

$$y_3 = D = 0,83 \cdot 0,995^x. \quad (21)$$

Таблица 7 – Зависимость между обобщенным показателем и соотношением $MnO/Mn_{\Gamma P}$

$MnO/Mn_{\Gamma P}$	167,7	155,3	51,9	99	30,6	72	136,2	44,8	66,2	50,1	55,6
D	0,41	0,342	0,712	0,409	0,745	0,503	0,401	0,645	0,673	0,569	0,641

Таким образом, полученные результаты позволяют использовать соотношение $MnO/Mn_{\Gamma P}$ для оценки влияния содержания марганца в металле сварных швов на его структуру и механические свойства.

Литература

1. Анализ структурного состава металла швов, выполненных сварочными проволоками феррито-перлитного класса / В.Ф. Грабин [и др.] // Автомат. сварка. – 2003. – № 8. – С. 18–20.
2. Влияние распределения марганца между структурными составляющими на свойства металла низколегированных швов / Грабин В.Ф. [и др.] // Автомат. сварка. – 2007. – № 12. – С. 26–29.
3. Вознесенский, В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 264 с.

УДК 621.79.01:621.793.1 + 621.785.5

В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук,
Г.А. ТКАЧЕНКО, канд. техн. наук,
А.В. КОВАЛЬЧУК (БНТУ)

ПОВЫШЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ СИСТЕМ «КОНСТРУКЦИОННАЯ СТАЛЬ – НИТРИД ТИТАНА»

Введение. Разработка нанокompозитных покрытий с характерным размером зерна менее 100 нм для повышения надежности эксплуатации высокоответственных механизмов и одновременная ми-

нимизация за счет этого их массогабаритных параметров является актуальной и перспективной задачей для современного материаловедения и машиностроения в целом. Однако разрабатываемые в настоящее время наноструктурированные покрытия имеют существенные недостатки, ограничивающие их эффективность:

1) Высокий уровень внутренних напряжений ограничивает их эффективную толщину. В этой связи решающее значение приобретают механические свойства. Жесткость собственно покрытия не может обеспечить его работоспособность, прочностные свойства ограничены усилием и нагрузкой, которые может выдерживать основа без продавливания покрытия. Выраженный градиент твердости между основой и покрытием приводит к разрушению покрытия на мягкой основе. Подтверждением тому служат теоретические исследования автора работы [1], которые показали, что для тонких твердых покрытий проявляется эффект снижения несущей способности слоистой системы (топокомпозита). Этот эффект заключается в снижении предельной нагрузки, действующей на топокомпозит, до появления пластической деформации в материале основы (продавливание покрытия) по отношению к нагрузке, прикладываемой к основе без покрытия и приводящей к такой же пластической деформации в ней. Решением проблемы следует считать рассмотрение характеристик топокомпозита – жесткости, твердости и предела текучести, варианты расчета которых предложены в работе [2];

2) Относительно высокая стоимость покрытий. Резервом снижения затрат на покрытия может стать научно обоснованное снижение их толщины за счет применения более жесткого и прочного подслоя. Перспективным в области снижения издержек на производство простых покрытий является применение в качестве материала основы вместо дорогих высоколегированных конструкционных и инструментальных материалов более дешевых углеродистых сталей. Однако применение «сырой» металлической основы малоэффективно. В этой связи в литературе появляется все больше информации о применении так называемых двойных технологий, предусматривающих модификацию поверхностного слоя основы и последующее нанесение покрытия.

По цели применения модифицирование металлической основы можно условно разделить на 2 группы, в одной из которых основ-

ной целью является увеличение прочности сцепления покрытия и основы, а во второй – получение для основы твердости и износостойкости, близких к покрытию.

В первом случае наиболее часто рассматриваются предварительный подогрев (для уменьшения растягивающих напряжений на границе раздела между покрытием и основой и дополнительной взаимодиффузии), облучение частицами с высокой энергией (для увеличения содержания углерода и уменьшения содержания кислорода (примесные элементы) в зоне нанесения покрытия, уменьшения коэффициента трения покрытия на 20–30 %), ионная имплантация (модифицирование тонкого поверхностного слоя основы – изменение условий зарождения покрытия и характера сопряжения покрытия с основой), ионная бомбардировка (на начальной стадии осаждения покрытия – формирование на межфазной границе протяженного переходного слоя комбинированного состава с градиентом концентрации элементов основы и покрытия и получение текстуры, соответствующей ориентации плоскостей (100) параллельно поверхности), различные виды предварительной очистки (выявление границ зерен, углублений, дислокаций, дислокационных трубок и так далее) [3–5].

Во втором случае внимание акцентируется, в основном, на возможности применения способов химико-термической обработки (ХТО) для повышения твердости и износостойкости основы, необходимой для увеличения времени до наступления момента исчерпания несущей способности покрытия из-за локальных повреждений на участке трения [6–8].

Материалы и методики эксперимента. При проведении работы в качестве материала основы были выбраны армко-железо и сталь 12Х18Н10Т, которые практически не упрочняются термически и поэтому в качестве упрочняющей обработки для них была выбрана упрочняющая химико-термическая обработка, включающая низко-температурную нитроцементацию при температуре 550–600 °С в течение 7 ч. Низкотемпературная нитроцементация проводилась в порошковой среде в контейнере, герметизируемом плавким затвором. В качестве насыщающей среды использовалась смесь порошков следующих материалов: железосинеродистый калий 60 % $K_4Fe(CN)_6$ + древесный уголь 30 % С + активатор процесса

химической реакции 10 % BaCO_3 . Предварительная термическая обработка образцов отсутствовала.

Толщина покрытия TiN на всех образцах составила $1 \pm 0,001$ мкм, микротвердость на уровне 20–22 ГПа [9].

Результаты исследований. После низкотемпературной нитроцементации толщина слоя на армо-железе составила 80 мкм, на нержавеющей стали – 120 мкм. Толщину слоя определяли измерением микротвердости от поверхности до сердцевины образца с шагом в 30–40 мкм. Резкое падение твердости принималось за границу между слоем и основным материалом (рисунки 1, 2).

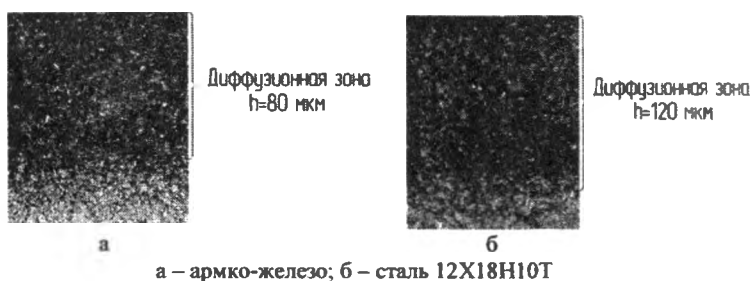


Рисунок 1 – Микроструктуры диффузионного слоя после ХТО

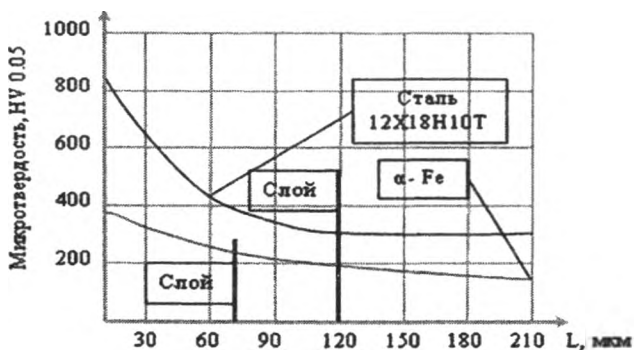


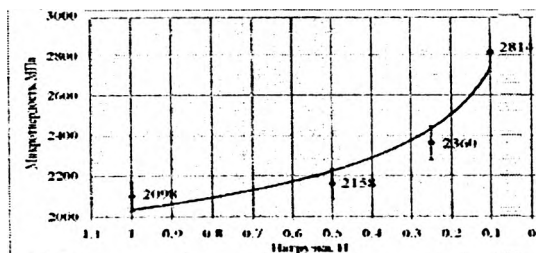
Рисунок 2 – Распределение микротвердости по глубине диффузионного слоя

Твердость до нитроцементации (равновесное состояние, после полного отжига): 12Х18Н10Т – твердость поверхности 80 HRB, что соответствует 1520 МПа, армко-железо – твердость поверхности 70 HRB, что соответствует 1250 МПа; после диффузионного насыщения: 12Х18Н10Т – твердость поверхности 88 HRB, что соответствует 1840 МПа, армко-железо – твердость поверхности 80 HRB, что соответствует 1520 МПа.

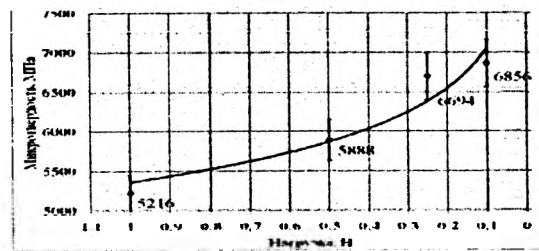
Анализ результатов. Экспериментально установлена зависимость твердости топокомполитов от величины прикладываемой нагрузки (рисунок 3). Разница в микротвердости покрытий на чистых образцах железа и стали 12Х18Н10Т составляет в среднем 300 HV. На образцах после нитроцементации разница в микротвердости увеличивается в среднем до 6000 HV, то есть эффект от предварительной ХТО стали 12Х18Н10Т выше.

Анализ построенных зависимостей показывает, что на образцах с модифицированной основой твердость существенно выше и увеличение ее с уменьшением прикладываемой нагрузки больше, чем на «сырой» основе. Это также свидетельствует о том, что само покрытие работает лучше и эффекта снижения несущей способности не наблюдается, о чем также свидетельствуют значения твердости при нагрузках 0,25 Н и 0,1 Н. Следовательно, более ощутимый вклад в эффективную твердость системы вносит покрытие (так как уже не продавливается или продавливается значительно тяжелее). На рисунке 4 показано относительное повышение твердости образцов от вида обработки.

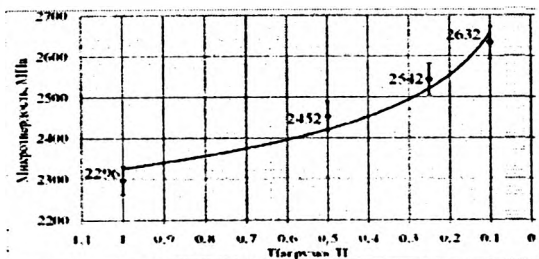
Так как несущая способность и эффективные механические свойства систем «конструкционная сталь – наноструктурированный нитрид титана» в большей степени зависят от свойств материала основы, то в качестве резерва повышения свойств таких систем в общем случае предложены следующие основные требования к металлическим основам для нанесения твердого наноструктурированного покрытия:



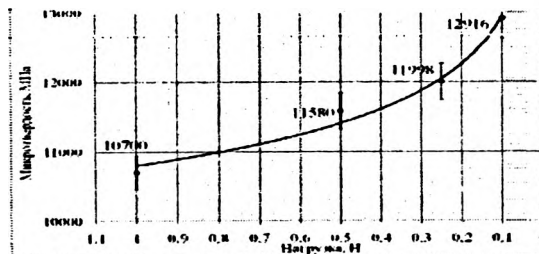
а



б



в



г

а – армо-железо; б – армо-железо после ХТО; в – 12Х18Н10Т;
г – 12Х18Н10Т после ХТО

Рисунок 3 – Зависимости микротвердости образцов от величины прилагаемой нагрузки с различными основами



а – без обработки; б – ХТО; в – покрытие TiN; г – ХТО и покрытие TiN

Рисунок 4 – Относительное повышение твердости образцов от вида обработки

- высокая адгезионная способность и адгезионная прочность;
- высокая когезионная прочность поверхностного (модифицированного) слоя основы;
- высокая схватываемость поверхности материала основы с наносимым покрытием;
- высокое качество поверхности (критерии качества: шероховатость, фактура, наличие загрязнений, наличие оксидных пленок);
- выпуклая форма поверхности (при этом тепловая усадка покрытия и образующиеся в ее результате напряжения способствуют более плотному прижатию покрытия к основе);
- близкое к материалу покрытия значение коэффициента теплового расширения (отсутствие обратимой и необратимой отпускной хрупкости при нагреве в интервале температур осаждения покрытия для стали);
- значения твердости на границе раздела между покрытием и основой должны быть близки к твердости покрытия и плавно снижаться в направлении от границы раздела;
- субмикроскопический размер зерен и включений структурных составляющих материала основы в области границы раздела между покрытием и основой и его возрастание в направлении от границы раздела (идеальный случай – абсолютная размерно-градиентная структура);
- высокое сопротивление малым пластическим деформациям и локализации деформации в поверхностном слое;

– высокое сопротивление контактной усталости и релаксации напряжений;

– другие свойства, способствующие обеспечению преимущественно когезионного или смешанного характера разрушения системы «основа – покрытие» и не противоречащие вышеперечисленным требованиям.

Необходимо учитывать, что в покрытиях TiN создаются значительные остаточные напряжения сжатия, величина которых зависит от толщины нанесенного слоя. По данным работы [10] максимальные значения напряжений сжатия выявлены при толщине покрытия 4,5 мкм. Их величина уменьшается с увеличением толщины покрытия, а оптимальной можно считать толщину 7,8 мкм.

Следует подчеркнуть, что материал основы и степень его легированности не оказывают прямого влияния на механические характеристики слоистой системы, а определяющим фактором повышения качества является повышение жесткости именно подслоя. Так, независимо от химического состава, одинаковая жесткость различных основ при прочих равных условиях будет приводить к получению одинаковых свойств рабочей поверхности слоистой системы. Соответственно эквивалентное (по механическим свойствам поверхностного слоя основы) замещение дорогостоящих высоколегированных конструкционных и инструментальных материалов более дешевыми, поверхностно упрочненными углеродистыми сталями приведет к получению (как минимум) одинаковых свойств топокомпозигов на их основе и одновременно к положительному экономическому эффекту.

Литература

1. Воронин, Н.А. Топокомпозиаты – новый класс конструкционных материалов триботехнического назначения. Методологические вопросы создания и конструирования: в 2 ч / Н.А. Воронин. – М.: РАН, 1999. – Ч. 1. Трение и износ, 1999. – Т. 20. – № 3. – С. 313–320. – Ч.2. Трение и износ, 1999. – Т. 20. – № 5. – С. 533–544.

2. Воронин, Н.А. Особенности и прикладной аспект механики контактного взаимодействия жесткого сферического штампа с упруго-пластичным слоистым полупространством / Н.А. Воронин //

Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: Межвуз. сб. науч. тр. – Тверь: ТГТУ, 2006. – С. 32–55.

3. **Иващенко, С.А.** Влияние ионной обработки на изменение исходной шероховатости образцов из сплава Д16 / С.А. Иващенко, С.Г. Койда // Вестник БНТУ, 2010. – № 5. – С.14–17.

4. **Ходасевич, В.В.** Роль предварительного облучения и нагрева подложки в модификации переходного слоя и механических свойств покрытий TiN / В.В. Ходасевич, И.А. Солодухин // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 3-й Междунар. конф., Минск, 6–8 октября 1999 г. : в 2 ч. / НАН Беларуси, Бел. гос. ун-т, Бел. межвуз. центр обслуживания науч. исслед. – Минск, 1999. – Ч. 2. – С.109–111.

5. **Андреев, А.А.** Вакуумно-дуговое модифицирование поверхности стальных изделий / А.А. Андреев // Технология машиностроения. – 2007. – Т. 5, – № 3–4. – С. 140–148.

6. **Polok, M.** Comparison of the PVD coatings deposited onto plasma nitrated steel / M. Polok // Journal of achievements in materials and manufacturing engineering. – 2010. – V. 42. – № 2. – P.172–179.

7. **Shengli, M.** The composite of nitrated steel and TiN coatings by plasma duplex treatment and the effect of pre-nitrating / M. Shengli // Surface and Coatings Technology. – 2001. – № 137. – P. 116–121.

8. **Mancosu R.** Plasma nitriding and PVD hard coating: a critical overview of duplex coating processing / R. Mancosu // Jornadas Sam/Caonamet/Simposio Materia 2003. – P. 600–603.

9. **Наноструктурные и нанокompозитные сверхтвердые покрытия** / А.Д. Коротаев [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2005. – № 8. – С.103–116.

10. **Савчук, Я.И.** Повышение стойкости дисковых пил при обработке древесностружечных плит нанесением покрытия TiN: дис. ... докт. техн. наук: 05.06.02 / Я.И. Савчук. – Львов, 1984. – 231с.