

Научная статья

УДК 621.793.3+621.785.3

doi: 10.30987/2223-4608-2022-2-3-10

Структура и свойства композиционных слоев, полученных отжигом CVD-покрытий на инструментальной стали

Ирина Станиславовна Белашова¹, д.т.н.,

Лариса Георгиевна Петрова², д.т.н.,

Андрей Александрович Брежнев³, к.т.н.

^{1,2,3} *Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),*

г. Москва, Россия

¹irina455@inbox.ru,

²petrova_madi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7248-2454>,

³awreliy@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрено исследование структурных изменений в хромовых CVD-покрытиях на инструментальной стали в результате отжига и их влияние на остаточные напряжения и адгезию покрытия со стальной подложкой. Приведены результаты исследований остаточных напряжений в хромовом покрытии и относительного показателя адгезии. Показано, что нагрев газофазного покрытия приводит к образованию транзитивного слоя между покрытием и подложкой, увеличивающего их адгезию.

Ключевые слова: инструментальная сталь, режущий инструмент, хромовые CVD-покрытия, отжиг, адгезионная прочность

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №FSFM-2020-0011 (2019-1342), экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования МАДИ.

Для цитирования: Белашова И.С., Петрова Л.Г., Брежнев А.А. Структура и свойства композиционных слоев, полученных отжигом CVD покрытий на инструментальной стали // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №2 (128). – С. 3-10. doi:10.30987/2223-4608-2022-2-3-10.

Original article

Structure and properties of composite layers by means of CVD coating annealing on tool steel

Irina S. Belashova¹, Dr. Sn. Tech.,

Larisa G. Petrova², Dr. Sn. Tech.,

Andrey A. Brezhnev³, Can. Sn. Tech.

^{1,2,3} *Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia*

¹irina455@inbox.ru, ²petrova_madi@mail.ru, ³awreliy@yandex.ru

Abstract. The study of structural changes in chrome CVD coatings on tool steel as a result of annealing and their effect on residual stresses and adhesion of coating having steel substrate, has been considered. The results of studies of residual stresses in the chrome coating and the relative adhesion index are presented. It is shown that heating of the gas-phase coating leads to the formation of a transitive layer between the coating and the substrate, increasing their adhesion.

Keywords: tool steel, cutting tools, chrome CVD coatings, annealing, adhesion strength

Acknowledgements: the material was prepared within the framework of scientific research under the project

№FSFM2020-0011 (2019-1342); experimental studies were carried out using the equipment of the MADI Centre of collective usage.

For citation: Belashova I.S., Petrova L.G., Brezhnev A.A. Structure and properties of composite layers obtained by annealing CVD coatings on tool steel. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, No. 2 (128), pp. 3-10.
doi:10.30987/2223-4608-2022-2-3-10.

Введение

В настоящее время активно развиваются различные способы поверхностного упрочнения режущего инструмента для повышения его стойкости и ресурса работы, среди которых особое место занимают многообразные методы формирования износостойких покрытий [1 – 4]. Достаточно подробно исследованы покрытия на основе металлов (хрома; никеля; железа; молибдена), а также карбидов и нитридов.

Одним из эффективных методов нанесения покрытий является CVD-процесс (Chemical Vapor Deposition), заключающийся в газофазном осаждении на стальную подложку металлов, восстановленных из паров летучих веществ в результате химических реакций [5].

Существует возможность создания на сталях покрытий тех металлов, которые образуют химические соединения, например, карбонилы [6], способные разлагаться при определенных условиях с последующей конденсацией металлического компонента на стальной подложке.

Метод осаждения покрытий из паров металлоорганических соединений (МОС) применяется для поверхностного упрочнения не только сталей [7], но и цветных сплавов [8]. Получаемые покрытия принято называть пиролитическими [9, 10], что отражает терминологию, применяемую для процессов термического разложения органических соединений.

Пиролитические хромовые покрытия имеют ряд преимуществ, главным из которых является относительно низкая температура процесса осаждения, что становится возможным благодаря высокой летучести и хорошей реакционной способности хром-органических соединений. Этот фактор важен как для энергосбережения, так и для сохранности структуры и свойств сердцевины обрабатываемых изделий. К технологическим достоинствам процесса относятся простота оборудования, невысокий вакуум при осаждении покрытия, возможность осаждения на инструмент сложной формы.

Хромовые покрытия, осаждаемые из паров бис-ареновых соединений, обладают высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами: микротвердостью; коррозионной стойкостью; износостойкостью;

беспористостью. Однако как и для других покрытий, получаемых без заметного диффузионного проникновения наносимого элемента вглубь подложки, для CVD-покрытий довольно остро стоит проблема отслаивания. Кроме того, осаждение из газовой фазы происходит циклически, что может приводить к образованию новых фаз (например, карбидных) и вызывать неблагоприятные напряжения в поверхностном слое. Это также чревато снижением адгезии, а следовательно, ухудшением надежности и долговечности инструмента в процессе эксплуатации.

Известно, что добиться улучшения прочности сцепления покрытия с подложкой можно путем дополнительного термического воздействия, при котором формируется переходный диффузионный слой на границе покрытия с подложкой. В частности, показано образование такого слоя при химико-термической обработке цинкового покрытия на стали, что существенно повысило адгезию покрытия [11].

Термическая обработка хромовых покрытий открывает новые возможности для протекания фазовых и структурных превращений с эффектом наноструктурирования и формированием на поверхности хромо-карбидного композита [12 – 14]. Целью настоящей работы является исследование структурных изменений в хромовых CVD-покрытиях на инструментальной стали в результате отжига и их влияние на остаточные напряжения и адгезию покрытия со стальной подложкой.

Методика проведения исследований

Исследования проводили на образцах инструментальной стали ХВГ. Перед нанесением покрытия поверхность образцов тщательно обрабатывали для улучшения адгезионной прочности покрытия: проводили обезжиривание; удаление оксидов серной кислотой; травление и очищение от травильного шлама.

Эксперименты по осаждению хромовых покрытий проводили на лабораторной установке, содержащей реакционную камеру, в которую на подложку помещались исследуемые образцы. Сперва осуществлялась трехкратная продувка вакуумной системы

аргоном, предварительно осушенным в печи при температуре 950...1000 °С, а затем при помощи форвакуумного насоса в реакционной камере создавался вакуум с давлением 10^{-1} Па.

В качестве источника формирования паров летучих соединений использовали хром-органическую жидкость «Бархос», представляющую собой смесь бис-ареновых соединений хрома (бис-бензолхрома $[(C_6H_6)_2Cr]$, бис-этилбензолхрома $[(C_2H_5C_6H_5)_2Cr]$ и бис-диэтилбензолхрома $[(C_6H_5)_2C_6H_4]_2Cr$). При помощи дозатора осуществляли циклическую подачу рабочей жидкости в испаритель по 0,5 мл через каждые 30 с, после чего образовавшиеся пары МОС совместно с аргоном поступали в реакционную камеру.

Осаждение покрытий проводили при температурах в интервале 430...510 °С, обеспечивающих формирование покрытий различного типа: кинетического; диффузионного и переходного (смешанного). Основными параметрами процесса осаждения являются температура подложки, температура испарителя, а также продолжительность процесса. Температура на подложке и на испарителе поддерживалась автоматически при помощи потенциометра. Охлаждение образцов с покрытием производилось на воздухе.

Последующую термическую обработку (отжиг) образцов с покрытиями проводили непосредственно в реакционной камере установки в защитной атмосфере аргона при температурах в интервале 510...560 °С в течение времени от 0,5 до 1,5 ч. Исследование микроструктур покрытий проводили на металлографическом микроскопе Neophot-21. Рентгеноструктурный анализ фазового состава выполняли на установке ДРОН-3 в хромовом $Sr_{K\alpha}$ излучении ($\lambda = 0,22909$ нм) и кобальтовом $Co_{K\alpha}$ излучении ($\lambda = 0,17902$ нм).

Распределение микротвердости по толщине покрытий измеряли на микротвердомере ПМТ-3 под нагрузкой 50 г. Величину остаточных напряжений ($-\sigma_1^0$) образцов с покрытиями определяли методом измерения прогиба. Для оценки прочности сцепления хромового покрытия с подложкой производили обжатие прямоугольных образцов на 25 % по высоте на разрывной машине ИМ-4А, в результате чего происходило частичное отслаивание (осыпание) материала покрытия. Относительный показатель адгезии определяли по формуле: $W = (m_C/m_0) \cdot 100\%$, где m_C – масса образца после испытаний на сжатие, m_0 – исходная

масса образца до испытаний.

Результаты и обсуждение

В зависимости от температуры осаждения газофазные хромовые покрытия могут образовываться по кинетическому или диффузионному механизму [9].

Покрытия кинетического типа формируются при температурах процесса около 420...430 °С, они практически полностью аморфны, в связи с чем слабо травятся и имеют небольшую толщину (рис. 1, а).

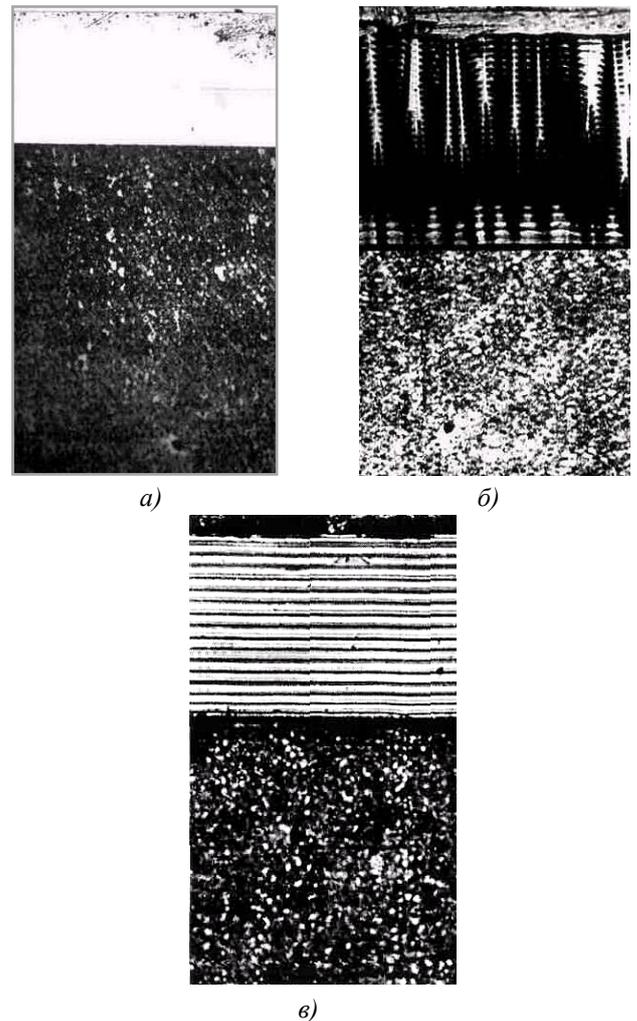


Рис. 1. Микроструктуры покрытий, полученных в различных режимах осаждения:

а – кинетическом при 430 °С; б – диффузионном при 510 °С; в – переходном при 470 °С

Поскольку в исходной металлоорганической жидкости присутствуют углеводороды, то это обуславливает присутствие в аморфном хrome растворенного углерода, что подтверждает микрорентгеноспектральный анализ [13].

При температурах осаждения 510...520 °С создаются условия для протекания диффузионного процесса, в результате чего образуется вертикально-столбчатая структура с выделением карбидов хрома (см. рис. 1, б), ориентация которых обусловлена особенностями массопереноса исходного химического соединения к поверхности подложки.

В промежуточном температурном интервале (450...480 °С) осаждаются покрытия переходного типа, в которых наблюдается горизонтально-слоистая структура из чередующихся темных и светлых горизонтальных прослоек (см. рис. 1, в). Они образуются попеременно по кинетическому и диффузионному механизму, чему способствует циклическая подача МОС в испаритель.

Темные слои имеют кристаллическую структуру и содержат больше углерода вследствие изменения концентрации МОС и продуктов их распада около подложки на разных циклах процесса. В результате чего в них образуются карбиды хрома, Cr_7C_3 и $Cr_{23}C_6$, выявляемые рентгеноструктурным анализом. Светлые слои являются аморфными и представляют собой пересыщенный твердый раствор углерода в хrome.

Как показали эксперименты, термическая обработка не приводит к каким-либо существенным изменениям в структуре покрытий кинетического и диффузионного типа (рис. 2, а, б).

В первом случае низкотемпературный режим осаждения не позволяет сформировать достаточное число критических зародышей для кристаллизации аморфной фазы, во втором случае в результате высокотемпературного осаждения формируется термически стабильная структура, поэтому повторный нагрев не вызывает заметных превращений в покрытиях.

Последующая термообработка оказывает влияние на структуру слоистых покрытий переходного типа, поскольку при отжиге инициируется кристаллизация в аморфных прослойках. Нагрев способствует переходу метастабильного аморфного твердого раствора в равновесное состояние с образованием кристаллической структуры на базе карбидов хрома. Наименьшая критическая температура отжига, при которой начинается кристаллизация аморфной фазы, составляет 540 °С. Зародышами кристаллизации являются частицы мелкокристаллической хромо-карбидной смеси в соседних прослойках (см. рис. 2, в).

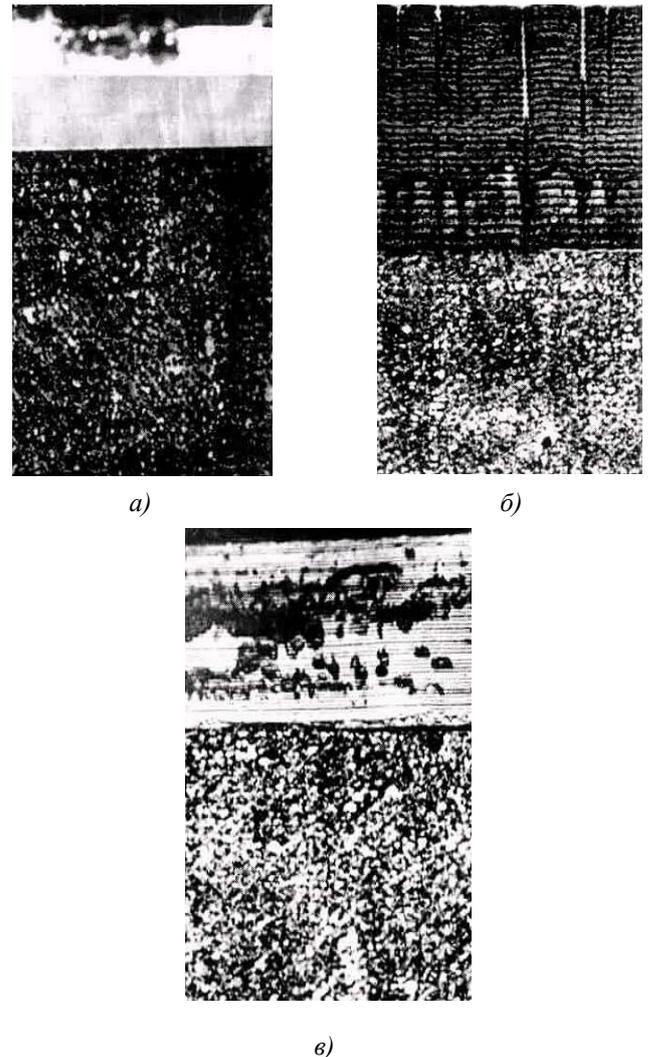


Рис. 2. Микроструктуры покрытий, полученных в различных режимах осаждения:

а – кинетическом при 430 °С; б – диффузионном при 510 °С; в – переходном при 470 °С после отжига при 560 °С, 1 ч

На рис. 3, а, б видно, что после отжига при 550 °С в слоистой структуре выделяются частицы карбидов и образуются их конгломераты в отдельных участках слоя. Приблизительный размер выделяющихся частиц составляет 100...200 нм.

По мере увеличения времени отжига процессы кристаллизации становятся более заметными, происходит увеличение объемной доли карбидных частиц вплоть до нарушения слоистости покрытия и его полной кристаллизации с исчезновением аморфной фазы (см. рис. 3, в). Подобные процессы происходят и при повышении температуры отжига: наблюдается обособление и укрупнение карбидной фазы, появление границ раздела между

металлической основой покрытия и кристаллическими карбидами (см. рис. 2, в).

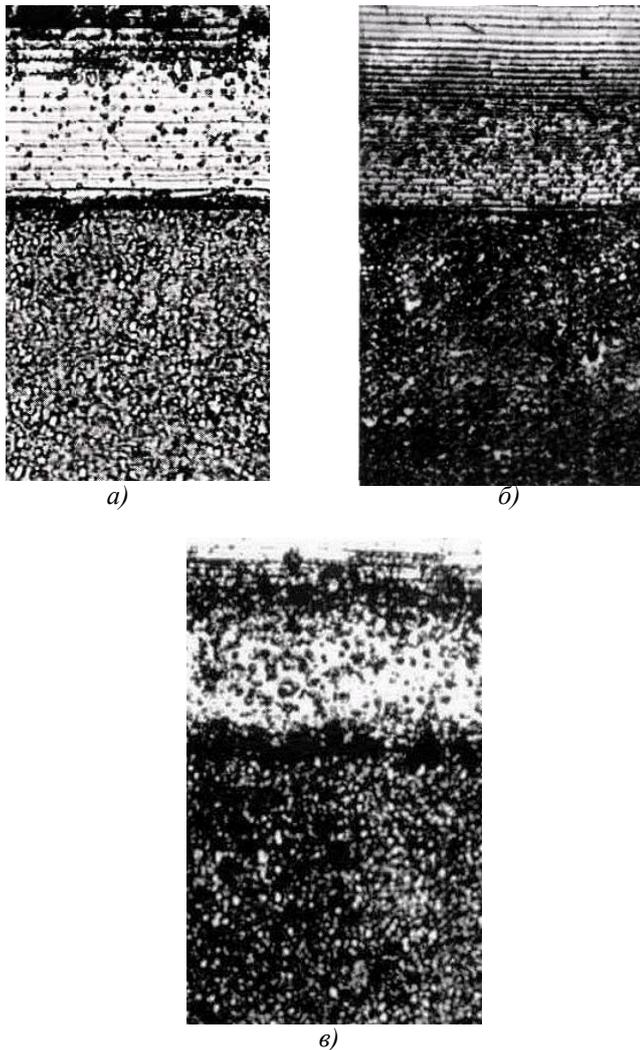


Рис. 3. Микроструктуры покрытия, полученного в переходном режиме осаждения при 470 °С, 1 ч, после отжига при 550 °С:
 а – 0,5 ч; б – 1 ч; в – 1,5 ч

Таким образом, путем отжига формируется композиционное хромо-карбидное покрытие, обладающее высокой твердостью, существенно превышающей твердость исходного покрытия переходного типа (рис. 4).

Повышение микротвердости обусловлено дисперсионным упрочнением покрытия наноразмерными частицами карбидов хрома, когерентно связанными с твердым раствором. С увеличением температуры отжига уровень упрочнения несколько понижается, что объясняется обособлением карбидных частиц и их коагуляцией.

Термообработка покрытий переходного ти-

па приводит к изменению характера профилей микротвердости образцов с покрытиями: распределение твердости по глубине после отжига становится плавным (см. рис. 4). Это свидетельствует о формировании под покрытием диффузионной транзитивной зоны (толщиной 15...20 мкм), что является следствием термически активируемой взаимной диффузии: хрома из покрытия в подложку и углерода из подложки в покрытие.

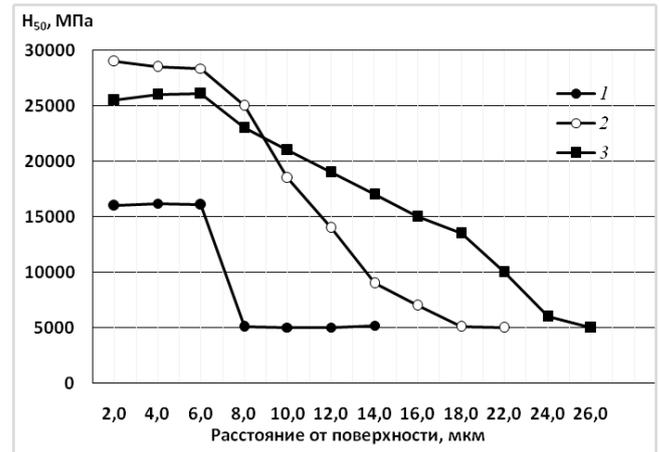


Рис. 4. Распределение микротвердости по толщине образцов с покрытиями переходного типа без дополнительной термообработки (1) и после отжига при температуре 550 °С (2) и 560 °С (3)

Образование диффузионной зоны на границе покрытия с подложкой является предпосылкой повышения его адгезии. Известно, что на прочность сцепления покрытия с подложкой влияет уровень остаточных напряжений сжатия в покрытии, который зависит от их строения.

Ранее было показано [13], что уровень остаточных напряжений хромовых покрытий, полученных газофазным осаждением из МОС, зависит от температуры осаждения и, следовательно, от типа формирующегося покрытия. Минимальный уровень напряжений соответствует кинетическому режиму осаждения (при 430 °С); в начальной стадии диффузионного режима (при 510 °С) величина остаточных напряжений достигает максимума, а покрытия переходного режима (при 470 °С) имеют промежуточные значения остаточных напряжений. При любом режиме осаждения величина остаточных напряжений возрастает с увеличением толщины покрытия. Рост остаточных напряжений с повышением температуры осаждения связан с образованием кристаллической карбидной фазы, что сопровождается

увеличением объема.

Проведение термообработки оказывает заметное влияние на величину остаточных напряжений именно в покрытиях переходного типа (рис. 5) вследствие происходящих изменений в строении покрытия и его упрочнения.

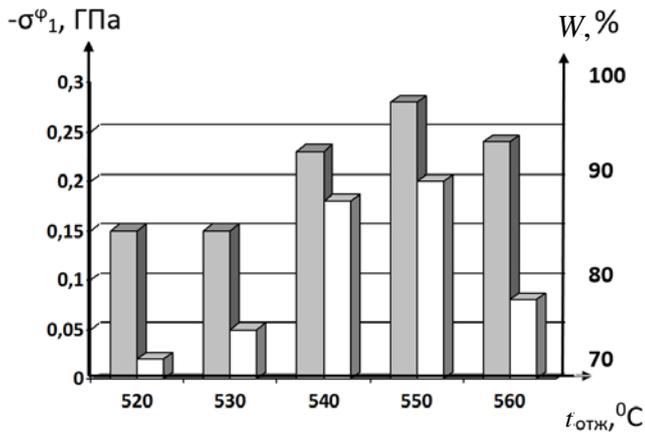


Рис. 5. Остаточные напряжения в хромовом покрытии ($-\sigma^{\phi}$) и относительный показатель адгезии (W) покрытия с подложкой из стали ХВГ после осаждения в переходном режиме при 470°C , 1 ч и последующего отжига при различных температурах

Отжиг при температурах ниже критической ($520\dots 530^{\circ}\text{C}$), который не приводит к заметному выделению карбидной фазы в аморфных прослойках покрытия, снижает остаточные напряжения в покрытии (величина которых составляла $0,22$ ГПа в режиме осаждения 470°C , 1 ч). При достижении критической температуры (540°C) начинается процесс кристаллизации аморфной фазы с образованием мелкодисперсных кристаллических карбидов. Увеличение объемной доли карбидов сопровождается увеличением объема, что приводит к росту внутренних напряжений с повышением температуры отжига. При дальнейшем повышении температуры (560°C) происходит некоторое снятие внутренних напряжений вследствие коагуляции карбидов.

Сравнение адгезионной прочности покрытий переходного типа на стали ХВГ до и после отжига показало, что относительный показатель адгезии в результате термообработки при температурах ниже критической ($520\dots 530^{\circ}\text{C}$) несколько снижается (на $7\dots 10\%$). Проведение отжига при температурах $540\dots 550^{\circ}\text{C}$ вызывает увеличение адгезионной прочности покрытия в полной корреляции с тенденциями изменения внутренних напряжений (см. рис. 5). Дальнейшее повыше-

ние температуры отжига, которое приводит к релаксации внутренних напряжений благодаря завершению формирования стабильной кристаллической структуры, закономерно ведет к ослаблению когезионного взаимодействия покрытия с подложкой.

Как следует из приведенного анализа, уровень остаточных напряжений сжатия и связанная с ним адгезионная прочность покрытий, определяется степенью протекания процессов кристаллизации аморфной фазы. Однако скорость кристаллизации определяется не только температурой, но и продолжительностью процесса, что вызывает необходимость исследования влияния времени отжига на соответствующие характеристики покрытий.

Экспериментально установлено, что увеличение длительности отжига при температурах ниже температур начала кристаллизации аморфной фазы (530°C) практически не влияет на величину остаточных напряжений (кривая 1 на рис. 6), поскольку не происходит никаких структурных превращений.

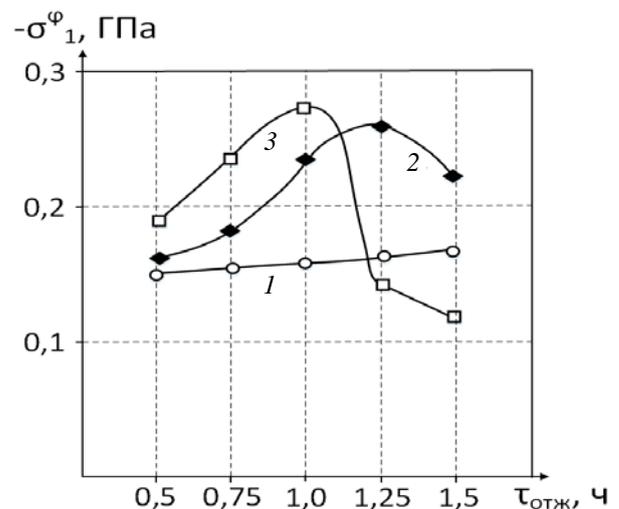


Рис. 6. Зависимость величины остаточных напряжений в покрытии переходного типа (режим осаждения 470°C , 1 ч) от продолжительности последующего отжига:
 1 – $t = 530^{\circ}\text{C}$; 2 – $t = 540^{\circ}\text{C}$; 3 – $t = 550^{\circ}\text{C}$

При температуре отжига 540°C кристаллизация начинается при длительности выдержки около 1 ч, и завершается через 1,25 ч (кривая 2 на рис. 6), что и будет оптимальным временем процесса. Дальнейшее увеличение продолжительности приводит к релаксации напряжений. При повышении температуры отжига до 550°C максимум остаточных напряжений на кривой зависимости (кривая 3 на рис. 6) сдвигается в сторону меньшего времени выдержки:

оптимальная продолжительность процесса – 1 ч.

Соответствующие закономерности характерны и для зависимости адгезионной прочности от времени отжига (рис. 7): при более высоких температурах отжига оптимальная длительность процесса для достижения максимальной адгезии сокращается, поскольку формирование кристаллической структуры с выделением карбидных частиц начнется быстрее, как и быстрее наступит релаксация напряжений при завершении кристаллизации.

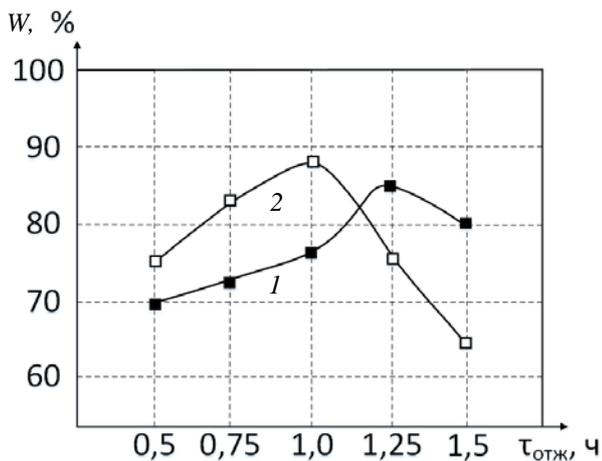


Рис. 7. Зависимость относительного показателя адгезии покрытия переходного типа (режим осаждения 470 °C, 1 ч) от продолжительности последующего отжига:

1 – t = 540 °C; 2 – t = 550 °C

Заключение

Экспериментально установлено формирование упрочненных композиционных хром-карбидных слоев на поверхности инструментальной стали при отжиге хромового покрытия, нанесенного методом осаждения из паров хром-органических соединений в переходном режиме температур (470 °C). Микроструктура композиционного покрытия формируется в результате кристаллизации прослоек аморфной фазы с образованием наноразмерных выделений карбидов хрома, что вызывает повышение твердости покрытия вследствие дисперсионного упрочнения.

Нагрев газофазного покрытия при температурах отжига 540...560 °C активизирует диффузионные процессы, что приводит к образованию транзитивного слоя между покрытием и подложкой, увеличивающего их сцепление. Установлена корреляция между увеличением адгезии и уровнем сжимающих остаточных

напряжений, усиливающихся при кристаллизации аморфной фазы покрытия и выделении когерентных карбидов. Показано, что существуют оптимальные параметры отжига (температура и продолжительность), которые в максимальной степени увеличивают адгезию покрытия с подложкой. Нижние границы этих параметров связаны с началом кристаллизации, а верхние пределы – с коагуляцией карбидных частиц, что вызывает релаксацию напряжений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кремнев, Л.С., Виноградова, Л.А., Онегина, А.К., Сапронов, И.Ю. Особенности состава, структуры и свойств быстрорежущих сталей для металлорежущего инструмента с ионно-плазменными покрытиями на основе нитрида титана // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2012. – №1 (679). – С. 4-9.
2. Повышение стойкости режущего инструмента методом модифицирования поверхности с нанесением покрытий из соединений вольфрама в высокочастотном разряде / В.А. Александров, Л.Г. Петрова и др. // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2018. – Т. 14. – №1 (157). – С. 30-35.
3. Афанасьева, Л.Е., Барабонова, И.А., Раткевич, Г.В. Лазерная наплавка быстрорежущей стали // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. – 2018. – № 11. – С. 53-57.
4. Александров, В.А., Вдовин, В.М., Сергеева, А.С. Создание износостойких покрытий для режущего инструмента // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. – 2017. – № 11. – С. 85-89.
5. Сыркин, В.Г. CVD-метод. Химическое парофазное осаждение. – М.: Наука, 2000. – 496 с.
6. Петрова, Л.Г., Александров, В.А., Барабанов, С.И. Новые технологии металлизации из карбонильных соединений // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. – 2011. – № 54. – С. 82-86.
7. Горовой, А.П., Черкасов, П.М. Гетерофазные нанокристаллические покрытия, осаждаемые при термораспаде паров бис-ареновых соединений хрома // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2005. – № 9. – С. 19.
8. Александров, В.Д., Морщилов, М.В. Формирование износостойких покрытий на алюминиевых сплавах путем осаждения хрома из газофазных металлоорганических соединений // *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. – 2016. – №2 (56). – С. 34-38.
9. Иванов, Л.Л. Разработка технологии упрочнения режущего инструмента путем осаждения пиролитических хромовых покрытий: дисс. на соиск. уч. степ. канд. тех. наук. – М.: МАДИ. – 1988. – 242 с.
10. Юршев, В.И., Мукадаров, Р.И., Юршев, И.В. Поверхностное упрочнение инструмента нанесением пиро-

литического карбидохромового покрытия // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2015 – №2 (716). – С. 48-52.

11. **Влияние азотирования на износостойкость и адгезию цинковых покрытий на стали** / Л.Г. Петрова, П.Е. Демин и др. // *СТИН*. – 2019. – № 3. – С. 16-19.

12. **Упрочнение контактных поверхностей инструмента из быстрорежущих сталей дисперсно-упрочненным композитным хромовым покрытием** / С.Ю. Жачкин и др. // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2017. – №12 (156). – С. 572-574.

13. **Belashova, I.S., Petrova, L.G.** Dispersion Hardening of Amorphous Chromium Coatings by Crystallized Nanoparticles of Carbides // *European Conference of Heat Treatment and 21st IFHTSE Congress*. – May 2014. – Munich. – P. 505-510.

14. **Юршев, В.И., Богодухов, С.И., Мукатдаров, Р.И., Юршев, И.В.** Структура и свойства деталей с покрытиями после термической обработки // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2017. – №10 (748). – С. 15-18.

REFERENCES

1. Kremnev, L.S., Vinogradova, L.A., Onegina, A.K., Sapronov, I.Yu. Special features of the composition, structure and properties of high-speed steels for cutting tools with ion-plasma coatings based on titanium nitride / *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, No.1 (679), pp. 4-9.

2. Increasing the durability of a cutting tool by surface modification with coating of tungsten compounds in a high-frequency discharge / V.A. Alexandrov, L.G. Petrova et al. / *Hardening technologies and coatings*, 2018, vol. 14, No.1 (157), pp. 30-35.

3. Afanasyeva, L.E., Barabanova, I.A., Radkevich, G.V. Laser surfacing of high-speed steel / *Mechanics and physics of processes on the surface and in contact of solids, parts of technological and power equipment*, 2018, No. 11, pp. 53-57.

4. Alexandrov, V.A., Vdovin, V.M., Sergeeva, A.S. Wear-resistant coating formation for cutting tools / *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2017,

No. 11, pp. 85-89.

5. Syrkin V.G. CVD method. Chemical vapor-phase metallization, Moscow: Nauka, 2000, 496 p. (in Rus.).

6. Petrova, L.G., Alexandrov, V.A., Barabanov, S.I. New technologies of metallization from carbonyl compounds / *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University*, 2011, No. 54, pp. 82-86.

7. Gorovoy, A.P., Cherkasov, P.M. Heterophase nanocrystalline coatings deposited by thermal decomposition vapors of bis-arene chromium compounds, *Uproch. Tekhnol. Pokr.*, 2005, No. 9, p. 19.

8. Alexandrov, V.D., Wrinkilov, M.V. Formation of wear resistant coatings on aluminum alloys by chromium deposition from gas-phase organometallic compounds *Science intensive technologies in Mechanical Engineering*, 2016, No.2 (56), pp. 34-38.

9. Ivanov, L.L. Development of technology for hardening cutting tools by deposition of pyrolytic chrome coatings: Ph. D. thesis in Engineering Science / Moscow, MADI, 1988, 242 p.

10. Yurshev, V.I., Mukatdarov, R.I., Yurshev, I.V. Surface Hardening of Tools by Depositing a Pyrolytic Chromium Carbide Coating / *Metal science and heat treatment*, 2015, No.2 (716), pp. 48-52.

11. Influence of nitriding on the wear resistance and adhesion of zinc coatings on steel. L.G. Petrova, P.E. Demin et al. / *STIN (Russian Engineering Research)*, 2019, No. 3, pp. 16-19.

12. Hardening of the contact surfaces of tools made of high-speed steels with a dispersed-hardened composite chrome coating. S.Y. Zhachkin et al. / *Hardening technologies and coatings*, 2017, No.12 (156), pp. 572-574.

13. Belashova, I.S., Petrova, L.G. Dispersion Hardening of Amorphous Chromium Coatings by Crystallized Nanoparticles of Carbides // *European Conference of Heat Treatment and 21st IFHTSE Congress*. – May 2014. – Munich. – P. 505-510.

14. Yurshev, V.I., Bogodukhov, S.I., Mukatdarov, R.I., Yurshev, I.V. Structure and properties of parts with coatings after heat treatment // *Metal science and heat treatment*, 2017, No.10 (748), pp.15-18.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.11.2021; одобрена после рецензирования 05.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

The article was submitted 16.11.2021; approved after reviewing 05.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.