

**ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ ВИДА АКТИВАТОРА
И БАЛЛАСТНОЙ ДОБАВКИ Al_2O_3
НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ
ДИФфуЗИОННЫХ ХРОМИРОВАННЫХ И ВАНАДИРОВАННЫХ СЛОЕВ**

*канд. техн. наук, доц. А.М. ДОЛГИХ,
А.П. АНДРУКОВИЧ, Л.Н. КОСЯК, В.С. АНИСИМОВ*
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Защитные покрытия различного типа все более широко применяются в современной промышленности. Анализ их конструкционных свойств, к которым относится качество поверхности после нанесения, является актуальной задачей, определяющей эксплуатационные характеристики и возможности применения деталей машин с покрытиями без дополнительной механической обработки. Была исследована шероховатость поверхности образцов с нанесенными диффузионным методом защитными однокомпонентными покрытиями на основе карбидов хрома и ванадия и определена область возможной эксплуатации деталей. Практический интерес представляет изучение влияния технологических факторов нанесения покрытий (изменение процентного содержания и вида активатора процесса насыщения, процентного содержания балластной добавки) на среднеарифметическую высоту микронеровностей.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, диффузионное хромирование, диффузионное ванадирование, защитные покрытия, параметры процесса химико-термической обработки, среднеарифметическая высота микронеровностей, макроанализ поверхности защитных покрытий, балластная добавка.

Введение. Одним из признанных методов повышения эксплуатационных характеристик деталей машин и инструмента является химико-термическая обработка (ХТО), которая радикальным образом изменяет состав и физико-химические свойства поверхностных слоев деталей машин, что позволяет повысить их износ-, жаро- и коррозионную стойкости [1–5]. Это увеличивает надежность и долговечность машин, тем более, что современные требования к этим характеристикам постоянно возрастают. Необходимость широкого внедрения в промышленность наиболее перспективных процессов ХТО, изучение закономерностей формирования, состава и свойств диффузионных слоев приобретает все большее значение. Многочисленные литературные данные показывают, что диффузионные слои на основе карбидов хрома и ванадия обладают высокими жаро-, износ- и коррозионной стойкостями в ряде агрессивных сред.

Настоящее исследование посвящено изучению свойств карбидных диффузионных слоев, и наибольшее практическое применение получили карбидные слои на основе карбида хрома и карбида ванадия, поэтому более подробно рассмотрим эти процессы.

Основная часть. Шероховатость поверхности¹ деталей машин и механизмов в значительной степени определяет основные эксплуатационные свойства деталей и узлов машин: износостойкость, сопротивление усталости, надежность, контактную жесткость и теплопроводность стыков сопряженных деталей, коррозионную стойкость, герметичность технологических соединений, отражающую и поглощающую способности поверхностей и др. В связи с этим показатели шероховатости поверхности строго нормируются и подвергаются постоянному анализу в технологических исследованиях и контролю в процессе производства.

Шероховатость поверхности, получаемая при насыщении поверхности деталей машин, зависит от многих технологических факторов: материала и качества поверхности исходного вида; механических свойств, химического состава и структуры материала заготовки; состава насыщающей смеси, активатора и т.д.

Материалы и методика исследований. Процесс диффузионного хромирования проводили в исходной смеси, состоящей из следующих компонентов: хрома окиси (Cr_2O_3 марки «ч») – поставщика насыщающего элемента (хрома); порошка кремния (КР-1) или силикокальция (СК25) – восстановителя; оксида алюминия (Al_2O_3 марки «ч») – балластной добавки. В качестве активаторов процессов восстановления и диффузионного хромирования и ванадирования приняты: аммоний хлористый (NH_4Cl марки «ч»); алюминий фтористый AlF_3 ; натрий фтористый NaF . Процессы диффузионного насыщения проводили в металлических контейнерах по стандартной технологии газового насыщения в порошковых силикотермических смесях.

Исследование шероховатости поверхности образцов с нанесенными диффузионными защитными покрытиями, полученными методом химико-термической обработки (хромирования и ванадирования), проводили на образцах, изготовленных из стали марки У10.

В качестве измеряемого параметра выбрана среднеарифметическая высота микронеровностей.

¹ ГОСТ 2789. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 12 с.

Ванадирование. В состав исходной смеси для диффузионного ванадирования входят следующие компоненты: пентаокись ванадия (марки «ч», МРТУ 6-09-6594), силикокальций, окись алюминия, хлористый аммоний².

Исследуемый состав силикотермической смеси для диффузионного ванадирования [1] V (30% СК25)

$$98\% [40\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 60\% (30\% \text{СК25} + 70\% \text{V}_2\text{O}_5)] + \text{A}\%.$$

При восстановлении пентаоксида ванадия силикокальцием проходят следующие реакции:



Соотношение $\text{V}_2\text{O}_5:\text{Ca}$ и $\text{V}_2\text{O}_5:\text{Si}$ должно быть равно соответственно 47,6:52,4 и 72,2:27,8. При содержании в смеси СК25 до 35% проходит процесс ванадирования. При содержании силикокальция в смеси до 20% – неполное восстановление V_2O_5 . Окислы ванадия активно растворяют образцы – уменьшение толщины образцов из сталей У10 достигает 0,75 мм на обе стороны. При содержании СК25 свыше 35% за счет преимущественной диффузии кремния происходит образование пористой фазы Fe_3Si . Увеличение содержания балластной добавки свыше 50% также приводит к формированию Fe_3Si , что является результатом неполного прохождения реакции восстановления и, как следствие этого, наличие свободного кремния в смеси. Исходя из анализа плотности полученных слоев, их микротвердости и толщины карбидной зоны, делаем вывод о целесообразности применения в качестве активатора хлористого аммония. При этом в смеси термодинамически возможны следующие реакции:



Было проведено исследование влияния процентного содержания и вида активатора процесса диффузионного насыщения на шероховатость поверхности образцов и деталей машин, полученной после проведения процесса (таблица 1).

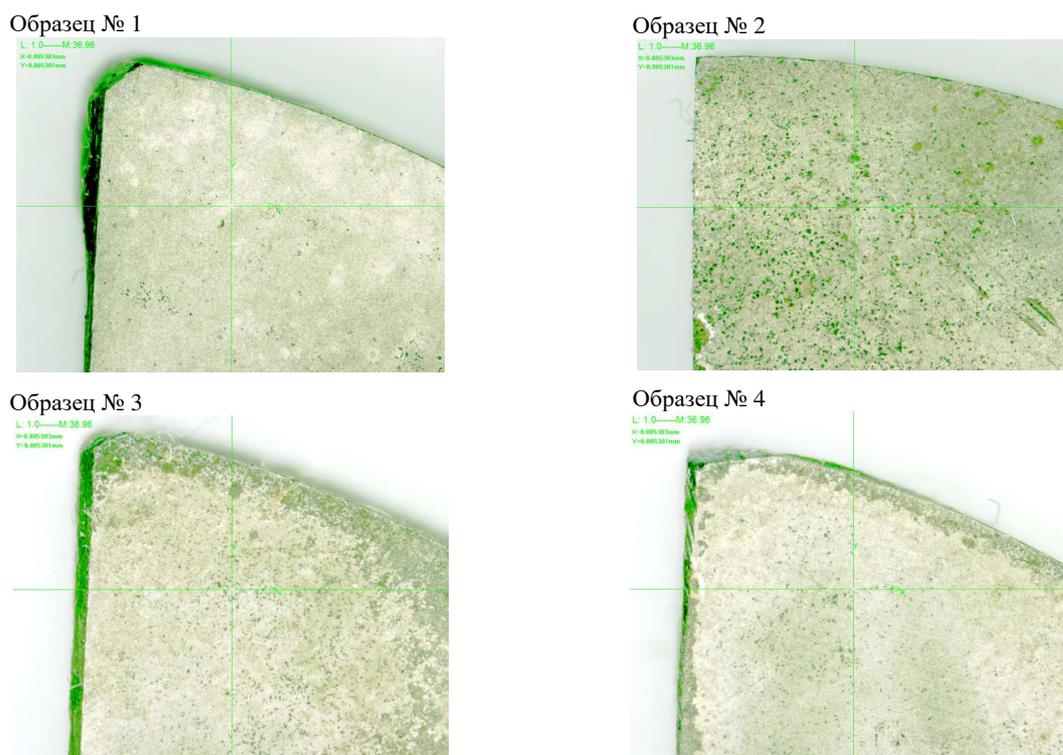
Таблица 1. – Влияние процентного содержания и вида активатора на шероховатость поверхности образцов (R_a , мкм) после нанесения карбидных ванадированных покрытий

Состав смеси для диффузионного ванадирования: $[40\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 60\% (30\% \text{СК25} + 70\% \text{V}_2\text{O}_5)] + \text{A}\%$

| № образца | Содержание Al_2O_3 , % | (100 – n) смеси | | Активатор А, % | Содержание активатора, % | Толщина слоя, мкм | Шероховатость R_a , мкм |
|-----------|----------------------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------------|
| | | СК25 | V_2O_5 | | | | |
| 1 | 40 | 30 | 70 | NH_4Cl | 0,5 | 38 | 1,140 |
| 2 | 40 | 30 | 70 | | 1 | 35 | 1,579 |
| 3 | 40 | 30 | 70 | | 2 | 35 | 1,310 |
| 4 | 40 | 30 | 70 | | 3 | 29 | 1,192 |
| 5 | 40 | 30 | 70 | | AlF_3 | 0,2 | 37 |
| 6 | 40 | 30 | 70 | 0,5 | | 33 | 1,381 |
| 7 | 40 | 30 | 70 | 1 | | 23 | 1,477 |
| 8 | 40 | 30 | 70 | 2 | | 29 | 1,323 |
| 9 | 40 | 30 | 70 | 5 | | 23 | 0,888 |
| 10 | 40 | 30 | 70 | NaF | 0,5 | 33 | 0,889 |
| 11 | 40 | 30 | 70 | | 1,5 | 29 | 0,937 |
| 12 | 40 | 30 | 70 | | 2 | 28 | 1,204 |

Макроанализ поверхности показывает, что максимальное количество пор и дефектов имеет образец № 2, что полностью коррелирует с результатами измерения параметров шероховатости R_a . Кроме того, отмечено: с повышением процентного активатора NH_4Cl до 1% на поверхности образца наблюдается максимальная степень коагуляции карбидов ванадия и инородных включений (рисунок 1).

² Исследование шероховатости поверхности образцов с нанесенными диффузионными покрытиями [Электронный ресурс] / А.П. Андрукович, А.М. Долгих, Л.Н. Косяк и др. // Электрон. сб. трудов молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Вып. 40 (110). Пром-сть / Полоц. гос. ун-т; редкол.: О.А. Романов (гл. ред.) [и др.]. – Новополоцк, 2021. – С. 162–164. URL: <https://elibr.psu.by/bitstream/123456789/32781/1/162-164.pdf>



**Рисунок 1. – Макрогеометрия поверхностного диффузионного карбидного ванадированного слоя с использованием в качестве активатора хлористого аммония NH_4Cl .
Процентное содержание активатора в насыщающей смеси в образцах:
№ 1 – 0,5%; № 2 – 1%; № 3 – 2%; № 4 – 3%**

График имеет ярко выраженный характер с максимумом шероховатости для образцов при содержании активатора в насыщающей смеси 1% (рисунок 2).

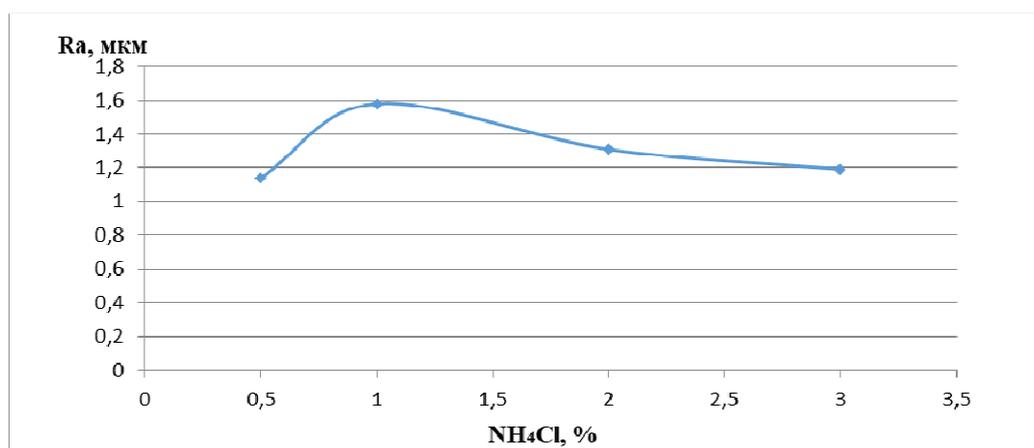
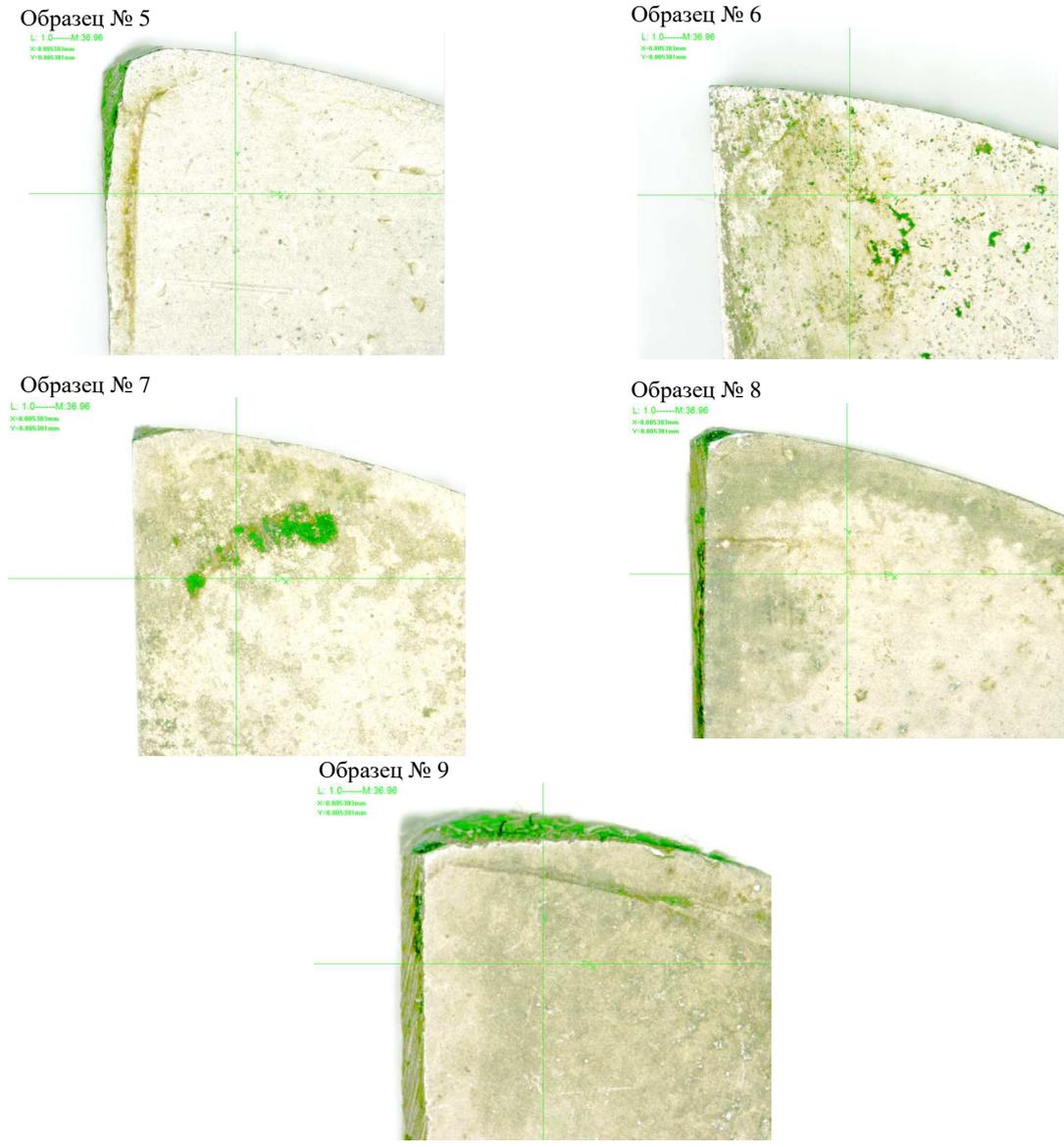


Рисунок 2. – График влияния процентного содержания активатора NH_4Cl на шероховатость поверхности образцов после нанесения карбидных ванадированных покрытий

Максимальное количество несовершенств и коагуляции карбидов ванадия наблюдается у образцов с процентным содержанием активатора процесса насыщения AlF_3 0,5% и 1%. Величина среднеарифметической шероховатости поверхности образцов R_a одинакова с результатами насыщения с использованием в качестве активатора хлористого аммония и составляет 1,6 мкм (рисунок 3).

Для данного типа активатора процесса диффузионного насыщения ванадием фтористого алюминия AlF_3 график показывает явную тенденцию к снижению величины среднеарифметической высоты микронеровности с повышением процентного содержания активатора в насыщающей смеси (рисунок 4).



**Рисунок 3. – Макрогеометрия поверхности образцов с нанесенными диффузионными ванадированными слоями карбидного типа с использованием в качестве активатора процесса фтористого алюминия AlF_3 .
Процентное содержание активатора в насыщающей смеси в образцах:
№ 5 – 0,2%; № 6 – 0,5%; № 7– 1%; № 8 – 2%; № 9 – 5%**

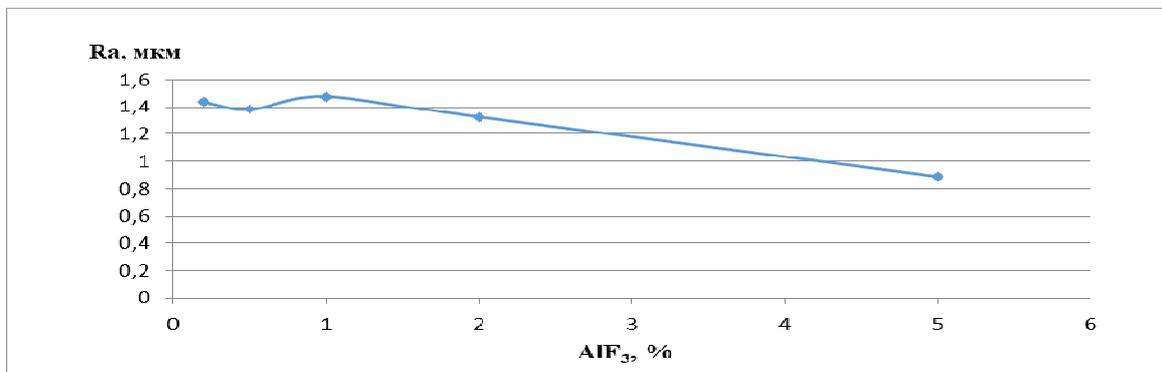


Рисунок 4. – График влияния процентного содержания активатора AlF_3 на шероховатость поверхности образцов после нанесения диффузионных карбидных ванадированных покрытий

Визуальный анализ поверхности насыщения образцов с ванадированными покрытиями карбидного типа показывает повышение степени коагуляции и количества инородных включений и дефектов поверхности с увеличением процентного содержания фтористого натрия в насыщающей смеси. Максимальная величина среднеарифметической высоты микронеровностей образцов с ванадированными карбидными диффузионными покрытиями коррелирует (находится на одном уровне) с результатами, полученными при применении активаторов хлористого аммония и фтористого алюминия (рисунок 5).

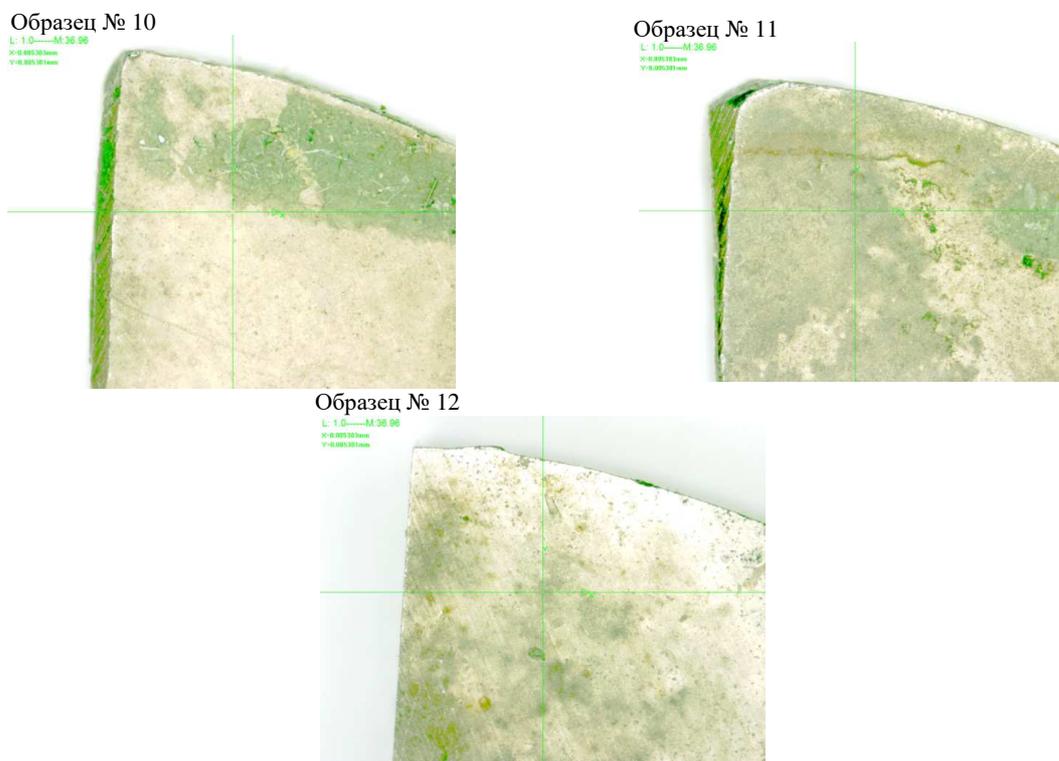


Рисунок 5. – Макроанализ поверхности образцов с нанесенными диффузионными ванадированными слоями карбидного типа с применением в качестве активатора процесса насыщения фтористого натрия NaF. Процентное содержание активатора в насыщающей смеси в образцах: № 10 – 0,5%; № 11 – 1,5%; № 12 – 2%

График имеет устойчивую тенденцию к повышению величины среднеарифметической высоты микронеровностей с увеличением процентного содержания активатора NaF в смеси (рисунок 6).

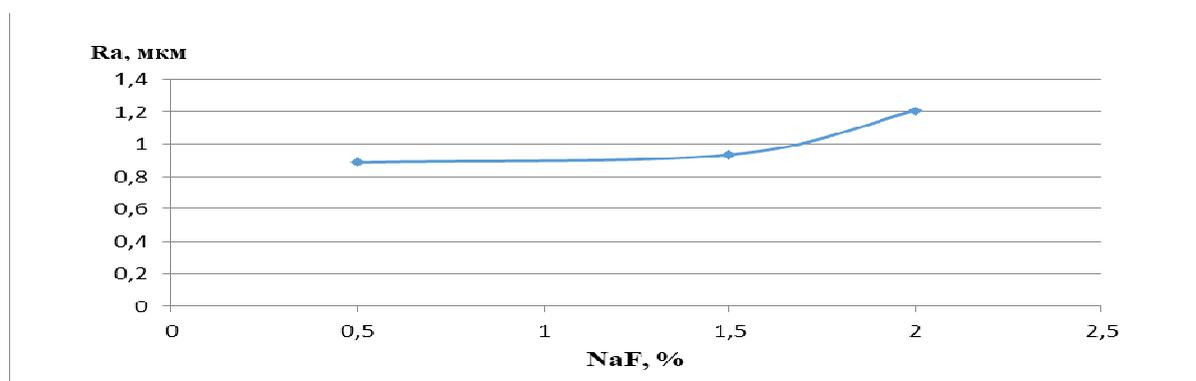


Рисунок 6. – График влияния процентного содержания активатора NaF на шероховатость поверхности образцов после нанесения карбидных ванадированных покрытий

Хромирование. Процесс диффузионного хромирования проводят в исходной смеси, состоящей из следующих компонентов: окиси хрома (Cr_2O_3 марки «ч») – поставщика насыщающих элементов; порошка силикокальция – восстановителя; окиси алюминия (Al_2O_3 марки «ч») – балластной добавки; хлористого аммония (NH_4Cl марки «ч») – активатора³.

В качестве исследуемого состава силикотермической смеси для диффузионного хромирования [1] Cr (25% СК25) принят

$$98\% [40\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 60\% (25\% \text{СК25} + 75\% \text{Cr}_2\text{O}_3)] + \text{A}\%.$$

При использовании в качестве восстановителя силикокальция СК25 основные реакции металлотермического восстановления окиси хрома:



Стехиометрическое соотношение окиси хрома и кальция в смеси равно 55,9:44,1. При использовании в качестве восстановителя порошка кристаллического кремния, реакция восстановления имеет следующий вид:



Стехиометрическое соотношение окиси хрома и кремния в смеси равно 78,4:21,6. Кальций как восстановитель активнее кремния, поэтому он вступает в реакцию первым.

Вследствии наличия в системе кислород-хром низшего окисла хрома CrO восстановление окиси хрома протекает по схеме



Стабильные и качественные результаты получены при диффузионном хромировании в смеси состава

$$98\% [40\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 60\% (25\% \text{СК25} + 75\% \text{Cr}_2\text{O}_3)] + 2\% \text{NH}_4\text{Cl}. \quad (8)$$

На стали У10 формируется двухфазный слой, состоящий из карбидной зоны, содержащей $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$, $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_2$, и зоны α – твердого раствора хрома в железе. Микротвердость карбидной зоны на У10 составляет $H_0 = 16\,500\text{--}17\,800$ МПа; слоя α – $H_0 = 3400\text{--}5600$ МПа.

Смесь для исследования имела состав:

$$98\% [30\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 70\% (25\% \text{СК25} + 75\% \text{Cr}_2\text{O}_3)] + \text{A}\%. \quad (9)$$

Было проведено исследование влияния процентного содержания и вида активатора процесса диффузионного хромирования на шероховатость поверхности образцов и деталей машин (таблица 2).

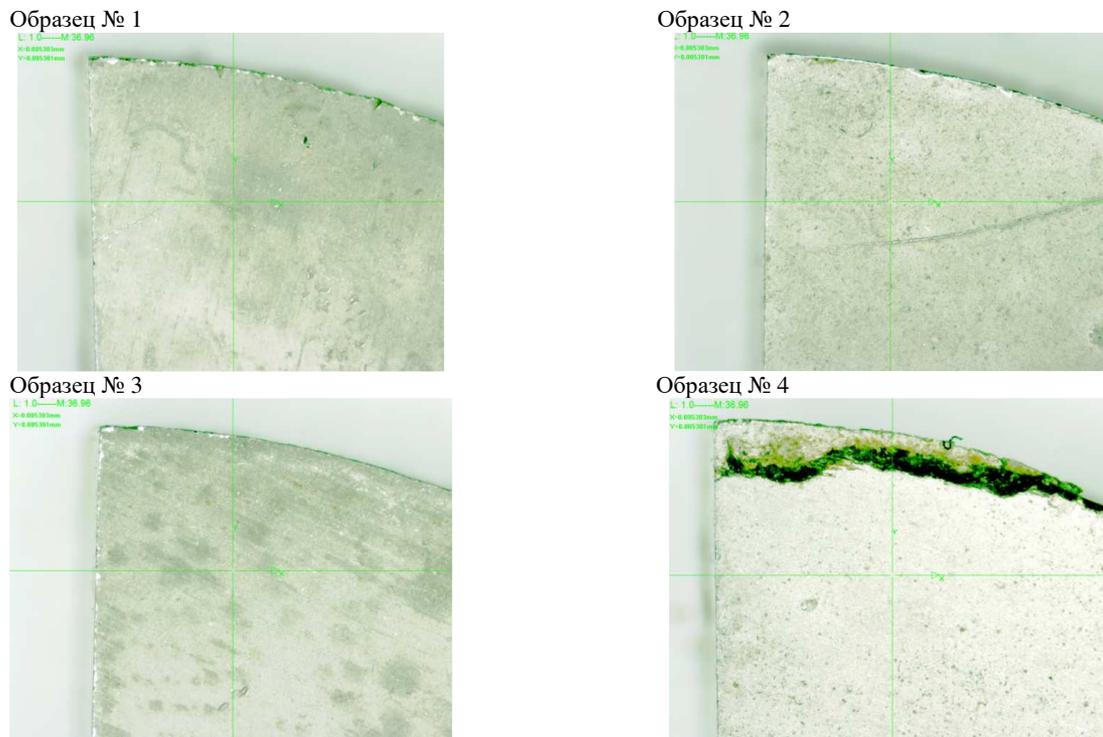
Таблица 2. – Влияния процентного содержания активатора на шероховатость поверхности после нанесения диффузионных карбидных хромированных покрытий

Состав смеси для диффузионного хромирования: $[30\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 70\% (25\% \text{СК25} + 75\% \text{Cr}_2\text{O}_3)] + \text{A}\%$

| № образца | Содержание Al_2O_3 , % | (100 – n) смеси | | Активатор А, % | Содержание активатора, % | Толщина слоя, мкм | Шероховатость R_a , мкм |
|-----------|----------------------------------------|-----------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------------|
| | | СК25 | Cr_2O_3 | | | | |
| 1 | 30 | 25 | 75 | NH_4Cl | 0,5 | 34 | 1,030 |
| 2 | 30 | 25 | 75 | | 1 | 37 | 1,374 |
| 3 | 30 | 25 | 75 | | 2 | 41 | 1,271 |
| 4 | 30 | 25 | 75 | | 3 | 59 | 1,020 |
| 5 | 30 | 25 | 75 | | 0,2 | 50 | 1,127 |
| 6 | 30 | 25 | 75 | AlF_3 | 0,5 | 41 | 1,299 |
| 7 | 30 | 25 | 75 | | 1 | 44 | 1,402 |
| 8 | 30 | 25 | 75 | | 2 | 47 | 1,117 |
| 9 | 30 | 25 | 75 | | 5 | 28 | 0,813 |
| 10 | 30 | 25 | 75 | NaF | 0,5 | 44 | 1,009 |
| 11 | 30 | 25 | 75 | | 1,5 | 33 | 1,430 |
| 12 | 30 | 25 | 75 | | 2 | 33 | 1,321 |
| 13 | 30 | 25 | 75 | | 3 | 35 | 1,070 |

³ Исследование шероховатости поверхности образцов с нанесенными диффузионными покрытиями [Электронный ресурс] / А.П. Андрукович, А.М. Долгих, Л.Н. Косяк и др. // Электрон. сб. тр. молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Вып. 40 (110). Пром-сть / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: О.А. Романов (гл. ред.) [и др.]. – Новополоцк, 2021. – С. 162–164. URL: <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/32781/1/162-164.pdf>

Макроанализ поверхности показывает, что максимальное количество пор и дефектов имеет образец № 2, обработанный в хромирующей смеси, содержащей 1% NH_4Cl , что полностью коррелирует с табличными результатами измерения параметров шероховатости Ra. Кроме того, отмечено, что с повышением процентного содержания активатора NH_4Cl до 1% на поверхности образца наблюдается максимальная степень коагуляции карбидов хрома и инородных включений (рисунок 7).



**Рисунок 7. – Макрогеометрия поверхностного диффузионного карбидного хромированного слоя с использованием в качестве активатора хлористого аммония NH_4Cl .
Процентное содержание активатора в насыщающей смеси в образцах:
№ 1 – 0,5%; № 2 – 1%; № 3– 2%; № 4 – 3%**

График имеет устойчивую тенденцию к повышению величины среднеарифметической высоты микронеровностей с увеличением процентного содержания активатора в смеси (рисунок 8).

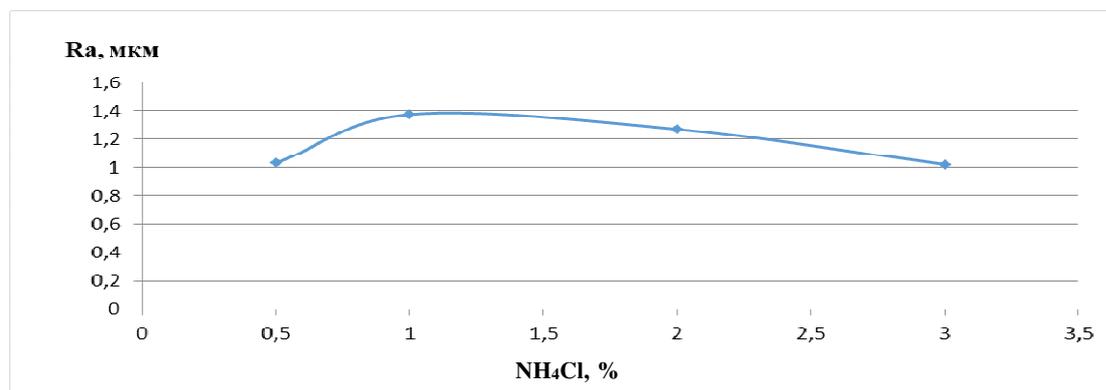


Рисунок 8. – График влияния процентного содержания активатора NH_4Cl на шероховатость поверхности образцов после нанесения карбидных хромированных покрытий

Проведенный макроанализ поверхности образцов показывает, что максимальное количество несовершенств и коагуляции карбидов ванадия наблюдается у образцов с процентным содержанием активатора процесса насыщения AlF_3 0,5% и 1%. Максимальная величина среднеарифметической шероховатости поверхности образцов Ra одинакова с результатами насыщения с использованием в качестве активатора хлористого аммония и составляет 1,4 мкм (рисунок 9).

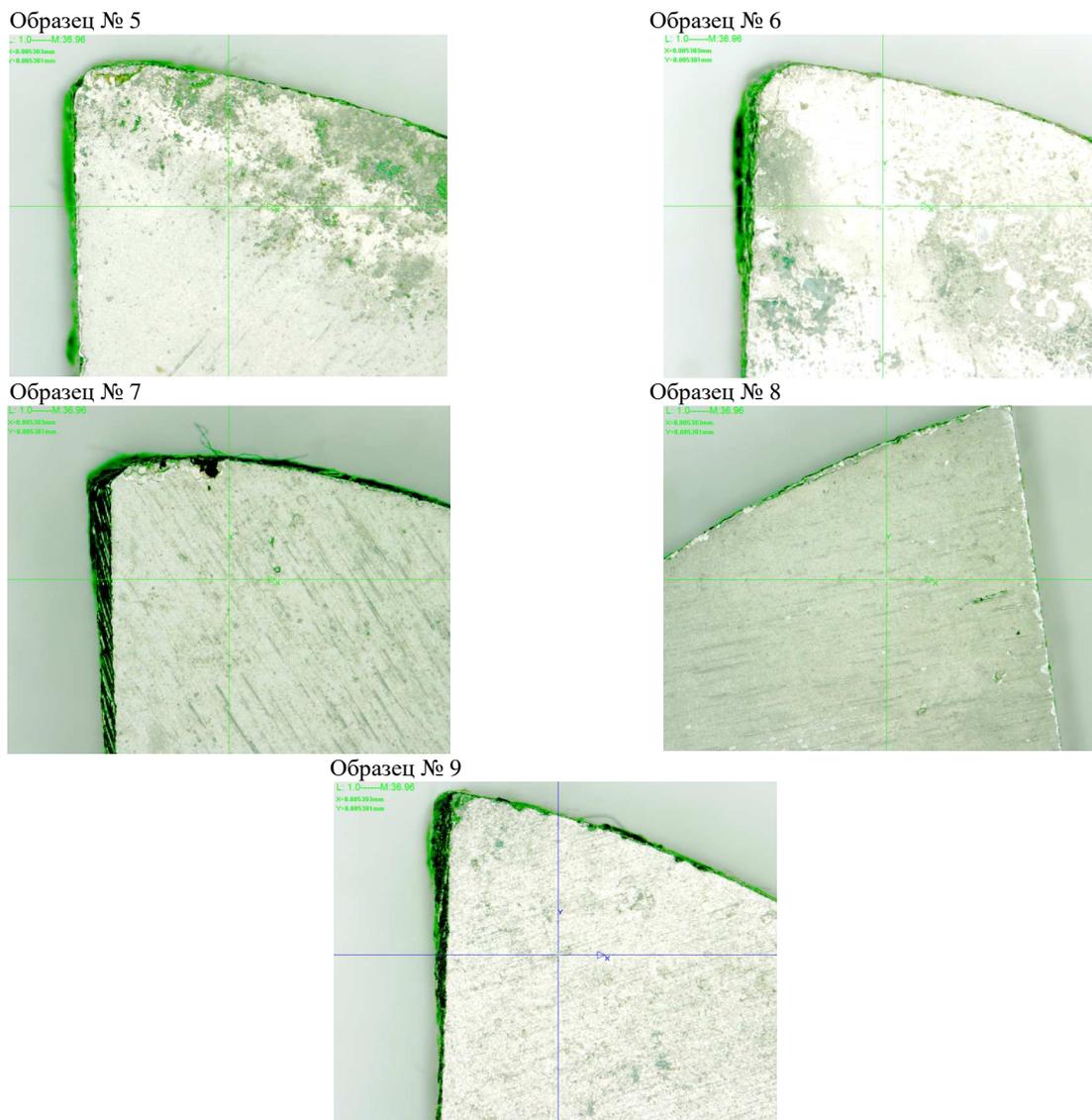


Рисунок 9. – Макрогеометрия поверхностного диффузионного хромированными слоями карбидного типа с использованием в качестве активатора процесса насыщения фтористого алюминия AlF_3

Процентное содержание активатора в насыщающей смеси в образцах:

№ 5 – 0,2%; № 6 – 0,5%; № 7 – 1%; № 8 – 2%; № 9 – 5%

График имеет устойчивую тенденцию к повышению величины среднеарифметической высоты микронеровностей с увеличением процентного содержания активатора AlF_3 в смеси (рисунок 10).

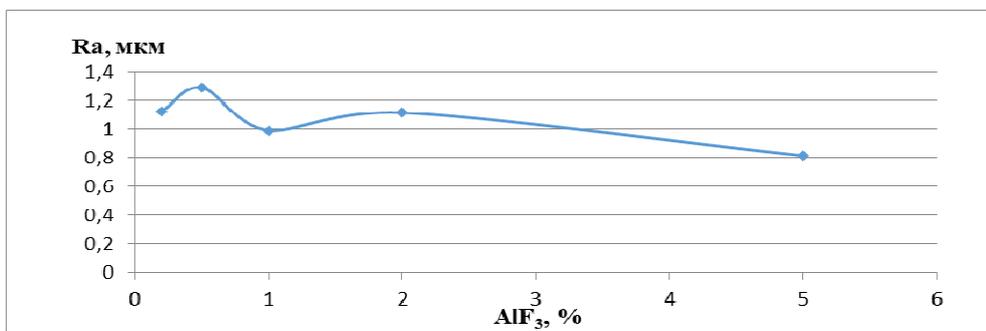


Рисунок 10. – График влияния процентного содержания активатора AlF_3 на шероховатость поверхности образцов после нанесения карбидных диффузионных хромированных покрытий

Визуальный анализ поверхности насыщения образцов показывает повышение степени коагуляции и количества инородных включений с увеличением процентного содержания фтористого натрия в насыщающей смеси. Максимальная величина среднеарифметической высоты микронеровностей образцов с хромированными карбидными покрытиями находится на одном уровне с результатами, полученными при применении в качестве активаторов хлористого аммония и фтористого алюминия (рисунок 11).

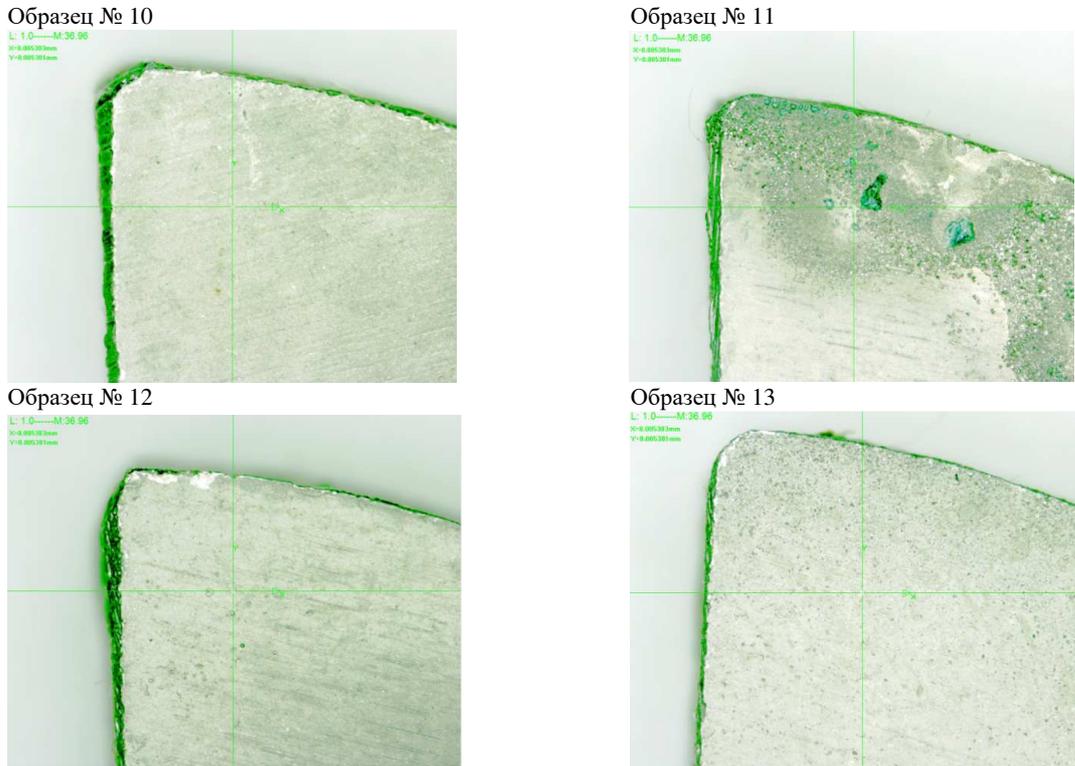


Рисунок 11. – Макроанализ поверхности образцов с нанесенными диффузионными хромированными слоями карбидного типа с применением в качестве активатора процесса насыщения фтористого натрия NaF. Процентное содержание активатора в насыщающей смеси: № 10 – 0,5%; № 11 – 1,5%; № 12 – 2%; № 13 – 3%

График имеет выраженный максимум величины среднеарифметической высоты микронеровностей для образцов, прошедших насыщение в смеси с 1,5% содержания активатора NaF в смеси (рисунок 12).

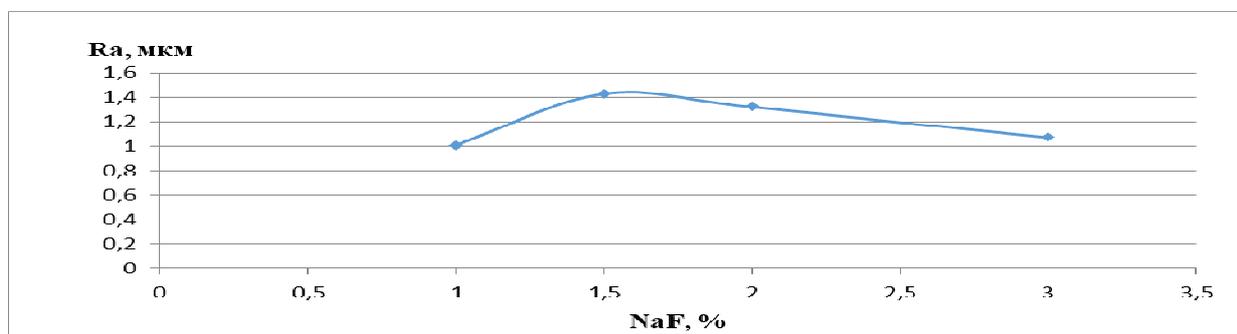


Рисунок 12. – График влияния процентного содержания активатора NaF на шероховатость поверхности после нанесения карбидных диффузионных хромированных покрытий

Очевидно, что технологические режимы проведения процессов диффузионного насыщения деталей машин и механизмов (температура, время выдержки, величина парциального давления в смеси, размеры зерен насыщающей смеси), а также состав и процентное содержание ингредиентов смеси оказывают большое влияние на характеристики и свойства полученных диффузионных слоев.

Изменение процентного содержания балластной добавки, входящей в состав насыщающей смеси, также существенно влияет на величину шероховатости, полученной после диффузионного насыщения. С повышением процентного содержания балластной добавки происходит снижение параметров шероховатости с одновременным уменьшением глубины полученного карбидного слоя (таблица 3). Уменьшение глубины полученного при насыщении диффузного слоя является логическим следствием уменьшения концентрации насыщающих элементов. Одновременно с этим повышение процентного содержания балластной добавки увеличивает газопроницаемость смеси, уменьшает налипание частиц на поверхность образцов, что приводит к снижению шероховатости.

Таблица 3. – Влияние процентного содержания балластной добавки на шероховатость поверхности образцов после проведения процесса диффузионного ванадирования

Смесь: $n\%Al_2O_3 + (100 - n)\%$ (30% СК25 + 70% V_2O_5) + А%

| № образца | Содержание Al_2O_3 , % | (100 – n) смеси | | Активатор NH_4Cl , % | Толщина слоя, мкм | Шероховатость Ra , мкм |
|-----------|--------------------------|-----------------|----------|------------------------|-------------------|--------------------------|
| | | СК25 | V_2O_5 | | | |
| 14 | 20 | 30 | 70 | 2 | 90,5 | 1,765 |
| 15 | 40 | 30 | 70 | 2 | 48 | 1,537 |
| 16 | 50 | 30 | 70 | 2 | 41 | 1,011 |

Как показали проведенные исследования одним из технологических факторов, реально влияющих на параметры шероховатости поверхности после проведения процесса диффузионного насыщения ванадием, является процентное содержание балластной добавки в качестве которой выступает окись алюминия (рисунок 13).

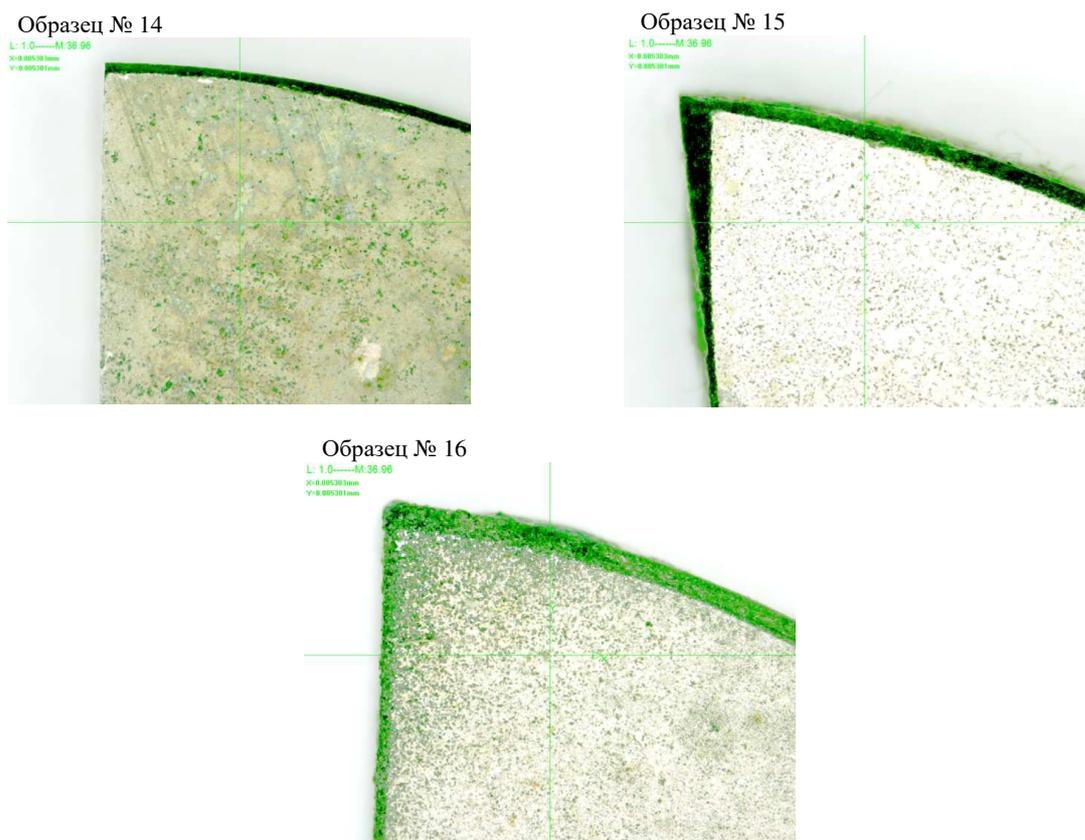


Рисунок 13. – Влияние процентного содержания балластной добавки Al_2O_3 в насыщающей смеси на шероховатость поверхности образцов на шероховатость поверхности образцов после проведения процесса диффузионного ванадирования.

Процентное содержание активатора в насыщающей смеси в образцах:

№ 14 – 20%; № 15 – 40%; № 16 – 50%

График имеет устойчивую тенденцию к снижению величины среднеарифметической высоты микронеровностей с увеличением процентного содержания активатора в смеси, что подтверждает факт улучшения качества поверхности с улучшением газопроницаемости смеси (рисунок 14).

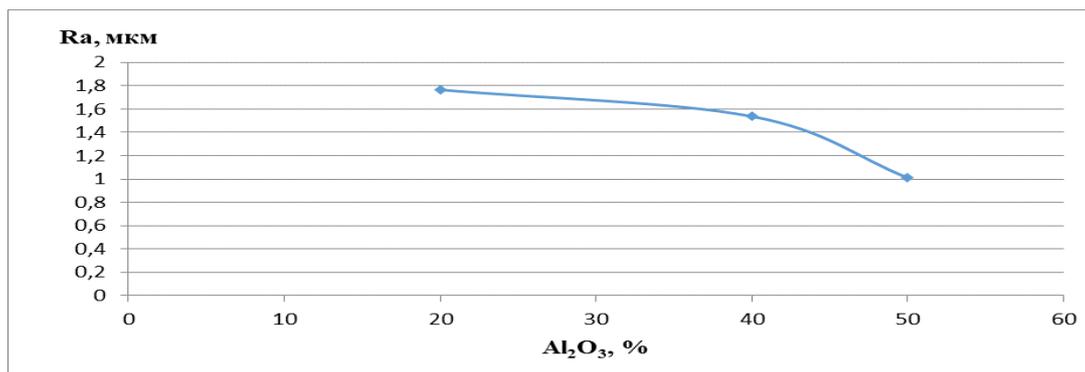


Рисунок 14. – График влияния процентного содержания активатора Al₂O₃ в насыщающей смеси на шероховатость поверхности образцов после проведения процесса диффузионного ванадирования

Процентное содержание балластной добавки в насыщающей смеси оказывает значительное влияние на ее технологические характеристики: от процесса восстановления, подготовки смеси и далее к работе (перемешивание входящих в состав компонентов, измельчение, просеивание, просушивание). График (см. рисунок 14) отражает влияние фракционного содержания балластной добавки на шероховатость полученной поверхности.

Заключение.

– Проведенные исследования убедительно показывают, что на параметры шероховатости поверхности, полученные после нанесения покрытий диффузионного типа, существенное влияние оказывают как вид применяемого активатора, так и его процентное содержание в насыщающей смеси. Это означает, что, подбирая соответствующий активатор процесса диффузионного насыщения, можно получить шероховатость поверхности покрытия, исключающую необходимость в дополнительной механической обработке для получения поверхности меньшей величины.

– При проведении процессов диффузионного хромирования и ванадирования все три вида примененных активаторов оказывают практически одинаковое влияние на изменение величины шероховатости (среднеарифметическая высота микронеровностей Ra, мкм), полученной после обработки поверхности. Характер кривых также идентичен выраженному максимуму повышения величины шероховатости поверхности;

– Изменение процентного содержания балластной добавки в насыщающей смеси существенно влияет на величину шероховатости, полученной после диффузионного насыщения поверхности. С повышением процентного содержания балластной добавки происходит снижение параметров шероховатости с одновременным уменьшением глубины полученного карбидного слоя.

– Наименьшее изменение шероховатости поверхности образцов после нанесения защитных покрытий диффузионного типа показывают слои на основе карбида хрома.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгих А.М. Химико-термическая обработка материалов: учеб.-метод. комплекс. – Новополоцк: ПГУ, 2010. – 224 с.
2. Ворошнин Л.Г. Теория и технология химико-термической обработки: учеб. пособие. – Минск: Новое знание, 2010. – 304 с.
3. Металловедение. Термическая и химико-термическая обработка сплавов: сб. науч. тр. / под ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Изд-во МГТУ, 2003. – 246 с.
4. Многокомпонентные диффузионные покрытия / Л.С. Ляхович, Л.Г. Ворошнин, Г.Г. Панич и др. – Минск: Наука и техника, 1974. – 288 с.
5. Стуканов В.А. Металловедение. – М.: Форум; ИНФРА-М, 2008. – 368 с.

REFERENCES

1. Dolgikh, A.M. (2010). *Khimiko-termicheskaya obrabotka materialov: ucheb.-metod. kompleks*. Novopolotsk: PGU. (In Russ.)
2. Voroshnin, L.G. (2010). *Teoriya i tekhnologiya khimiko-termicheskoi obrabotki: ucheb. Posobie*. Minsk: Novoe znanie. (In Russ.)
3. Arzamasov, B.N. (Ed.). (2003). *Metallovedenie. Termicheskaya i khimiko-termicheskaya obrabotka splavov: sb. nauchn. tr.* Moscow: Izd-vo MG TU. (In Russ.)
4. Lyakhovich, L.S., Voroshnin, L.G., Panich, G.G. & Shcherbakov, E.D. (1974). *Mnogokomponentnye diffuzionnye pokrytiya*. Minsk: Nauka i tekhnika. (In Russ.)
5. Stukanov, V.A. (2008). *Materialovedenie: ucheb. posobie*. Moscow: Forum; INFRA-M. (In Russ.)

Поступила 03.01.2023

**THE EFFECT OF THE PERCENTAGE OF THE ACTIVATOR TYPE
AND THE BALLAST ADDITIVE Al_2O_3 ON THE SURFACE ROUGHNESS
OF DIFFUSION CHROME AND VANADED LAYERS**

A. DOLGIKH, A. ANDRUKOVICH, L. KOSYAK, V. ANISIMOV
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

Protective coatings of various types are increasingly used in modern industry. The study of the operational properties of coatings, which include the surface quality after application, is an urgent task that determines the operational characteristics and the possibility of using machine parts with coatings without additional machining. The surface roughness of the samples with diffusion-applied protective single-component coatings based on chromium and vanadium carbides was investigated and the area of possible operation of the parts was determined. Of practical interest is the study of the influence of technological factors of coating application (changes in the percentage and type of the activator of the saturation process, the percentage of the ballast additive) on the arithmetic mean height of micro-dimensions.

Keywords: *chemical-thermal treatment, diffusion chrome plating, diffusion vanading, protective coatings, parameters of the chemical-thermal treatment, arithmetic mean height of micro-dimensions, macroanalysis of the surface of protective coatings, ballast additive.*