

М.А. ФАРАДЖАЛЛАХ

Национальный авиационный университет, г. Киев

В.Е. ПАНАРИН

Институт металлофизики НАНУ

С.С. БЫСЬ

Хмельницкий национальный университет

ПРОБЛЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЫШЕНИИ КАЧЕСТВА ДЕТОНАЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

На підставі аналізу експериментальних результатів показано, що поверхневе руйнування покриттів обумовлене впливом не тільки напруг, що виникають у процесі пружнопластичної деформації при терті, а й пов'язане з залишковими напруженнями. Запропоновано режими термічної обробки, що змінюють характер розподілу залишкових напружень.

Based on the analysis of experimental results showed that the surface coating damage due to the influence not only the stress arising in the process of elastoplastic deformation during friction, but also due to residual stresses. Proposed modes of heat treatment, changing the distribution of residual stresses.

Ключові слова: покриття, залишкові напруження, відпал, інтенсивність зношування.

Технологические остаточные напряжения формируются в ходе технологического процесса изготовления детали или ее ремонта. Остаточные напряжения оказывают существенное влияние не многие эксплуатационные свойства деталей машин. Они способствуют деформации деталей при изготовлении и эксплуатации и зачастую оказываются причиной их аварийного разрушения. Механизм формирования технологических остаточных напряжений достаточно полно рассмотрен с качественной стороны [1]. Причиной их образования является несовместимость деформаций различных объемов материала детали, возникающих в результате пластических и термопластических деформаций, изменений химического состава и фазово-структурных превращений. С позиций механики деформируемого твердого тела формирование технологических остаточных напряжений представляет собой сложный процесс, особенно, когда изменения объема материала имеет место в тонком поверхностном слое.

Систематизированные сведения о технологических остаточных напряжениях, обусловленных условиями технологии формирования детонационных поверхностных слоев и влияния на их эксплуатационные свойства при нагружении трением, в литературе крайне ограничены.

Целью работы является определение величины уровня и характера распределения остаточных напряжений в детонационных покрытиях и обоснование путей их минимизации.

Методика исследования. Для детонационного напыления использовали композиционные порошковые материалы системы $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$.

Одним из плодотворных методов изучения технологических остаточных напряжений является метод Н. Н. Давиденкова [2], позволяющий определять характер распределения остаточных напряжений, их величину и глубину залегания с помощью прибора, осуществляющего записывать изменения стрелы прогиба образца в процессе непрерывного стравливания напыленного слоя.

Снятие слоев материала осуществлялось с помощью электролитического травления. Состав, концентрация и режим травления подбираются так, чтобы скорость травления составляла 3-5 мкм/мин. Напряжение на электродах составляло 10 в, плотность тока – 15 а/дм², температура электролита 25°. Состав электролита – 850 см³ H_3PO_4 с удельным весом 1,56 и 150 см³ H_2SO_4 удельным весом 1,89, а также 50 г хромового ангидрида.

Непрерывная запись прогиба осуществлялась с помощью индуктивного датчика и передавалась на самописец, где фиксировалась зависимость прогиба от времени. Наконечник датчика опирался на корундовую пластину-опору диаметром 4 мм и толщиной 1,5 мм.

Прочность сцепления покрытий осуществлялась с помощью штифтовым методом [3].

Результаты исследования и их обсуждение. На рис. 1 показано влияние толщины напыленного слоя на прочность сцепления. В качестве подложки была использована сталь 45.

С ростом толщины покрытия до некоторой величины (0,20– 0,22 мм) наблюдается увеличение усилия, необходимого для отрыва штифта от напыленного слоя. После достижения величины 1100 МПа (для покрытия на основе карбида кремния) дальнейшее нарастание толщины покрытия сопровождается уменьшением прочности сцепления.

Причины, приводящие к наличию максимума на кривой $G_{\text{сш}} = f(\delta)$, на наш взгляд, обуславливаются тем, что в области малых толщин имеет место, преимущественно, когезионное разрушение. Таким образом, значения, полученные при испытаниях, в определенной мере отражают не прочность

сцепления, а прочность самого покрытия, подтверждая тем самым, что при детонационном напылении степень взаимодействия близка к единице [3, 4].

Малая толщина напыленного слоя (0,1 мм) вызывает прорыв покрытия, при увеличении толщины прочность сцепления несколько возрастает, но остается незначительной и при испытаниях имеет место

деформация напыленного слоя его прогиб и растрескивание.

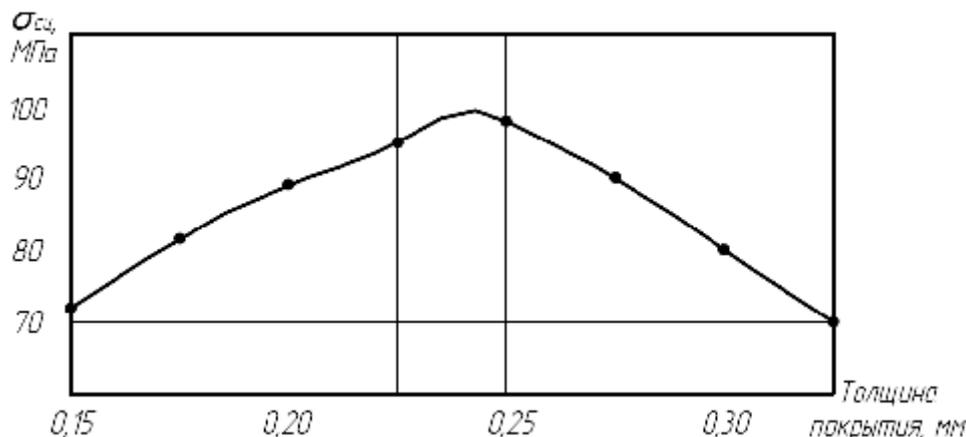


Рис. 1. Зависимость прочности сцепления от толщины напыляемого покрытия на основе карбида кремния

Вследствие роста толщины покрытия происходит подавление этих явлений, что выражается в увеличении фиксируемой при испытаниях прочности.

В то же время увеличение толщины покрытия сопровождается нарастанием внутренних напряжений в системе «покрытие – основа», результатом чего является снижение прочности сцепления. И разрушение при этом, как правило, носит адгезионный характер.

Таким образом, работоспособность и долговечность детонационных покрытий зависит от величины и характера распределения остаточных напряжений. Высокие значения остаточных напряжений являются причиной появления микротрещин или отслаивания покрытий.

Структурообразование при детонационном напылении подчиняется общим закономерностям, характерным для напыляемых покрытий [5]. При нанесении слоя имеет место местный нагрев подложки в пятне напыления [3]. Таким образом, в результате теплового действия осуществляется местный, чрезвычайно локальный нагрев под каждой частицей в зоне ее удара и деформации, что приводит к тому, что в различных точках сечения температуры различны. В результате чего при нормальной температуре в напыленном гетерогенном слое покрытия возникают технологические остаточные напряжения, которые в зависимости от ряда факторов могут быть растягивающими, сжимающими или же переменными по знаку.

На образцы из стали 45 наносились детонационные покрытия на основе карбида кремния, так и нержавеющей аустенитной стали. Были исследованы образцы с покрытием различной толщины, которая составляла 100, 200, 300 мкм.

На рис. 2 представлены графики распределения остаточных напряжений покрытий на основе карбида вольфрама. Максимум остаточных напряжений несколько смещен от поверхности вглубь покрытия. С увеличением толщины покрытия величина остаточных напряжений возрастает. С увеличением глубины залегания остаточных напряжений их величины уменьшаются.

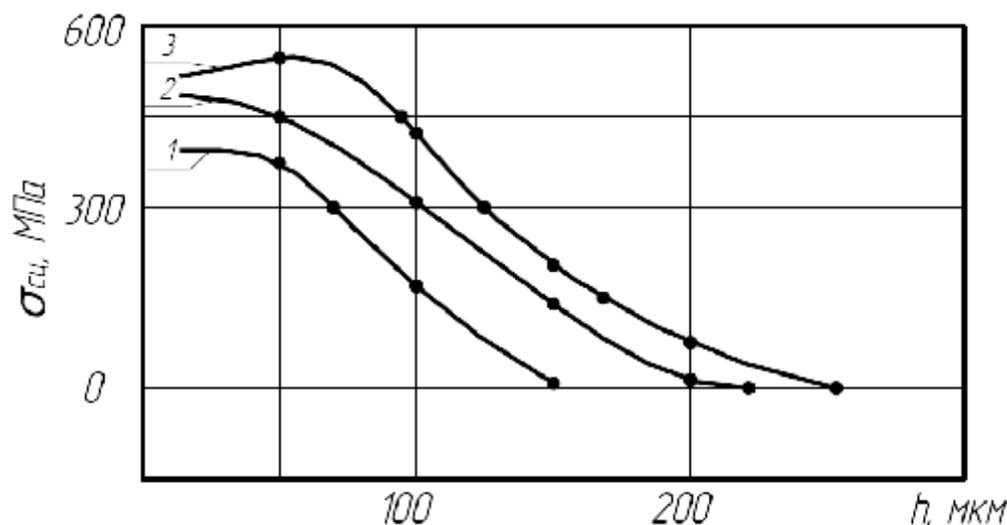


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений в покрытиях на основе карбида вольфрама в зависимости от толщины: 1 – 100 мкм; 2 – 200 мкм; 3 – 300 мкм

Образцы напыленные композиционным порошком на основе карбида кремния, также исследовались в зависимости от толщины покрытий, которая составляла 100, 200 и 300 мкм. Испытания этой партии

образцов показало, что в образцах при всех толщинах покрытий наблюдаются растягивающие остаточные напряжения (рис. 3).

Как следует из графиков характера распределения остаточных напряжений» максимум остаточных напряжений находится на некотором расстоянии (40– 80 мкм) от поверхности. С увеличением толщины покрытия величина остаточных напряжений возрастает. Так, при толщине покрытия 200 мкм остаточные напряжения составляют около 275 МПа, а при толщине 400 мкм они превышают 550 МПа. Во всех случаях величина остаточных напряжений с увеличением глубины их залегания, после максимума, резко падает. Вблизи основы образца величина напряжений сходит на нет. Глубина залегания, в основном, соответствует толщине покрытия.

Таким образом, величина остаточных напряжений значительно возрастает при увеличении толщины напыляемых покрытий.

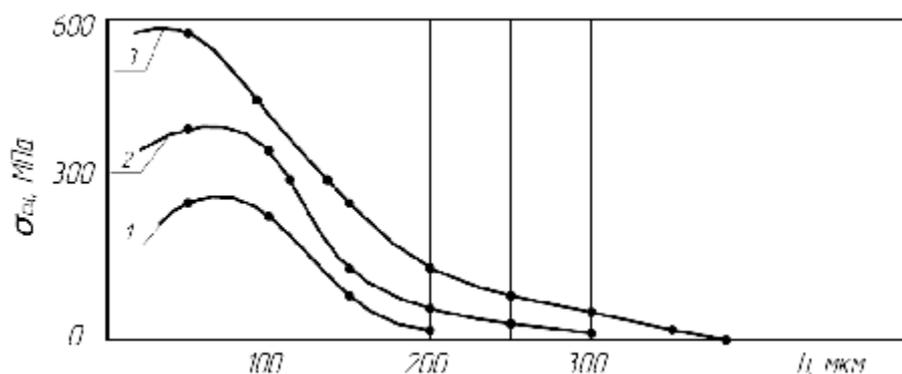


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений в покрытиях на основе карбида кремния в зависимости от их толщины: 1 – 100 мкм; 2 – 200 мкм; 3 – 300 мкм

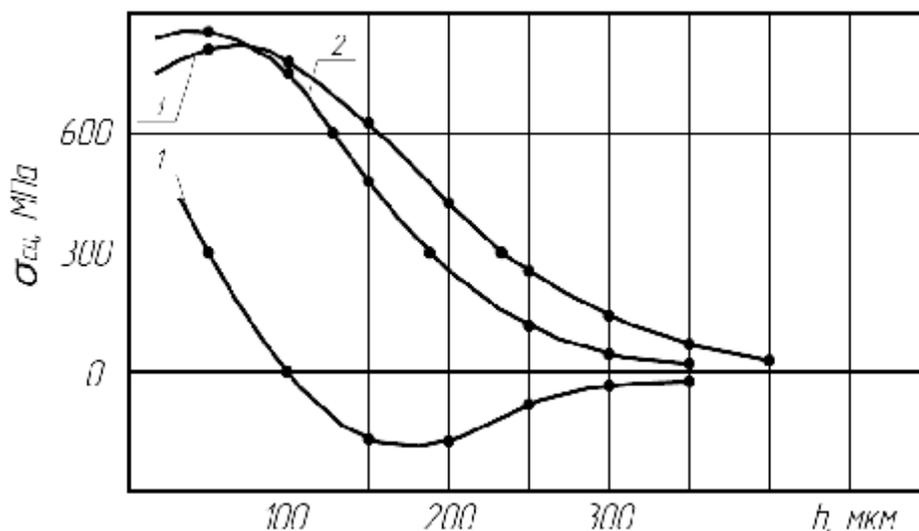


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений в покрытиях на основе карбида кремния после отжига при температуре 200°C. Толщина покрытий: 1 – 100 мкм; 2 – 200 мкм; 3 – 300 мкм

Одной из технологических операций для снятия остаточных напряжений является термическая обработка – отжиг [6]. Отжиг изменяет характер распределения остаточных напряжений. Изменение в распределении тем заметнее, чем выше температура отжига. Отжиг исследуемой партии образцов проводился при температурах 200°C, 300°C и 400°C.

Характер распределения остаточных напряжений после отжига при температуре 200°C представлен на рис. 4. Величина напряжений заметно уменьшилась, особенно резко уменьшаются напряжения в покрытиях больших толщин. Кроме того, в покрытиях малых толщин с увеличением глубины залегания растягивающие остаточные напряжения переходят в сжимающие. Глубина залегания остаточных напряжений также в основном соответствует толщине покрытия.

Характер распределения остаточных напряжений после отжига при температуре 400°C изменяется еще больше (рис. 5). В этом случае величина напряжений продолжает уменьшаться и при толщинах покрытий менее 0,5 мм они переходят в сжимающие. Величина сжимающих напряжений тем больше, чем меньше толщина покрытия. С увеличением глубины залегания величины напряжений уменьшаются и вблизи поверхности сходят на нет.

Повышение температуры отжига до 400°C приводит к дальнейшему перераспределению остаточных напряжений в сторону уменьшения их абсолютной величины. Это представлено на рис. 6.

Уменьшились. растягивающие остаточные напряжения при больших толщинах, уменьшились почти вдвое сжимающие напряжения. Таким образом, при этой температуре отжига величина напряжений по сравнению с неотожженными образцами на много ниже.

Знак остаточных напряжений во многом зависит от сочетания коэффициентов термического расширения материалов основы и покрытия. Когда коэффициент термического расширения напыляемого материала равен или больше коэффициента термического расширения основы, в напыленном покрытии возникают растягивающие остаточные напряжения. В других случаях могут возникать сжимающие остаточные напряжения. При напылении покрытия на основе нихрома на образец из углеродистой конструкционной стали 45 разница в коэффициентах термического расширения незначительная. Чем тоньше слой покрытия, тем меньше разница в близлежащих слоях покрытия и основы. Следовательно, с увеличением толщины напыляемого слоя будет, в основном, проявляться разница в коэффициентах термического расширения в размерах нагретых и охлажденных частиц и в уже запыленных значительно остывших слоях. Поэтому с увеличением толщины покрытия остаточные напряжения возрастают. Это согласуется с распределением остаточных напряжений, приведенным на рис. 3.

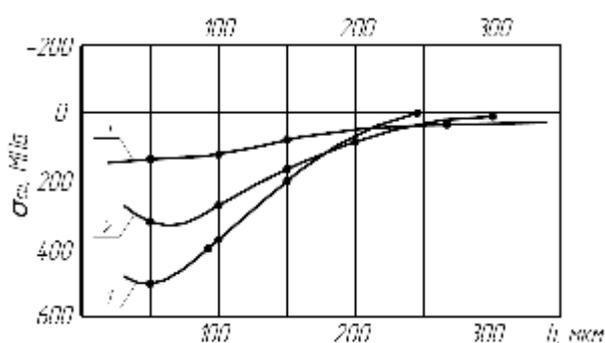


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений в покрытиях после отжига при температуре 300°C. Толщина покрытий: 1 – 100 мкм; 2 – 200 мкм; 3 – 300 мкм

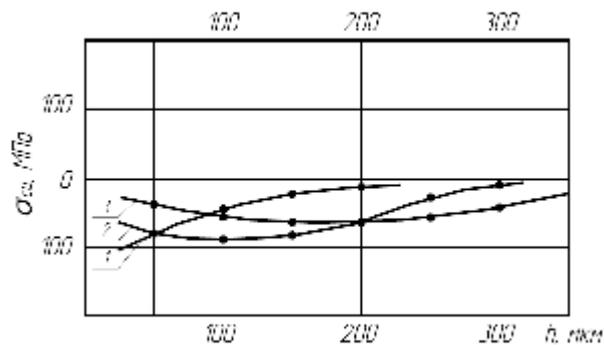


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений в покрытиях после отжига при температуре 400°C. Толщина покрытий: 1 – 100 мкм; 2 – 200 мкм; 3 – 300 мкм

Термическая обработка образцов при различных температурах приводит к перераспределению остаточных напряжений. С увеличением температуры отжига характер распределения остаточных напряжений изменяется. Наблюдается заметное уменьшение остаточных напряжений сначала в более толстых покрытиях, а затем и в более тонких покрытиях, когда напряжения из растягивающих переходят в сжимающие.

Как известно, внутренние напряжения растяжения снижают временное сопротивление, а напряжения сжатия могут увеличивать усталостную прочность [6]. Аналогичное влияние внутренние напряжения оказывают на предел выносливости.

Таким образом, на основании проведенных испытаний можно сделать вывод о том, что в поверхностных слоях, подвергнутых упрочнению путем детонационного напыления, возникают остаточные напряжения, которые по своей абсолютной величине не опасны для поверхностного слоя с точки зрения его целостности и качества.

При увеличении толщин напыляемых покрытий возрастание остаточных напряжений можно значительно снизить путем термической обработки, в процессе которой растягивающие напряжения переходят в сжимающие, что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках покрытий.



Рис. 7. Микроструктура поверхностей трения покрытий



Рис. 8. Микрофотография поверхности трения покрытий после минимизации остаточных напряжений (x 360)

Микроструктура поверхностей трения покрытий, отличающихся наличием остаточных напряжений,

представлена на рис. 7 и характеризуется наличием предложенных микротрещин, очагов схватывания даже при незначительных нагрузках, составляющих 0,5 МПа.

На рис. 8 показана микрофотография поверхности трения покрытий после минимизации остаточных напряжений, как видно в данных условиях испытывания ($V=0,5$ м/с, $P = 10$ МПа) наблюдается нормальный механо-химический износ, и получена оптимальная гетерогенная долговечная трибоструктура, позволяющая снизить интенсивность изнашивания в 1,5– 2,0 раза (рис. 9).

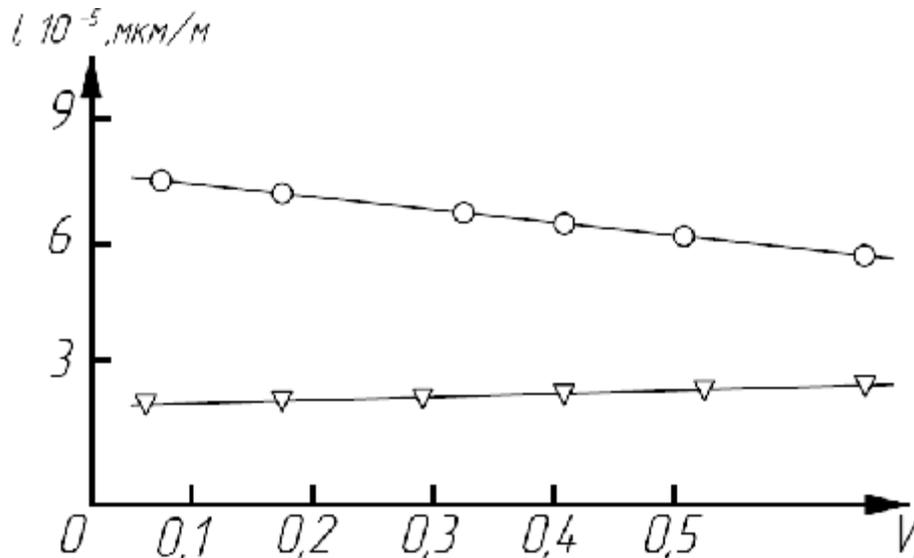


Рис. 9. Зависимость интенсивности изнашивания детонационных покрытий SiC-Al₂O₃-Cr₂O₃, до отжига (1) и после минимизаций напряжений (2) ($P=10$ МПа)

Выводы. На основании анализа экспериментальных результатов изучено влияние внутреннего напряженного состояния покрытий на сопротивление износу. Показано, что поверхностное разрушение покрытий обусловлено влиянием не только напряжений, возникающих в процессе упругопластической деформации при трении, но и связано с остаточными напряжениями.

Установлены закономерности распределения остаточных напряжений, их общий характер, величина и глубина залегания.

Предложены на основании экспериментальных исследований режимы термической обработки, изменяющие характер распределения остаточных напряжений.

Литература

1. Крагельский И. В. Развитие науки о трении / И. В. Крагельский, В. С. Щедров. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1956. – 233 с.
2. Механизм упрочнения твердых тел / [под ред. М. Л. Бернштейна]. – М.: Metallургия, 1965. – 167 с.
3. Бородин И. Н. Композиции никеля с твердыми частицами / И. Н. Бородин // Защита металлов. – 1989. – № 5. – С. 622– 626.
4. Бородин И. Н. Композиции никеля с твердыми частицами / И. Н. Бородин // Защита металлов. – 1989. – № 5. – С. 622– 626.
5. Эпик А. П. Восстановление деталей методом газотермического напыления / А. П. Эпик, Ю. М. Ковальчук. – К.: Знание, 1980. – 20 с.
6. Сонин В. И. Газотермические напыления материалов в машиностроении / Сонин В. И. – М.: Машиностроение, 1973. – 152 с.

Надійшла 18.3.2011 р.