



Лопата Л. А.

*Национальный
авиационный
университет*

Сорока Е. Б.

*Институт проблем
прочности
им. Г.С. Писаренко
НАН Украины*

Яропуд В. Н.

*Винницкий
национальный
аграрный
университет*

УДК 621.793.620.172

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ ПРИПЕКАНИЕМ

Виходячи з принципу еквівалентності напруженості адгезійного зв'язку, проведена оцінка залишкової напруги. Для цього використано графічне диференціювання експериментальної залежності фортеці від товщини покриття. Встановлений функціональний зв'язок між адгезійною фортецею, товщиною покриття, критичною деформацією основи і залишковою напругою. Це дозволяє вибрати параметри системи "основа-покриття" при фінішній обробці і експлуатації.

On principle of equivalent tensions of adhesive connection the estimation of remaining tensions is conducted in coverage. For this purpose graphic differentiation of experimental dependence of adhesive durability is utilized from the thickness of coverage. Functional connection is set between adhesive durability, thickness of coverage, critical deformation of basis and remaining tensions. It allows to choose the parameters of the system «basis-coverage» at finish treatment and exploitation.

По принципу эквивалентных напряжений адгезионной связи проведена оценка остаточных напряжений в покрытии. Для этого использовано графическое дифференцирование экспериментальной зависимости адгезионной прочности от толщины покрытия. Установлена функциональная связь между адгезионной прочностью, толщиной покрытия, критической деформацией основы и остаточными напряжениями. Это позволяет выбирать параметры системы "основа-покрытие" при финишной обработке и эксплуатации.

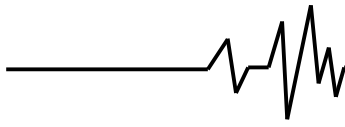
Адгезионная прочность, электроконтактное припекание (ЭКПП), остаточные напряжения.

Введение. В отличие от большинства покрытий, покрытия, полученные методом электроконтактного припекания порошковых материалов (ЭКПП) [1], характеризуются толщинами 3 мм и более при хорошей адгезионной прочности. Напряжения в покрытии могут являться как следствием технологии нанесения (остаточные напряжения), так и возникать в результате

эксплуатационного нагружения [2, 3]. Из анализа работы [2] следует, что наиболее выраженная форма проявления остаточных напряжений это зависимость прочности сцепления $\tau_{сц}$ от толщины покрытия h . Как правило, остаточные напряжения не позволяют увеличить толщину покрытий до необходимого размера [3]. Критическая толщина покрытия ограничена и зависит от номинальной прочности сцепления [4].

Целью настоящей работы является оценка остаточных напряжений в покрытиях, полученных методом ЭКПП, а также обоснование высокой адгезионной прочности системы "основа - ЭКПП покрытие" в условиях совместного действия эксплуатационных и остаточных напряжений.

Состояние вопроса. Остаточные напряжения во многом определяют свойства деталей с покрытиями: их усталостную прочность, прочность сцепления покрытия с деталью, критические деформации основы. Напряжения в покрытии могут являться как следствием технологии нанесения (остаточные напряжения), так и возникать в результате



експлуатационного нагружения под действием статических и динамических нагрузок [2, 3]. Однако не встречаются сведения о сравнительной эффективности этих факторов или их эквивалентности, а также роли адгезионной прочности в их соотношении. Из анализа работы [2] следует, что наиболее выраженная форма проявления остаточных напряжений это зависимость прочности сцепления T_{cu} от толщины покрытия h . Снижение T_{cu} с ростом h вплоть до самопроизвольного отслоения известно в литературе для многих слоистых систем и покрытий, в т.ч. для напыленных, металлизационных и полимерных покрытий [3-8]. Отмечается также, что тонкие покрытия с высоким уровнем остаточных напряжений не отслаиваются, в то время как отслоение толстых покрытий наблюдается при более

низком их уровне. Как правило, остаточные напряжения не позволяют увеличить толщину покрытий до необходимого размера [9]. Критическая толщина покрытия ограничена и зависит от номинальной прочности сцепления [5]. Зависимость прочности сцепления от толщины объясняется тем, что упругие напряжения и освобождающаяся энергия этих напряжений уменьшают прочность удержания покрытия. Методами фотоупругости показан рост касательных напряжений в адгезионной поверхности с увеличением толщины [8]. Проанализировано [2] два случая отслоения покрытия от основы: за счет деформирования основы внешней нагрузкой и за счет роста толщины покрытия. Зависимость прочности адгезионной связи от деформации основы в первом случае, и от толщины во втором - идентичны (рис. 1).

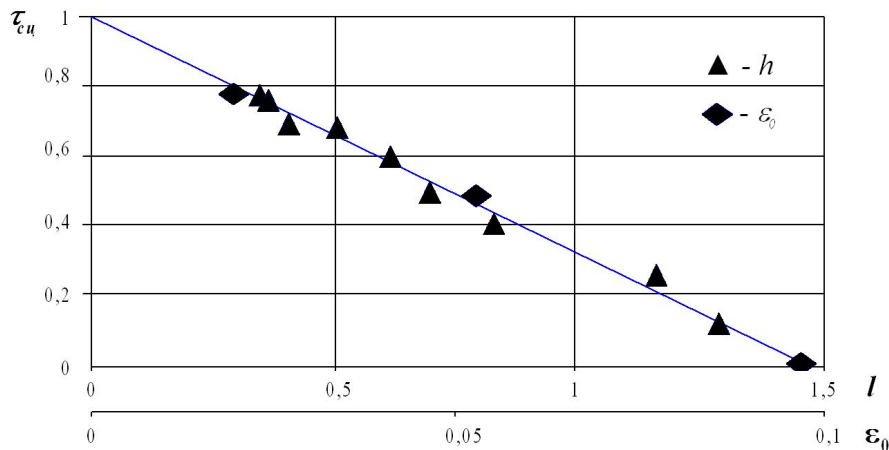


Рис. 1. Относительная прочность адгезионной связи от деформации основы \blacklozenge (при растяжении основы) и от толщины покрытия \blacktriangle (при действии в покрытии только остаточных напряжений)

Отсюда следует вывод об эквивалентности нагружения адгезионной связи. В отличие от большинства покрытий, покрытия, полученные методом электроконтактного припекания порошковых материалов (ЭКПП) [1] характеризуются толщинами 3 мм и более при хорошей адгезионной прочности.

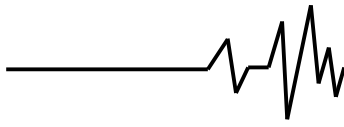
Экспериментальные исследования.

Электроконтактное припекание порошковых покрытий (ЭКПП) представляет собой интенсивный металлургический процесс, протекающий в сравнительно малом объеме. Наличие концентрированного источника тепла, температура которого близка к температуре плавления металла покрытия, давление электрода, высокая скорость нагрева и интенсивный теплоотвод в электрод приводят к

структурным изменениям и упругопластическим деформациям, как в покрытиях, так и в самих деталях. Это создает условия для возникновения остаточных напряжений, эпюра которых зависит от расположения зоны упрочнения, ее формы и размеров.

Рентгеноструктурным анализом была установлена величина остаточных напряжений, которая существенно зависит от давления ЭКПП и от самой технологической схемы процесса. Увеличение давления при нанесении покрытий приводит к снижению остаточных напряжений более чем в 2 раза.

Реальные давления, которые целесообразно прикладывать к электродам из медных сплавов не позволяют существенно снизить остаточные напряжения, величина которых сохраняется в пределах 800...1000



МПа, что приводит к образованию трещин и сдвигов в покрытиях. Применение нагрева в две стадии (два этапа) для ЭКПП позволяет снизить значение остаточных напряжений до величин 270...300 МПа, что, вероятно, объясняется более равномерным прогревом порошкового слоя по сечению и отсутствием участков с локальным повышением температуры.

Анализ эпюр остаточных напряжений в продольном сечении детали показывает, что максимальные растягивающие напряжения, наблюдаются в центральной части и снижаются к краям детали. Напряжения, действующие поперек покрытия, являются растягивающими в центре детали, а по мере приближения к торцам снижаются и переходят в сжимающие напряжения. При этом максимальные сжимающие напряжения наблюдаются по краям упрочненной поверхности. В поперечном сечении детали максимальные растягивающие напряжения зафиксированы непосредственно у границы зоны упрочнения. По мере удаления от нее напряжения снижаются и переходят в сжимающие. Продольные напряжения - растягивающие, причем максимальные значения их находятся у припеченных слоев, а минимальные - в центральной части детали.

Таким образом, как в покрытии, так и в зоне соединения его с деталью (включая зону термического влияния) действуют растягивающие напряжения. Это можно объяснить тем, что при упрочнении детали остаточные напряжения в ней формируются под действием следующих трех факторов. Во-первых, в результате неравномерного нагрева возникают неоднородные пластические деформации, в результате которых в покрытии и зоне соединения могут возникнуть растягивающие остаточные напряжения, которые уравниваются к центру детали и переходят в сжимающие напряжения. Во-вторых, высокая скорость охлаждения в нанесенном слое и в зоне термического влияния вызывает структурные изменения, ведущие к возникновению напряжений растяжения в центральной части детали, которые снижаются в направлении ее торцов и, в-третьих, различие коэффициентов термического расширения детали и покрытия также приводит к появлению остаточных напряжений. Установлено, что напряжения в покрытиях при ЭКПП определяются не только температурными градиентами и линейными деформациями, но и соотношениями физико-механических свойств и размеров покрытия и основания. Это позволяет предположить, что

снизить остаточные напряжения можно такими способами:

- путем согласования свойств покрытия и основы;

- уменьшением влияния объемных изменений структурных превращений исходных материалов при нагреве и охлаждении;

- созданием при спекании переменного температурного поля и регулируемого охлаждения:

- формированием между покрытием и основой промежуточного слоя из высокопластичных материалов;

- снизить все виды напряжений в покрытии можно также за счет оптимального выбора величины упрочняемой поверхности.

Положительные результаты получены при использовании дополнительной термомеханической обработки - горячей обкатки (электроконтактная обработка) после припекания. В этом случае величина остаточных напряжений не превышала 200 МПа. Детали, прошедшие горячую обкатку, характеризуются плавным изменением твердости от покрытия до металла основы и увеличенной диффузионной зоной.

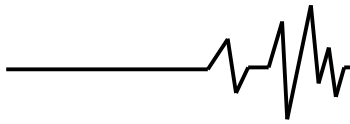
Таким образом, величина давления и технологическая схема процесса ЭКПП оказывают существенное влияние на уровень остаточных напряжений и прочность сцепления покрытий. С этой точки зрения предпочтение следует отдать нанесению покрытий электроконтактным припеканием в две стадии или в два этапа (используя постепенное увеличение температуры и давления процесса) с последующей горячей обкаткой упрочненной поверхности. В результате эксплуатационных испытаний установлено, что снижение напряжений в покрытиях при упрочнении деталей можно достичь за счет прерывистого нанесения слоев из металлических порошков на упрочняемую поверхность.

Оценка остаточных напряжений методом дифференцирования. Из критерия

равнопрочности [5], заменив когезионную прочность, вызванную деформацией основы эквивалентным остаточным напряжением $\sigma_n^{ост}$, легко получить критическую толщину покрытия $h_{кр}$ под действием остаточных напряжений из условия самоотслоения:

$$h_{ед} = \frac{\tau_{ад}}{\sigma_i^{инд}} \frac{1}{kthkl}. \quad (1)$$

Здесь $\tau_{ад}$ - прочность адгезионной связи;
2l - базовый размер;



k - коэффициент, зависящий от соотношения упругих и геометрических параметров системы "основа-покрытие".

$$k^2 = 2 \frac{G_0 G_n}{G_0 h_n + G_n H_0} \left(\frac{1}{E_n H_0} + \frac{1}{E_0 H_0} \right);$$

H_0, h_n - полутолщина основы и покрытия;
 E_0, E_n, G_0, G_n - модули упругости первого и второго рода материалов основы и покрытия.

Отсюда следует, что, если с ростом толщины покрытия, остаточные напряжения возрастают или остаются на том же уровне, будет наблюдаться самоотслоение покрытия. Именно это, зачастую, ограничивает возможность применения покрытий большой толщины.

Записав выражение (1) как:

$$h_{\text{сд}} = \frac{\tau_{\text{сд}}}{\sigma_i} \frac{1}{kthkl} \quad (2)$$

Можно сделать вывод о том, что остаточные напряжения в покрытии характеризуются тангенсом угла наклона экспериментальной кривой зависимости прочности сцепления при сдвиге от толщины покрытия.

Проанализируем зависимость $\tau_{\text{сд}}=f(h)$ (рис. 2) для покрытия из композиционного материала, состоящего из карбида хрома в качестве наполнителя, полученного методом ЭКПП ($E = 2,4 \cdot 10^5$ МПа, $G = 0,94 \cdot 10^5$ МПа), нанесенного на основу из стали 45. Режимы нанесения: сила тока $I = 10$ кА; время импульса $t_u = 0,04$ с; время паузы $t_{\text{п}} = 0,04$ с; давление на электроде $P = 40$ МПа.

Анализ экспериментальной зависимости показывает, что для рассматриваемого покрытия наблюдается стабилизация прочности адгезионной связи с ростом его толщины.

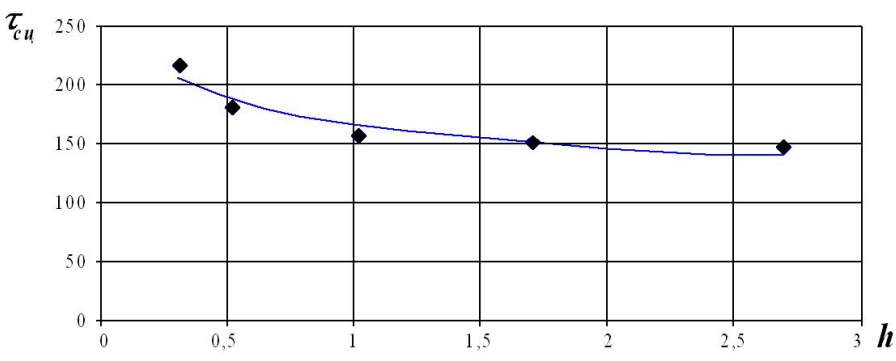


Рис. 2. Зависимость прочности адгезионной связи от толщины покрытия из композиционного покрытия на основе никеля ПГС-1, полученного методом ЭКПП

Применение метода графического дифференцирования в зависимости $\tau_{\text{сд}} = f(h)$ с учетом поправочного коэффициента $1/kthkl$ позволяет оценить уровень остаточных напряжений в покрытии и показать, что рост

толщины покрытия приводит к снижению среднего значения остаточных напряжений вплоть до асимптотического минимального значения (рис. 3).

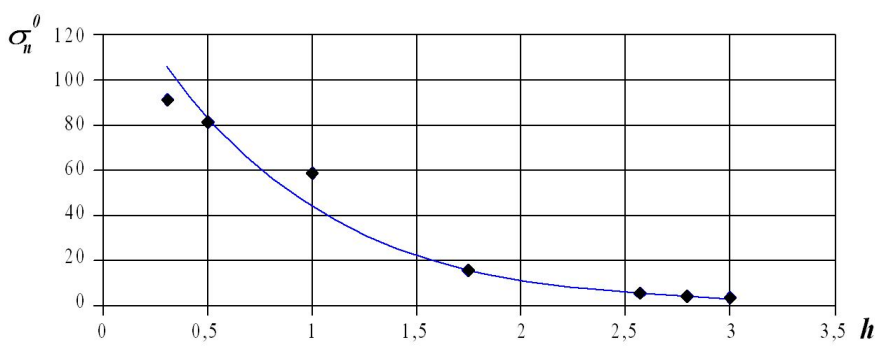
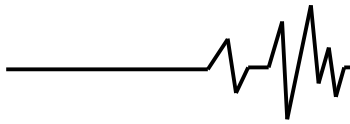


Рис. 3. Зависимость остаточных напряжений от толщины покрытия из композиционного материала на основе никеля ПГС-1, полученного методом ЭКПП



Анализ нагрузочной способности системы "основа-покрытие" из принципа эквивалентности нагружения адгезионной связи. В условиях эксплуатации, например, при растяжении основы в выражении (1) $\sigma_n^{ост}$ должно быть заменено эффективным напряжением $\sigma_n^{эф}$, являющимся суммой остаточных $\sigma_n^{ост}$ и эксплуатационных $\sigma_n^{эксп}$ напряжений в покрытии.

$$h = \frac{\tau_{сц}}{\sigma_n^{эф}} \frac{1}{kthkl}; \quad (3)$$

$$\sigma_n^{эф} = \sigma_n^{ост} + \sigma_n^{эксп}; \quad (4)$$

$$\sigma_n^{эксп} = E_n \varepsilon_o^{кр}; \quad (5)$$

$\varepsilon_o^{кр}$ - критическая деформация основы соответствующая отслоению покрытия под действием эксплуатационного нагружения.

С учетом (4), (5), выражение (3):

$$h = \frac{\tau_{сц}}{(E_n \varepsilon_o^{кр} + \sigma_n^{ост})} \frac{1}{kthkl}. \quad (6)$$

Откуда можно записать:

$$\varepsilon_o^{кр} = \frac{\tau_{сц}}{E_n h kthkl} - \frac{\sigma_n^{ост}}{E_n}. \quad (7)$$

Выражение (7) приводит к, казалось бы, парадоксальному для большинства покрытий выводу, однако справедливому для покрытий полученных методом ЭКПП: снижение остаточных напряжений с ростом толщины покрытия позволяет наносить покрытие повышенной толщины с одновременным повышением возможной критической деформации основы. Таким образом, можно увеличить нагрузочную способность системы "основа-покрытие" без риска отслоения покрытия.

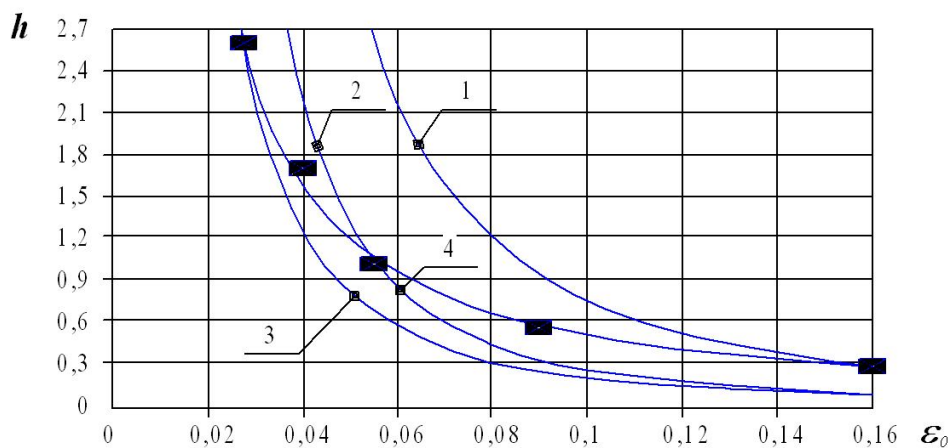


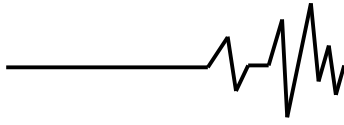
Рис. 4. Предельное состояние системы "основа-покрытие"
1 - $\tau_{сц} = 200 \text{ МПа}$, 2 - $\tau_{сц} = 155 \text{ МПа}$,
3 - $\tau_{сц} = 135 \text{ МПа}$, 4 - на основании экспериментальной зависимости (рис.1)

Для расчета несущей способности конструктивных элементов с покрытием на стадии производства и восстановления изношенных деталей необходимо учитывать такие обстоятельства:

- большинство покрытий, в том числе и наносимые методом ЭКПП, требуют финишной механической обработки для обеспечения необходимой чистоты поверхности и размеров детали. Кроме операций шлифования, более известны методы чистового точения инструментами из современных сверхтвердых материалов [11]. Поэтому в толщине покрытия h необходимо предусмотреть припуск на финишную обработку;

- для чистового точения детали с покрытием уровень адгезионной прочности $\tau_{сц}$ должен обеспечить возможность обработки без отслоения покрытия. Поэтому, прочность адгезионной связи должна иметь запас, величина которого определяется режимами и условиями чистовой обработки.

Для выбора оптимального соотношения ε_o , $\tau_{сц}$ и h приведены на рис. 4, их зависимости, рассчитанные по уравнению (7) с учетом остаточных напряжений. Кривые 1, 2 и 3 построены для различных фиксированных значений $\tau_{сц}$. Кривая 4 получена на основе экспериментальной зависимости $\tau_{сц} = f(h)$ с учетом остаточных напряжений.



Выводы. Методом графического дифференцирования экспериментальной зависимости адгезионной прочности от толщины покрытия определены остаточные напряжения в покрытиях, полученных технологией ЭКПП. По принципу эквивалентности остаточных напряжений и критических деформаций основы при отслоении покрытия установлена функциональная связь адгезионной прочности, толщины покрытия, критической деформации основы и остаточных напряжений. Эта зависимость позволяет определить характеристики "основа-покрытие" для условий финишной обработки и эксплуатации.

Литература

1. Лопата Л.А. Разработка технологии нанесения износостойких порошковых покрытий электроконтактным припеканием с силовым активированием сдвигом: Дис. к-та техн. наук. 05.16.06:/ АН Беларуси. Ин-т. проблем надежности и долговечности машин. - Минск. - 1989.
2. Ляшенко Б.А. Несущая способность материалов и конструктивных элементов с защитными покрытиями в экстремальных условиях эксплуатации. Автореф. дис. докт. техн. наук - Киев, ИПП АН УССР, 1976 - 55с.
3. Ляшенко Б.А., Сорока Е.Б. Особенности высокочастотного нагружения материалов с покрытиями // Проблемы прочности - 1998 - №5 - С. 134-138.
4. Ляшенко Б.А. О критериях когезионно-адгезионной равнопрочности и термостойкости защитных покрытий // Проблемы прочности - 1980 - №10 - С. 114-116.
5. В.Дерягин, Н.А.Кротова. Адгезия, М.-Л., изд. АН СССР,1949.
6. Кречмар. Напыление металлов, керамики и пластмасс. М. Машиностроение, 1966.
7. В.Самсонов, А.П.Эпик. Тугоплавкие покрытия. М.: Металлургия, 1973. - 400 с.
8. Н.И.Москвитин. Склеивание полимеров. М.: Лесная промышленность, 1968. - 304 с.
9. А.С.Фрейдин, М.С. Нуртазин. Характер распределения остаточных напряжений в адгезионных соединениях разных типов // Механика полимеров, 1971, № 4. - С.738-742.
10. Ехотуров А. Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании.- Владивосток: Дальнаука, 1995 – 323 с.
11. Клименко С.А., Муковоз Ю.А., Полонский Л.Г. и др. Точение износостойких защитных покрытий - Киев, «Техника» - 1997 – 146 с.