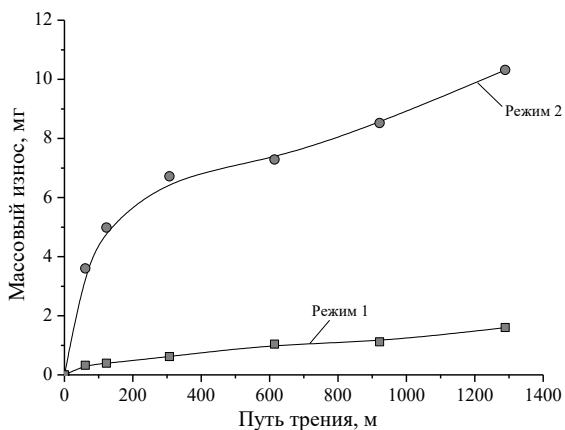


Рисунок 3 – Зависимость массового износа от пути трения для покрытий из стали 40X13, полученных по различным режимам напыления

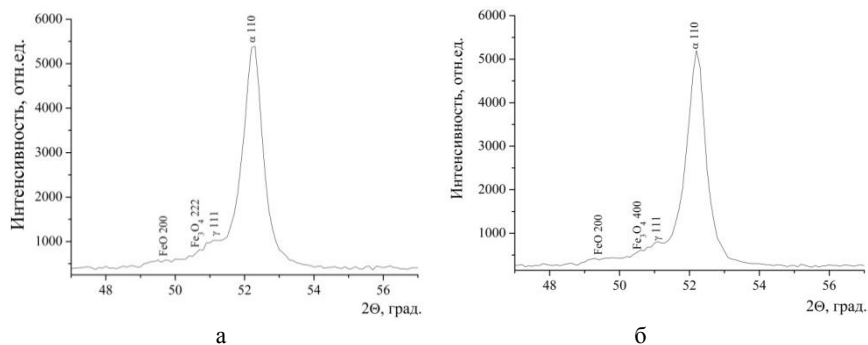
Полученные результаты свидетельствуют о том, что газотермическое напыление с использованием высокоэнтальпийного газа обеспечивает более высокую износостойкость покрытий из стали 40X13, по сравнению со случаем использования пропана. В частности, интенсивность массового изнашивания газотермического покрытия из стали 40X13, напыленного с помощью распыляющего газа МАФ (режим 1), составляет $1,25 \cdot 10^{-3}$ мг/м, а покрытия, полученного с помощью пропана (режим 2) – $4,20 \cdot 10^{-3}$ мг/м (таблица 3). Таким образом, износостойкость покрытия, напыленного с использованием МАФ, \approx в 3 раза выше износостойкости покрытия, полученного с использованием пропана. При этом содержание γ -фазы в поверхностном слое покрытия из стали 40X13, полученного по режиму напыления 1, после сухого трения снижается до ≈ 10 об.% (рисунок 4, а), а микротвердость поверхностных слоев возрастает до $\approx 800\text{--}900$ HV 0,01 (таблица 4). В то же время, в поверхностном слое покрытия, напыленного по режиму 2, после трибоиспытаний регистрируется ≈ 8 об.% (рисунок 4, б), а его микротвердость повышается до $\approx 700\text{--}800$ HV 0,01 (таблица 4).

Таблица 4 – Содержание аустенита в поверхностных слоях газотермических покрытий, полученных по различным режимам напыления, а также их микротвердость после триботехнических испытаний в условиях жесткого адгезионного взаимодействия

Режим напыления	Содержание аустенита в поверхностном слое покрытия после трибоиспытаний V_{γ} , об. %	Микротвердость поверхностного слоя покрытия после трибоиспытаний, HV 0,01
Режим 1	10	800–900
Режим 2	8	700–800

Таким образом, наличие повышенного содержания в фазовом составе газотермических покрытий из мартенситной стали 40X13 метастабильной аустенитной фазы благоприятно сказывается на их износостойкости при трении в условиях адгезионного взаимодействия. Указанное явление связано с образованием при трении в поверхностном слое покрытия сравнительно большего количества

мартенсита деформации, формирующегося в результате деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. При этом поверхностный слой покрытия из стали 40X13 приобретает повышенную износостойкость и микротвердость, по сравнению со случаем напыления стали с использованием пропана.



а – режим 1; б – режим 2

Рисунок 4 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK_α) от поверхностных слоев газотермических покрытий из мартенситной стали 40X13, полученных по различным режимам напыления после триботехнических испытаний в условиях жесткого адгезионного взаимодействия

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что использование распыляющего газа МАФ при высокоскоростной металлизации проволоочной стали мартенситного класса 40X13 обеспечивает формирование плотных покрытий, содержащих повышенное количество метастабильного аустенита, который претерпевает деформационно-активированное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение при трении в условиях адгезионного взаимодействия, что в свою очередь обеспечивает более высокую износостойкость покрытия.

Заключение. Проведено сравнительное исследование структурно-фазового состояния и трибомеханических свойств газотермических покрытий из высокохромистой мартенситной стали 40X13, напыленных с использованием различных горючих газов (пропан и МАФ). Показано, что покрытие, напыленное с помощью высокоэнтальпийного газа МАФ, содержит в фазовом составе более высокое количество γ -фазы и характеризуется пони-

женной твердостью по сравнению с покрытием, полученным с использованием пропана. Установлено, что износостойкость в условиях сухого трения напыленного при помощи газа МАФ покрытия \approx в 3 раза выше износостойкости покрытия, сформированного с использованием пропана. Высокая износостойкость покрытия из стали 40X13, полученного при использовании газа МАФ, обеспечивается более интенсивным протеканием в его поверхностном слое деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, что сопровождается образованием слоя с повышенной микротвердостью и износостойкостью.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Объединенного института машиностроения НАН Беларуси Белоцерковскому М.А. и Сосновскому А.В. за предоставленные для исследований образцы газотермических покрытий.

Литература

1. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволочными материалами / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 12 – С. 17–23.

2. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 200 с.

3. Белоцерковский, М.А. Методы и оборудование для формирования высокоэнергетических двухфазных потоков / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Физика плазмы и плазменные технологии. – Минск, 1997. – Т. 4. – С. 670–673.

4. О природе формирования метастабильной аустенитной структуры при газотермическом напылении высокохромистой стали мартенситного класса 95X18 / В.А. Кукареко [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – Т. 13. – № 7(151). – С. 318–322.

5. Кукареко, В.А. Деформационно-активированное мартенситное превращение в газотермических покрытиях из высокохромистых сталей при сухом трении / В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик // «ПОЛИКОМТРИБ-2015»: тезисы докладов

Междунар. науч.-техн. конф. ; редкол.: В.Н. Адери́ха [и др.]. – Гомель, 2015. – С. 75.

6. Структура и свойства покрытий из стали 40X13, полученных с использованием различных методов газотермического напыления / П.А. Витязь [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т.5. – № 1. – С. 29–36.

УДК 621.762

В.Г. ЩЕРБАКОВ (БНТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СПЕКАНИЯ МЕДНЫХ ВОЛОКОН ПОСЛЕ ДИФфуЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ В ПОДВИЖНОЙ РАСХОДУЕМОЙ НАСЫЩАЮЩЕЙ СМЕСИ

Введение. Диффузионное легирование (ДЛ) металлических отходов производства является одним из перспективных методов создания специальных сплавов для упрочнения и восстановления [1–6]. Эти сплавы нашли широкое распространение при упрочнении и восстановлении различных деталей техники. В качестве исходных материалов для получения сплавов используются металлические отходы из углеродистых, легированных сталей и чугунов в виде дроби и стружки, которые образуются на металлургических предприятиях при различных технологических операциях производства готовой продукции.

Однако кроме стальных и чугунных отходов на ряде предприятий образуются металлические отходы на базе цветных металлов. Так при изготовлении медных кабелей образуются отходы в виде волокон различного сечения. Утилизация таких отходов затруднена и вызывает определенные трудности. Использование этих материалов является перспективным при создании спеченных фильтрующих материалов. Спеченные фильтрующие материалы получают путем предварительного изостатического прессования медного волокна с последующим длительным высокотемпературным спеканием в вакуумных печах [7–9]. В ряде работ указано на перспективность применения данных видов отходов при изготовлении спечен-