

УДК 621.793.7

Лузан С. А.

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРООБРАБОТКИ ГАЗОПЛАМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ, СНИЖАЮЩИХ УРОВЕНЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Розроблені математичні моделі залишкових напруг, що утворюються в газополум'яних покриттях при напиленні, залежно від технологічних параметрів віброобробки.

Ключові слова: газополум'яне напилення, залишкові напруги, покриття, основа, віброобробка.

Разработаны математические модели остаточных напряжений, образующихся в газопламенных покрытиях при напылении, в зависимости от технологических параметров виброобработки.

Ключевые слова: газопламенное напыление, остаточные напряжения, покрытие, основа, виброобработка.

Is designed mathematical models of the remaining stress, from in gazoflame coatings upon evaporation, depending on technological parameter vibraprocessing.

Key words: gazoflame evaporation, remaining stress, coating, base, vibraprocessing.

Постановка проблеми. При нанесенні покриття газопламенним способом в них формуються остаточні напруження внаслідок високотемпературного впливу струї газового пламени на частини матеріалу і напыляемую поверхню, значительні градиенти температур в частинках при остигання і в напыляемому покритті, а також різниці коефіцієнтів термічного розширення металу основи і по-

криття. Остаточні напруження, особливо їх градиенти по сеченню покриття, не тільки приводять до підвищеної хрупкості, але і зменшують міцність матеріалу покриття і міцність зчеплення покриття з основою, знизують їх термостійкість і усталостну міцність.

Остаточні, або внутрішні, напруження класифікуються в залежності від об'ємів, в

которых они уравниваются: напряжения I рода характерны макрообъемам тела; напряжения II рода возникают при локальной неоднородности деформации отдельных зерен, часть которых может стать растянутой, а часть – сжатой; напряжения III рода действуют в пределах отдельных зерен и являются следствием неодинакового расстояния между атомами решетки.

В связи с особенностями формирования газопламенных покрытий при их нанесении в них действуют напряжения всех видов. Уровень этих напряжений высок, поскольку он вызван ударом, деформацией, неравновесной кристаллизацией, фазовыми превращениями и другими интенсивными процессами взаимодействия частиц. При формировании покрытия релаксация напряжений как в самих частицах, так и на границе между ними не происходит из-за кратковременности процесса. Поэтому высокий уровень остаточных напряжений в покрытиях сохраняется и после напыления.

При напылении отдельной частицы порошка по периметру частицы образуются нормальные отрывные напряжения или напряжения, которые прижимают ее края. В последнем случае возможно формирование отрывных напряжений в центре частицы, и, если они превышают прочность сцепления с основой, частица отслаивается при охлаждении [1]. Экспериментальные исследования остаточных напряжений в покрытиях из разных материалов на разных основах показали, что в покрытии могут возникать как остаточные напряжения растяжения, так и остаточные напряжения сжатия.

Основные технологические приемы, которые позволяют регулировать остаточные напряжения в покрытиях:

- подбор материалов покрытия и основы по коэффициентам термического расширения;
- регулирование термического воздействия высокотемпературной струи на напыляемые частицы и основу изменения распределения его тепловой мощности по пятну нагрева, а также изменения дистанции напыления или скорости перемещения горелки;
- снижение модуля упругости материала покрытия путем введения в него дополнительно пластичного материала;
- использование подслоев между основой и покрытием, которые обеспечивают плавный переход свойств от материала основы к материалу покрытия;
- изменение толщины покрытия, а также использование многослойных покрытий с чередованием слоев из разных материалов;
- армирование покрытия непрерывными или дискретными проводками или волокнами;

- изменение формы поверхности, которая напыляется, устранение острых углов детали.

Перечисленные технологические приемы не являются универсальными, т. е. для каждого подходит определенный тип деталей и покрытий. Предлагаемый метод снижения уровня остаточных напряжений в газопламенных покрытиях путем интегрирования способа напыления и вибрационной обработки является более универсальным, и применим для деталей разной конфигурации и материалов покрытия.

Применительно к плазменному нанесению покрытий, при котором время кристаллизации напыляемых частиц 10^{-7} – 10^{-4} с, влияние вибрации рассматривалось с учетом её воздействия на структуру напыленного материала [2]. Сведений о применении вибрационной обработки для газопламенных покрытий с целью улучшения их свойств в научно-технической литературе нет. Учитывая положительные результаты исследований виброобработки плазменных покрытий, целесообразно провести исследования о возможности комбинирования способа газопламенного напыления с вибрационным воздействием на напыляемую основу (деталь) с целью снижения уровня остаточных напряжений в покрытии и переходной зоне «покрытие – основа».

Анализ литературы. Впервые идея о возможности применения вибрационного воздействия на кристаллизующийся металл с целью улучшения его свойств была высказана Д. К. Черновым в 1869 г. [3]. Спустя 16 лет в США впервые были проведены опыты по промышленному применению вибростабилизирующей обработки. В связи с отсутствием научных исследований в этом направлении вибрационная обработка достаточно долго применялась только на небольшом числе предприятий [4].

Дальнейшее развитие и распространение методы вибрационной обработки получили в связи с работами R. A. Claxton, A. Rappen, G. P. Wozney, G. R. Crawler, L. E. Thompson [5–7].

На территории бывшего СССР пионерами в данном направлении принято считать О. Ю. Кочубинского, Г. Г. Адояна, А. М. Герчикова, Э. Ч. Гини [8]. Исследования, проведенные этими авторами, посвящены различным проблемам: снижению уровня остаточных напряжений, вызванными упрочняющей обработкой или пластической деформацией изгиба, виброобработке литых и сварных изделий.

В ИЭС имени Е. О. Патона выполнены работы по исследованию метода вибрационной обработки для снижения остаточных напряжений в сварных конструкциях и созданию вибрационной установки [9; 10]. В последние годы выполнены исследовательские работы по при-

менению вибрационной обработки сварных конструкций из низкоуглеродистых сталей [11]. В Донбасской государственной машиностроительной академии А. И. Дрыгой выполнен комплекс работ по исследованию влияния вибростабилизирующей обработки на снижение остаточных напряжений [12]. Исследован процесс снижения остаточных напряжений в ответственных деталях подшипниковых узлов крупных электрических машин при воздействии вибростабилизирующей обработки поэтапно после операций сварки, механообработки и сборки. Проведены работы по снижению технологических остаточных напряжений в заготовке кованого вала ротора, в сварных соединениях из алюминиевого сплава АМг6. Разработаны виброкомплексы серий ВК-79, ВК-86, ВК-89.ЛЭС и ВК-90, обеспечивающие диапазон регулирования частоты вращения электродвигателя от 300 до 8500 об/мин.

Общеизвестно, что знакопеременные напряжения, возбуждаемые в металле, вызывают движение дефектов, в частности дислокаций. При этом в зависимости от величины напряжений движение дислокаций может быть как обратимым, так и необратимым. Необратимое движение дислокаций сопровождается их размножением за счет работы источника Франка-Рида, принцип действия которого заключается в следующем [13]. Вместе с повышением плотности дислокаций происходит также значительное увеличение концентрации точечных дефектов. Точечные дефекты могут взаимодействовать с дислокациями и, таким образом, закреплять их. Закрепление дислокаций приводит к изменению предела текучести. Теория этого явления разработана Гранато и Люкке на основе более ранних работ Фриделя, Келера, Томсона и Холмса [13]. Образование вакансий вызывает также изменение плотности металла и периода решетки.

Приложение переменных напряжений, которые не превышают предела усталости, обеспечивает релаксацию внутренних напряжений.

Затухание колебаний в реальном материале связано с внутренним трением, основным источником которого являются движение дислокаций и их взаимодействие с другими дефектами кристаллической решетки и примесными атомами [13].

Специфика технологии газопламенного напыления, связанная с нагревом напыляемых частиц и последующей их деформацией при формировании слоя, приводит к повышенной плотности дислокаций в материалах покрытия, а также крайней его неоднородности и пористости. Тогда, исходя из вышеизложенного, априори можно предположить, что под действием

знакопеременных напряжений также должны происходить изменения дислокационной структуры напыленных покрытий, которые приводят к снижению уровня остаточных напряжений и другим свойствам покрытия.

Цель статьи – разработать математические модели остаточных напряжений в газопламенных покрытиях в зависимости от технологических параметров виброобработки.

Изложение основного материала. Величину остаточных напряжений в напыленном слое и подложке определяли экспериментально по деформации образца в процессе постепенного удаления слоя по методике, описанной в монографии [14]. Зависимости остаточных напряжений в газопламенных покрытиях от амплитуды деформации и частоты колебаний при виброобработке представлены на рис. 1 и 2.

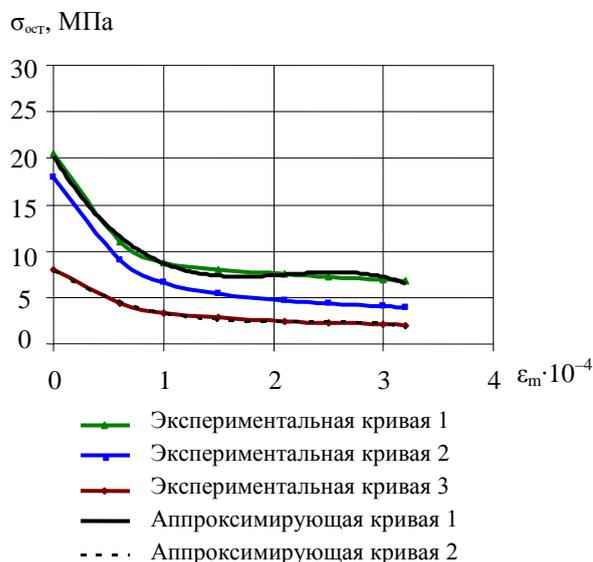


Рис. 1. Изменение остаточных напряжений от амплитуды деформаций при виброобработке в процессе газопламенного напыления.

Экспериментальная кривая 1 представляет распределение остаточных напряжений на границе раздела «покрытие – основа» от величины амплитуды деформации при виброобработке, экспериментальные кривые 2 и 3 показывают распределение остаточных напряжений в слоях расположенных на расстоянии от поверхности основы на 0,2 и 0,5 мм соответственно. Следует отметить, что наиболее высокий уровень остаточных напряжений формируется на границе раздела «покрытие – основа» и снижается по мере удаления от неё. С возрастанием амплитуды деформаций при виброобработке остаточные напряжения в покрытии и на границе раздела «покрытие – основа» уменьшаются, причем наиболее интенсивно этот процесс происходит при увеличении амплитуды деформации до $1,2 \times 10^{-4}$. Также необходимо отметить, что наи-

более значительное уменьшение остаточных напряжений происходит в слоях покрытия, которые ближе расположены к границе раздела «покрытие-основа» и имеют более высокий уровень остаточных напряжений при традиционном напылении. Например, в слое, расположенном на расстоянии 0,2 мм от поверхности основы, остаточные напряжения уменьшаются от 18 до 3,9 МПа (в 4,6 раз), а в слое, отстоящем на расстоянии 0,5 от поверхности основы – от 8 до 2 МПа (в 4 раза). В результате аппроксимации экспериментальных кривых 1 и 3 получаем зависимости, представляющие полиномиальные функции третьей степени:

$$\sigma_{ост1} = -1,5125\varepsilon^3 + 9,6542\varepsilon^2 - 19,706\varepsilon + 20,273, \quad (1)$$

$$\sigma_{ост3} = -0,523\varepsilon^3 + 3,4296\varepsilon^2 - 7,5027\varepsilon + 7,9116 \quad (2)$$

Коэффициенты корреляции составляют $R_1^2 = 0,9922$, $R_3^2 = 0,9935$. Полученные уравнения (1), (2) являются математическими моделями, определяющими величину остаточных напряжений в напыленном покрытии в слоях, отстоящих на расстоянии от поверхности основы 0,2 и 0,5 мм соответственно в зависимости от амплитуды деформации при виброобработке.

Частота колебаний и время виброобработки после напыления на распределение остаточных напряжений в покрытии и на границе раздела «покрытие – основа» влияют аналогично.

Наиболее интенсивно процесс снижения уровня остаточных напряжений в покрытии происходит при увеличении частоты колебаний до 120 Гц и в слоях, более близко расположенных к напыленной поверхности (рис. 2). Например, в слое, расположенном от поверхности подложки на расстоянии 0,2 мм, остаточные напряжения уменьшились с 18 до 4,2 МПа (в 4,3 раза), а в слое, отстоящем на 0,5 мм от напыленной поверхности – с 8 до 2,2 МПа (в 3,6 раза).

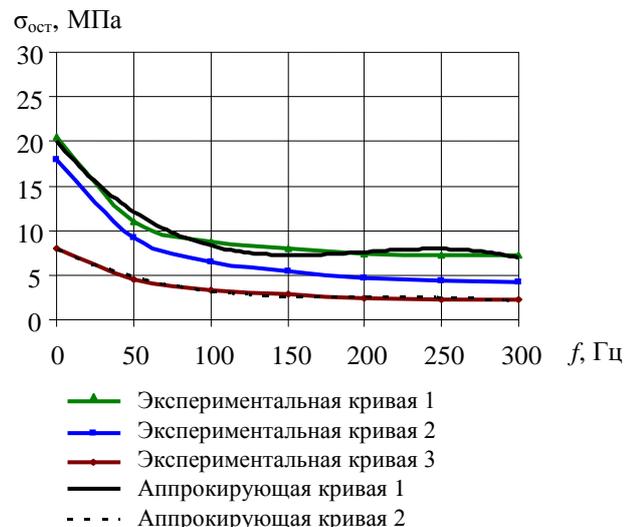


Рис. 2. Изменение остаточных напряжений от частоты колебаний при виброобработке в процессе газопламенного напыления.

Аппроксимируя экспериментальные кривые 1 и 3, получаем зависимости, представляющие полиномиальные функции третьей степени:

$$\sigma_{ост1} = -2 \times 10^{-6} f^3 + 0,0011 f^2 - 0,2101 f + 20,069, \quad (3)$$

$$\sigma_{ост3} = -6 \times 10^{-7} f^3 + 0,0004 f^2 - 0,0785 f + 7,8612. \quad (4)$$

Коэффициенты корреляции составляют $R_1^2 = 0,9808$, $R_3^2 = 0,9894$. Полученные уравнения (3), (4) являются математическими моделями остаточных напряжений в напыленном покрытии в слоях, отстоящих от поверхности основы на 0,2 и 0,5 мм соответственно, в зависимости от амплитуды деформации при виброобработке.

При виброобработке деталей с газопламенными покрытиями после напыления остаточные напряжения в покрытии уменьшаются. Причем с увеличением длительности виброобработки, при постоянной амплитуде деформации и частоте колебаний, наиболее интенсивно процесс снижения уровня остаточных напряжений происходит в течение первых 2–3 минут. Поэтому производить виброобработку газопламенных покрытий после напыления в течение более 3 мин. экономически нецелесообразно (рис. 3).

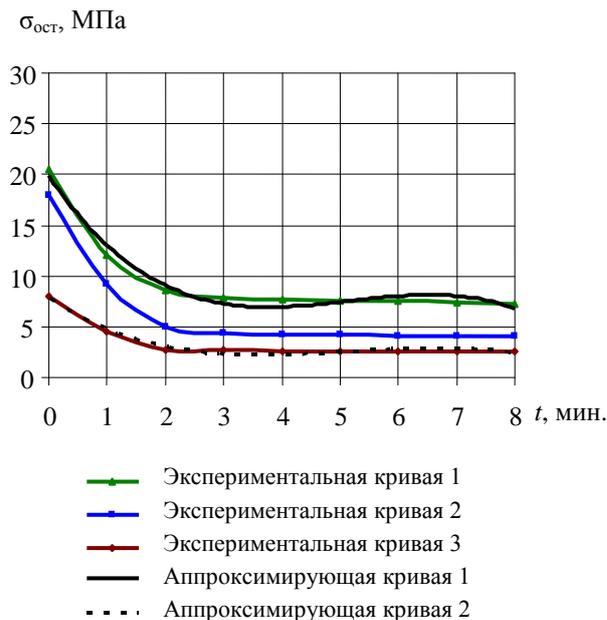


Рис. 3. Изменение остаточных напряжений в газопламенном покрытии от времени виброобработки после напыления.

После аппроксимации экспериментальных кривых 1 и 3 получаем зависимости, представляющие полиномиальные функции третьей степени:

$$\sigma_{ост1} = -0,1141 t^3 + 1,7679 t^2 - 8,4689 t + 19,852, \quad (5)$$

$$\sigma_{ост1} = -0,051 t^3 + 0,7879 t^2 - 3,7142 t + 7,7657. \quad (6)$$

Коэффициенты корреляции составляют $R_1^2 = 0,9759$, $R_3^2 = 0,9739$. Полученные уравнения (5), (6) являются математическими моделями

ми остаточных напряжений в напыленном покрытии в слоях, отстоящих от поверхности основы на 0,2 и 0,5 мм соответственно, в зависимости от длительности виброобработки после напыления.

Обобщая выражения (1)–(6), получим следующее уравнение:

$$\sigma_{ост1} = -Ax^3 + Bx^2 - Cx + K, \quad (7)$$

где A, B, C, K – постоянные для данного материала покрытия и основы, расстояния от поверхности основы до слоя, в котором определяются остаточные напряжения;

x – технологический параметр виброобработки:

ε – амплитуда деформации,

f – частота колебаний,

t – длительность обработки после напыления.

Полученное выражение (7) представляет собой математическую модель остаточных напряжений в газопламенных покрытиях в зависимости от технологических параметров виброобработки.

Вывод. Результаты экспериментальных исследований подтверждают теоретическое обоснование возможности применения вибрационной обработки деталей при газопламенном нанесении покрытий с целью снижения уровня остаточных напряжений.

Виброобработку можно выполнять как в процессе газопламенного напыления, так и после него.

На основе проведенных исследований разработаны математические модели остаточных напряжений в газопламенных покрытиях в зависимости от амплитуды деформации, частоты колебаний при виброобработке и длительности обработки после напыления.

Все модели представляют аналогичные полиномиальные функции третьей степени, которые можно представить обобщенной математической моделью (7) остаточных напряжений в газопламенных покрытиях в зависимости от технологических параметров виброобработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Інженерія поверхні : підручник / [К. А. Ющенко, Ю. С. Борисов, В. Д. Кузнецов, В. М. Корж]. – К. : Наукова думка, 2007. – 559 с.
2. Пузряков А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления : учебное пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов» / А. Ф. Пузряков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 360 с.
3. Чернов Д. К. Избранные труды по металлургии и металловедению / Д. К. Чернов. – М. : Наука, 1983. – 256 с.
4. Gnirss G. Vibration and vibratory stress relief. Historical development, theory and practical application / G. Gnirss // *Welding in the World*. – 1988. – Vol. 26, № 11–12. – P. 284–291.
5. Claxton R. A. Vibratory stress-relieving practice and theory. Heart Treat. Meth. and media / R. A. Claxton // 5th annual conf. and Exhib. – Birmingham : Exhib. Inst. Meth. Techn., 1979. – P. 34–45.
6. Rappen A. Vibration nach dem VSR. Verbahen zur vermindering des eigenspannungsverzugs / A. Rappen // *Lastechnik*. – 1972. – В. 38. – № 10. – S. 223–233.
7. Wozney G. P. An investigation of vibrational stress relief in steel / G. P. Wozney, G. R. Crawler // *Welding Journal*. – 1968. – № 2. – P. 411–419.
8. Коцюбинский О. Ю. Вибрационное старение чугуновых отливок / О. Ю. Коцюбинский, А. М. Герчиков, Э. Ч. Гини // *Литейное производство*. – 1962. – № 4. – С. 31–34.
9. Махненко В. И. Перераспределение остаточных напряжений в сварных балках при вибрационной обработке / В. И. Махненко, Н. П. Пивторак // *Автоматическая сварка*. – 1978. – № 9. – С. 28–31.
10. Эффективность методов снижения остаточных сварочных напряжений / [А. Я. Недосека, А. А. Грудз, О. И. Зубченко и др.] // *Автоматическая сварка*. – 1974. – № 3. – С. 66–69.
11. Файрушин А. М. Совершенствование технологического процесса изготовления корпусов аппаратов с применением вибрационной обработки : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук : спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы» / А. М. Файрушин. – Уфа, 2003. – 25 с.
12. Дрыга А. И. Вибростабилизирующая обработка сварных и литых деталей в машиностроении. Теория, исследования, технология / А. И. Дрыга. – Краматорск : ДГМА, 2004. – 157 с.
13. Кулемин А. В. Ультразвук и диффузия в металлах / А. В. Кулемин. – М. : Металлургия, 1978. – 200 с.
14. Лузан С.А. Газотермическое напыление покрытий : монография / С. А. Лузан. – Харьков : Изд-во «НТМТ», 2009. – 138 с.