

УДК 621.762

**Кукареко В.А., доктор технических наук, Григорчик А.Н., кандидат технических наук,
Белоцерковский М.А., доктор технических наук**

Объединенный институт машиностроения Национальная академия наук Беларуси, г. Минск

Воробьев Н.А., кандидат технических наук, доцент; Шапарь В.А., кандидат технических наук, доцент
Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ

Метод гиперзвуковой металлизации, обладающий рядом преимуществ, по сравнению с методами электродуговой металлизации и высокоскоростного газопламенного напыления, хорошо зарекомендовал себя при нанесении металлических покрытий с различными свойствами. Этот метод дает возможность образовывать покрытия, обладающие высокой износостойкостью, повышенной прочностью сцепления с материалом детали, способностью воспринимать высокие контактные нагрузки при ударном нагружении [1].

Разработанные на основе этого метода технологии и оборудование позволяют получать покрытия с низкой себестоимостью, благодаря повышенной производительности и высокому коэффициенту использования материала. При этом пористость покрытий составляет менее ~ 2–5 %, прочность сцепления – 40 ... 50 МПа, твердость покрытия – до 850 HV [2]. Вместе с тем, физико-механические свойства напыленных покрытий из различных сталей существенно различаются, что требует проведения исследования их трибомеханических характеристик. В связи с этим целью работы являлось исследование износостойкости газотермических покрытий из сталей различных классов.

Для исследований были выбраны газотермические покрытия из сталей различных классов: ферритного (Св–08Г2С), аустенитного (06Х19Н9Т) и мартенситного (40Х13 и 95Х18). Химический состав напыляемых проволоочных сталей (d=2,0 мм) представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав проволоочных сталей

Марка проволоочной стали	Концентрация элементов, мас. %						
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	Fe
Св–08Г2С	0,08	0,10	0,15	—	2,00	0,80	основа
06Х19Н9Т	0,06	19,50	10,0	0,60	2,00	0,80	основа
40Х13	0,42	13,20	0,60	—	0,35	0,40	основа
95Х18	0,96	18,50	0,60	0,20	0,80	0,80	основа

Для нанесения газотермических покрытий использовался метод гиперзвуковой металлизации. Процесс распыления нагретых в электрической дуге стальных проволок осуществлялся струей продуктов сгорания воздушно–пропановой смеси при соотношении пропана и воздуха в смеси – 1:17 и давлении воздуха 0,19 МПа. Покрытия напылялись на пластины размерами 100×50×6 мм, изготовленные из стали 45. Для получения газотермических покрытий использовалась установка АДМ–10, разработанная в ОИМ НАН Беларуси. Скорость 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 Х20Н80.

Образцы для триботехнических и структурно-фазовых исследований (10×6×5 мм) вырезались из пластин с напыленными слоями из проволоочных сталей Св–08Г2С, 06Х19Н9Т, 40Х13 и 95Х18. Толщина напыленных слоев составляла 0,8 ... 1,0 мм.

Триботехнические испытания образцов в режиме граничного трения проводились на машине трения МТВП. Испытания осуществлялись по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел при скорости взаимного перемещения ~ 0,2 м/с. Удельная нагрузка *p* при испытаниях составляла 50 МПа. Сравнительные испытания триботехнических свойств образцов проводились в режиме граничного трения с использованием смазки И–20. Для определения величины линейного износа использовался метод искусственных баз [3].

Метод основан на определении величины износа путем вычисления удаленного при изнашивании слоя посредством измерения глубины предварительно нанесенного алмазной пирамидой отпечатка на различных стадиях трения. При этом толщина удаленного слоя Δh_i определяется из выражения:

$$\Delta h_i = h_0 - h_i$$

где h_0 – глубина отпечатка перед триботехническими испытаниями;

h_i – глубина отпечатка после триботехнических испытаний различной продолжительности.

Углубления на поверхности наносились путем вдавливания индентора, нагруженного силой $P = 98,07$ Н, в виде пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине между противоположными гранями 136^0 (рисунок 1).

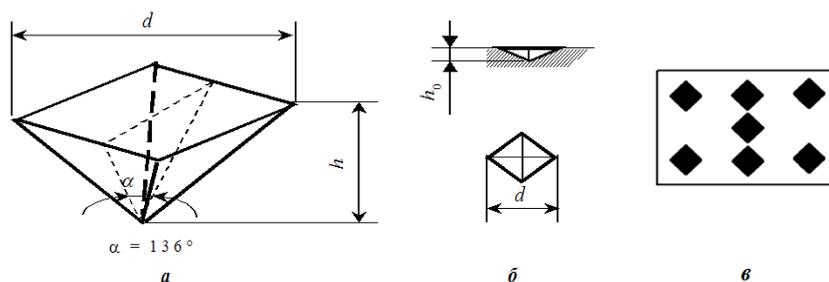


Рисунок 1 – Форма алмазного наконечника (а), вид отпечатка (б) и схема нанесения отпечатков на поверхность испытуемых образцов (в)

Дно углублений служит неизменной искусственной базой, от которой измеряется расстояние до поверхности трения. Глубина отпечатка вычисляется по формуле:

$$h = d/7$$

где d – длина диагонали.

По изменению длины отпечатка на поверхности трения определялась глубина отпечатка после триботехнических испытаний различной продолжительности.

Измерения твердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор $P = 98,07$ Н.

Результаты триботехнических испытаний газотермических покрытий из сталей различных классов представлены на рисунке 2 и в таблице 2.

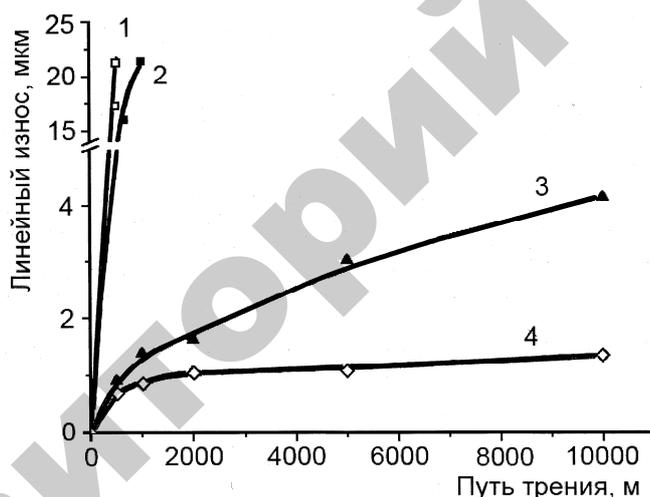


Рисунок 2 – Зависимости линейного изнашивания от пути трения для газотермических покрытий из сталей различных классов, испытанных в условиях граничного трения в смазочном материале И-20 при удельном давлении 50 МПа: 1 – покрытие из стали Св-08Г2С; 2 – покрытие из стали 06Х19Н9Т; 3 – покрытие из стали 40Х13; 4 – покрытие из стали 95Х18

Таблица 2 – Интенсивность изнашивания газотермических покрытий из сталей различных классов в условиях граничного трения при удельном давлении 50 МПа

Материал покрытия	Интенсивность изнашивания, $I_h \times 10^{-9}$
Сталь Св-08Г2С	35,85
Сталь 06Х19Н9Т	21,00
Сталь 40Х13	0,41
Сталь 95Х18	0,14

Газотермическое покрытие из ферритной стали Св-08Г2С в исходном состоянии характеризуется низкой износостойкостью, величина интенсивности линейного изнашивания составляет $I_h = 35,85 \cdot 10^{-9}$ (таблица 2). Низкая износостойкость покрытия из стали Св-08Г2С связана с протеканием процессов схватывания между элементами пары трения вследствие пониженных прочностных свойств покрытия. Газотермическое покрытие из аустенитной стали 06Х19Н9Т в исходном состоянии также имеет низкую износостойкость, интенсивность линейного изнашивания составляет $I_h = 21,0 \cdot 10^{-9}$. Низкая износостойкость гиперзвукового покрытия из аустенитной стали, как и в

случае покрытия из ферритной стали, связана с процессами адгезионного взаимодействия между контактирующими поверхностями, приводящего к схватыванию и задиру x элементов пары трения. Газотермическое покрытие 40X13 имеет повышенную износостойкость по сравнению с покрытиями из аустенитной и ферритной стали, интенсивность линейного изнашивания составляет $I_n=0,413 \cdot 10^{-9}$. Относительно высокий уровень износостойкости покрытия обусловлен его повышенными прочностными характеристиками (оценка на основе дюрOMETрического анализа). Покрытие из мартенситной стали 95X18 характеризуется низкой твердостью, соответствующей твердости покрытия из аустенитной стали 06X19H9T. Последнее связано с высоким содержанием в покрытиях метастабильной аустенитной фазы. В то же время покрытие из стали 95X18 характеризуется относительно высокой износостойкостью, интенсивность линейного изнашивания покрытия составляет $I_n=0,14 \cdot 10^{-9}$. Высокая износостойкость покрытия из стали 95X18 достигается за счет деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в поверхностном слое при трении. Содержание γ -фазы в поверхностном слое покрытия из стали 95X18 после граничного трения снижается с 68 до 46 об. %. При этом микротвердость поверхностного слоя покрытия после триботехнических испытаний при граничном трении и высоких удельных давлениях возрастает до 1000 HV 0,025. Таким образом, в процессе граничного трения на поверхности газотермического покрытия из стали 95X18 образуется слой с пониженным содержанием метастабильного аустенита, высокой микротвердостью и износостойкостью.

В результате проведенных исследований установлено, что в процессе газотермического напыления высокохромистой мартенситной стали 95X18 формируется метастабильная аустенитная структура покрытия. Показано, что газотермические покрытия из мартенситных сталей 40X13 и 95X18 в условиях граничного трения при высоком контактном давлении имеют высокую износостойкость, и их интенсивность линейного изнашивания составляет $0,413 \cdot 10^{-9}$ и $0,14 \cdot 10^{-9}$, соответственно. Высокая износостойкость газотермических покрытий из мартенситных сталей 40X13 и 95X18 обусловлена протеканием деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в поверхностных слоях покрытий при трении, приводящего к существенному увеличению износостойкости и микротвердости их поверхностных слоев. Покрытия из мартенситных сталей могут быть рекомендованы для повышения износостойкости и долговечности рабочих органов машин для переработки сельскохозяйственного сырья.

Список использованной литературы

1. Витязь П.А., Ивашко В.С., Ильющенко А.Ф. и др. Теория и практика нанесения защитных покрытий. Минск: Беларус. навука, 1998. – 583 с.
2. Витязь, П.А. Замена гальванического хромирования на технологию гиперзвуковой металлизации при ремонте деталей узлов трения скольжения / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Ремонт, восстановление, модернизация (РФ), 2010, №10, с.2–5.
3. Григорчик А.Н., Белый А.В. Структура и триботехнические характеристики модифицированного ионами азота газотермического покрытия из стали 40X13. // Актуальные вопросы машиноведения: сборник научных трудов. – Ч.2 – 2013. – Минск – ОИМ НАН Беларуси 2013. С. 479–481.

УДК 631.363.2

Воробьев Н.А., кандидат технических наук, доцент, **Дрозд С.А.**
Белорусский государственный аграрный технический университет, г.Минск

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНОФУРАЖА ДВУХСТАДИЙНЫМ СПОСОБОМ

Обеспечение сельскохозяйственных животных полноценными кормами, соответствующими зоотехническим требованиям, является важнейшим фактором высокоэффективного производства животноводческой продукции. В технологии приготовления кормов самым распространенным и важным процессом является измельчение, обусловленное требованиями физиологии кормления животных и птиц. В результате измельчения образуется множество частиц и значительно увеличивается общая поверхность корма, что способствует ускорению процессов пищеварения и повышению усвояемости питательных веществ. На технологическую операцию измельчения зерна при приготовлении комбикормов требуется 30–70 % энергии, затрачиваемой на весь процесс комбикормового производства, что обуславливает необходимость поиска новых энергоэффективных приемов осуществления этой операции [1].

Одним из эффективных способов снижения энергоемкости процесса измельчения является двухстадийное измельчение, позволяющее не только уменьшить энергоемкость процесса, но и повысить качество и однородность измельченного зерна.

На первой стадии двухстадийного измельчения осуществляется предварительное воздействие на зерно, что способствует нарушению целостности зерна и образованию в нем микротрещин, тем самым снижается его прочность. На второй стадии зерно измельчается до надлежащего качества, соответствующего зоотехническим требованиям. Данный способ позволяет использовать наиболее энергоэффективные режимы работы оборудования на обеих стадиях измельчения, тем самым снизить его энергоемкость.