

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

д. т. н. ¹Девойно О.Г., к. т. н. ²Пилипчук А.П., ¹Кочеров А.Л.

¹УО «Белорусский национальный технический университет», Минск

²УО «Военная академия Республики Беларусь», Минск

В настоящее время интенсивно развивается лазерная обработка деталей, основанная на возможности лазерного излучения создавать на малом участке поверхности высокие плотности теплового потока, необходимые для нагрева или расплавления материала. При этом происходят структурные и фазовые превращения, возникают внутренние напряжения и деформации, под действием которых происходит изменение формы и размеров конструкции. Технологии лазерной закалки, наплавки, легирования и обработки газотермических покрытий широко используются в машиностроительном комплексе РБ, а также при ремонте деталей военной техники [1]. Разработанные в настоящее время технологии создания газотермических покрытий из самофлюсующихся сплавов системы Ni-Cr-B-Si с последующей лазерной обработкой позволяют восстанавливать изношенные детали до номинальных размеров. Основным объектом являются детали автотракторной техники, нефтяного и нефтехимического оборудования (валы насосов, рабочие колеса в местах их щелевых уплотнений, рис. 1).



Рисунок 1. – Восстановленные валы и шнеки насосов

Для всех видов покрытий является важной задачей обеспечение безотказного длительного функционирования поверхностного слоя. Следствием применения для создания покрытий материалов разнородных по отношению к основе, различия в теплопроводности, модулях упругости, значении коэффициентов термического расширения материалов покрытия и основы, температурных градиентах является высокий уровень остаточных напряжений, возникающих в системе «покрытие-основа». Данные напряжения, алгебраически складываясь с рабочими (внешними) напряжениями, могут их усиливать или ослаблять, изменять адгезионную и когезионную прочность покрытия, приводя к снижению прочности сцепления, являясь причиной образования трещин или отслаивания покрытия при эксплуатации [2].

Для устранения отмеченных недостатков необходимо при выборе материалов покрытия и режимов лазерной обработки учитывать напряженное состояние формируемого поверхностного слоя. Эффективным способом исследования процесса формирования остаточных напряжений в настоящее время является математическое моделирование на основе решения задачи теории пластичности. Для решения данной задачи целесообразно проведение вычислительного эксперимента, имеющего целью определение напряженного состояния нескольких возможных вариантов покрытия с последующим выбором оптимального с точки зрения прочности [3].

В настоящее время для определения напряженного состояния поверхностного слоя применяются экспериментальные и расчетные методы [4]. Использование данных методов позволяет прослеживать кинетику процессов развития внутренних напряжений и деформаций на протяжении

всего цикла деформирования, а не ограничиваться областью остаточных напряжений. Расчетные методы анализа напряженно-деформированного состояния при лазерной обработке основаны на использовании положений термоупругости и термопластичности. В наиболее общей постановке процесс формирования остаточных напряжений после поверхностного упрочнения в принципе сводится к сложной задаче теории термопластичности. Для решения технических задач целесообразно пользоваться частными вариантами данной теории, что позволяет облегчить процесс решения, но при этом позволяет достаточно полно исследовать напряженное состояние [5]. В данной работе для выявления закономерностей образования остаточных напряжений после поверхностного упрочнения предлагается использовать метод переменных параметров упругости [6,7]. В основе данного метода лежит представление уравнений термопластичности как уравнений термоупругости, в которых параметры упругости зависят не только от температуры, но и от напряженно-деформированного состояния материала в данной точке тела.

В первом приближении материал считаем идеально упругим ($E^{(1)} = E$) и по известным формулам теории упругости определяем напряжения $\sigma_*^{(1)}$. Далее по кривой деформирования находим $\varepsilon^{(1)} = \sigma_*^{(1)} / E$ и соответствующее значение $\sigma^{(1)}$. На следующих этапах расчета по методу переменных параметров упругости в каждой точке сечения в качестве модуля упругости в n -м приближении принимаем секущий модуль, определяемый в соответствии с кривой деформирования по значениям напряжения и деформации предыдущего приближения (рис. 2).

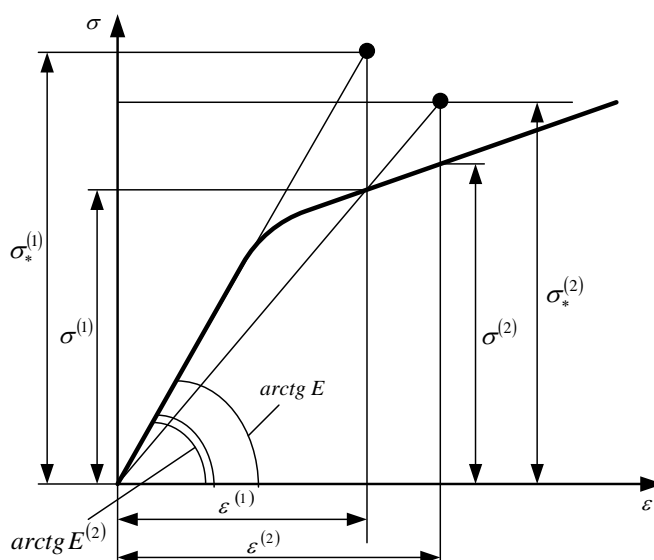


Рисунок 2. – Последовательность расчета по методу переменных параметров упругости

На основе метода переменных параметров упругости выполнен расчет напряженного состояния для системы никель – сталь 40X. На рисунке 3 представлено распределение напряжений в первых четырех приближениях в рассмотренной задаче. Расчет заканчивается при достаточной близости значений напряжений данного и предыдущего приближения $|\sigma^{(n)} - \sigma^{(n-1)}| < \Delta_1$, при условии, что изображающая точка лежит на кривой деформирования: $|\sigma_*^{(n)} - \sigma^{(n)}| < \Delta_2$. Величины Δ_1 и Δ_2 , имеющие размерность напряжений, характеризуют необходимую точность расчета ($\Delta_1 = \Delta_2 = 5$ МПа). В рассмотренной задаче данные условия выполнены в четвертом приближении, что свидетельствует о хорошей сходимости данного процесса последовательных приближений (кривые 2,3,4). Для сравнения на рисунке представлен результат расчета напряжений в предположении, что материал является идеально упругим (кривая 1). При этом напряжения в точке с максимальной температурой ($T_{\max} = 1100^\circ \text{C}$) значительно превосходят предел текучести ($\sigma = -1453$ МПа).

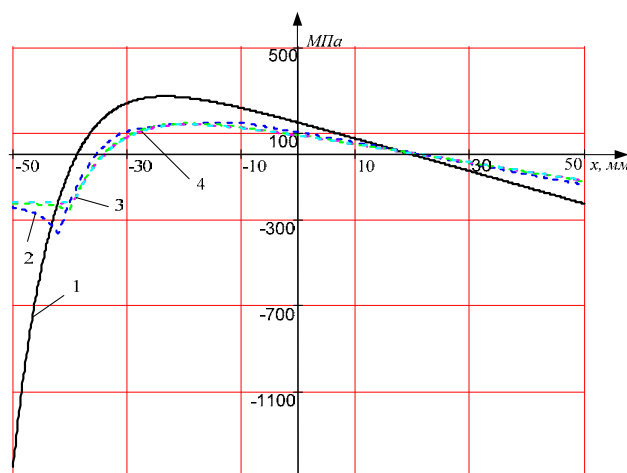


Рисунок 3. – Результаты расчета температурных напряжений в пластине на этапе нагрева (1 – упругий расчет; 2, 3, 4 – расчет по методу переменных параметров упругости)

Применение метода переменных параметров упругости позволило решить задачу оценки напряженного состояния в детали с покрытием. Полученное решение можно использовать для выбора материалов покрытия, определения оптимальных способов и режимов поверхностного упрочнения деталей на стадии их проектирования.

РЕЗЮМЕ

В статье обоснована необходимость определения напряженного состояния в деталях с покрытиями. Для выявления закономерностей образования остаточных напряжений после поверхностного упрочнения предлагается использовать метод переменных параметров упругости. Представлены результаты расчета остаточного напряжённого состояния поверхностного слоя стальных деталей с покрытием из никеля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пилипчук, А.П. Использование современных технологий восстановления механических узлов при ремонте военной техники // Вест. ВА РБ. – 2007. – № 1. – С. 70–76.
2. Куприянов, И.Л., Геллер, М.А. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 176 с.
3. Девойно, О. Г., Оковитый, В.А., Шевцов А.И. Оптимизация технологических параметров обработки композиционных плазменных покрытий лазером непрерывного действия / О. Г. Девойно, В.А. Оковитый, А.И. Шевцов // Сварка и родственные технологии, №10, 2008. – С.56 – 59.
4. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц – М. Машиностроение, 1989. – 304 с.
5. Биргер, И. А. Термопрочность деталей машин / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, И.В. Демьянушко – М.: Машиностроение, 1975. – 455с.
6. Биргер, И. А., Мавлютов, Р.Р. Сопrotивление материалов: учебное пособие / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов – М.: Наука, 1986. – 560с.
7. Мэнсон, С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость / С. Мэнсон – М. Машиностроение, 1989. – 304 с.

SUMMARY

The necessity of determination of the stress state in detail with coatings is shown in the article. The method of variable parameters of elasticity is proposed to identify the regularities of residual stresses appearance after surface hardening. The results of residual stress analysis of the surface layer of steel parts coated with nickel are presented.

Поступила в редакцию 03.11.2013