

УДК 621.0 (07)

В. И. Савуляк, д. т. н., проф.; С. А. Заболотный, к. т. н., доц.; М. С. Украинец

ВЫРАВНИВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ

В статье приведены результаты изучения влияния дополнительных тепловых сопротивлений в системе «деталь-приспособление» на конфигурацию температурных полей и распределение остаточных напряжений после плазменного напыления деталей типа «гильза».

Ключевые слова: напыление, температурные поля, тепловые сопротивления, внутренние напряжения.

Введение

Важную роль в обеспечении качества возобновления или укрепления деталей с использованием газотермических методов напыления (ГТН) порошков играют потоки тепла и их распределение в системе. Потоки тепловой энергии формируют в материале детали и нанесенных покрытиях непрерывно изменяющиеся температурные поля. Значительные перепады температур на разных участках покрытия сопровождаются соответствующими внутренними напряжениями. Это вызывает деформации, искажения геометрии и формирования неоднородных структур в покрытии и основе. Во время напыления длинных деталей типа «гильза» это особенно важно.

Негативными последствиями неравномерности температурных полей и вызванных ими внутренних напряжений являются:

- желобление детали;
- необходимость использования дополнительных переходов механической обработки;
- разнотолщинность покрытия после механической обработки;
- неравномерность твердости и износостойкости покрытия по поверхности;
- повышение себестоимости изготовления или возобновления.

Целью работы является исследование возможности повышения качества возобновления или укрепления внутренних поверхностей деталей типа «гильза» путем управления температурными полями процесса возобновления, в частности минимизацией перепадов температур. Исследования в этом направлении изложены в работах [1, 2, 3]. Установлено, что значительную роль в формировании конфигурации температурных полей и напряжений играют такие факторы, как: материалоемкость заготовки, наличие и характеристики стоков тепла в окружающую среду и оснастку, симметричность конструкции детали.

Материалы и методика исследования

Температурные поля процесса плазменного напыления рассчитывают с помощью пакета программ конечно-элементного анализа [4]. Процесс моделирования операции напыления осуществляют в следующей последовательности: создание 3D-модели детали 1 (рис. 2 а), закрепленной во втулке 2 установки для напыления; определение физико-механических свойств материала; генерация конечно-элементного аналога трехмерной модели (рис. 2 б); определение тепловложения в гильзу от плазменной струи и времени его действия (рис. 2 в); выполнение расчетов результирующих величин (температура, деформации и т. п.) с последующим выведением полученных данных в виде графиков, таблиц, полей и пр.

Температурные напряжения возникают в нагретом теле или в результате неравномерного распространения температуры, или в результате действия внешних факторов, или же при

одновременном их воздействии [5]. Общая деформация в каждой точке нагретого тела состоит из двух частей. Первая часть представляет собой равномерное расширение, пропорциональное повышению температуры T . Так как для изотропного тела это расширение одинаково во всех направлениях, то в этом случае возникают только нормальные деформации, а касательные деформации отсутствуют. Если коэффициент линейного температурного расширения обозначить через α , то эта нормальная удельная деформация в любом направлении равна αT .

Вторая часть является деформациями, необходимыми для сохранения целостности тела, а также деформациями, возникающими под воздействием внешней нагрузки. Эти деформации в упругой области являются функцией напряжений и подчиняются закону Гука изотермической линейной теории упругости. Полные деформации равны сумме этих двух частей и, соответственно, в любой ортогональной системе координат x, y, z связаны с напряжениями и температурой такими зависимостями [5]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha T; \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \alpha T; \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] + \alpha T; \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2G} \sigma_{xy}, \quad \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2G} \sigma_{yz}, \quad \varepsilon_{zx} = \frac{1}{2G} \sigma_{zx}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Зависимости между напряжениями и деформациями математически описывают поведение рассматриваемого материала. Уравнения равновесия в прямоугольной декартовой системе координат имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + X &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + Y &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + Z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Зависимости между деформациями и перемещениями имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}; \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{\gamma_{xy}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \\ \varepsilon_{yz} &= \frac{\gamma_{yz}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right); \\ \varepsilon_{zx} &= \frac{\gamma_{zx}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где u, v, w – компоненты вектора перемещения в направлениях x, y, z соответственно.

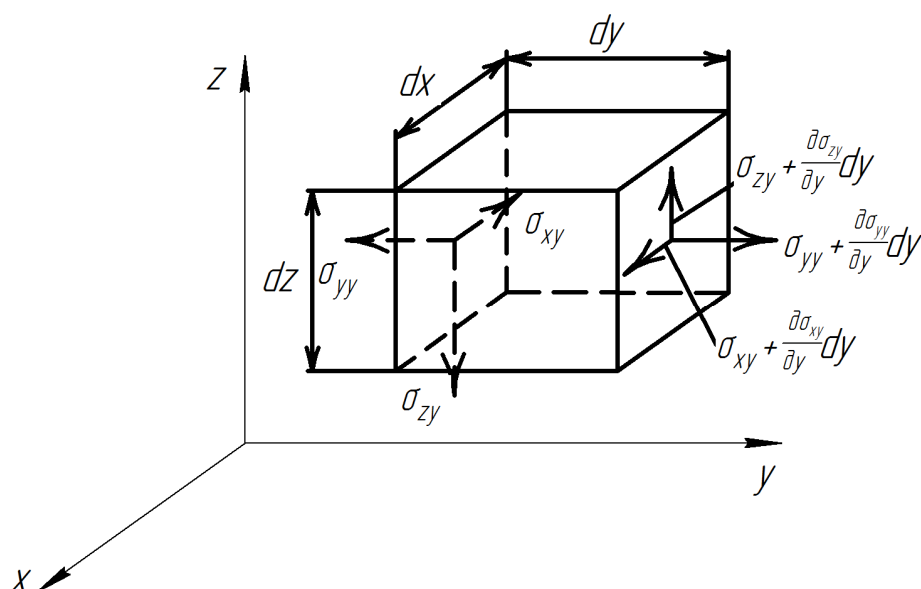


Рис. 1. Элементарный объем, использованный для записи уравнений равновесия

Исследования выполнены на примере гильзы цилиндра домкрата КД-90, изготовленной из стали 20Х. При напылении гильза закрепляется во втулке.

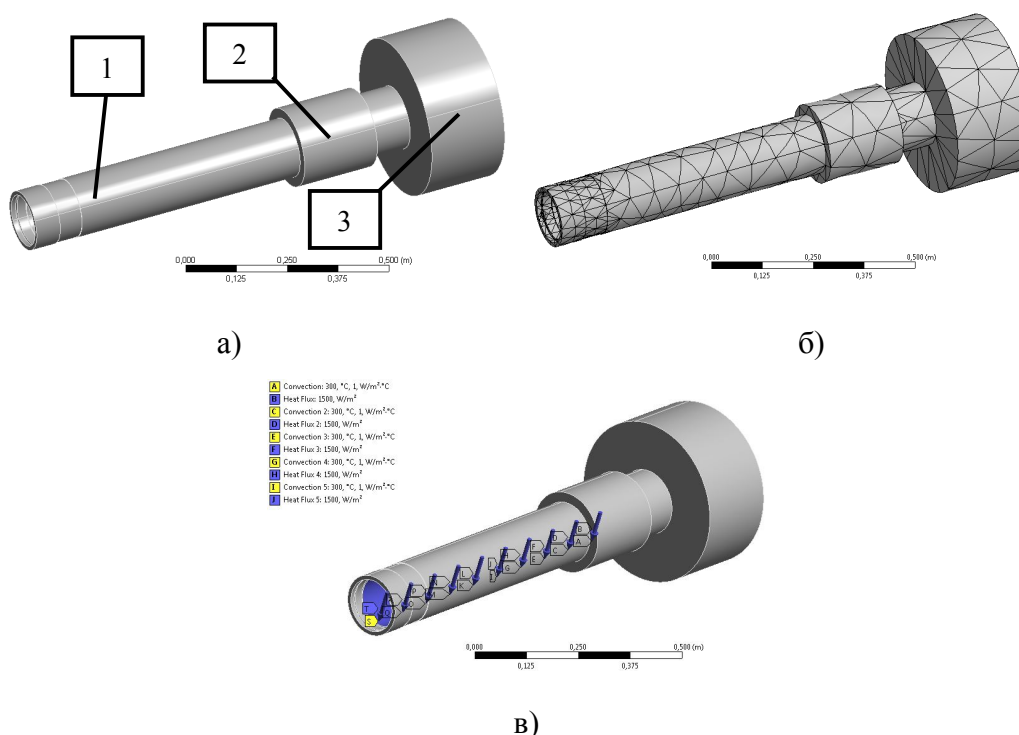


Рис. 2. Этапы разработки модели: а) 3D-модель гильзы: 1 – гильза; 2 – втулка установки для напыления; 3 – фланец, моделирующий теплоемкость приспособления и станка; б) разбиение детали на конечные элементы; в) схема тепловложения

При определении тепловложения учитывают предыдущую активацию поверхности перед плазменным напылением путем предыдущего подогрева до 300 °С.

Результаты исследований

Предыдущими исследованиями установлено, что важную роль в формировании напряжений и деформаций в детали играет процесс охлаждения детали с нанесенным покрытием. Исследовали распределение температурных полей в гильзе, закрепленной во

втулке установки для напыления и свободно охлажденной в атмосфере защитной камеры. Определяли температурные поля детали, которая охлаждается после процесса плазменного напыления четырьмя проходами при использовании схемы напыления от втулки к свободному концу.

Анализ данных исследования распределения температурных полей показал, что разница температур между крайними точками поверхности напыления покрытия составляет около 30 °С. Этот результат объясняется тем, что в месте закрепления детали теплоотдача более интенсивная, поскольку тепло отходит через приспособление в узлы установки. В результате этого напряжения распределяются тоже неравномерно (рис. 3, кривая 1).

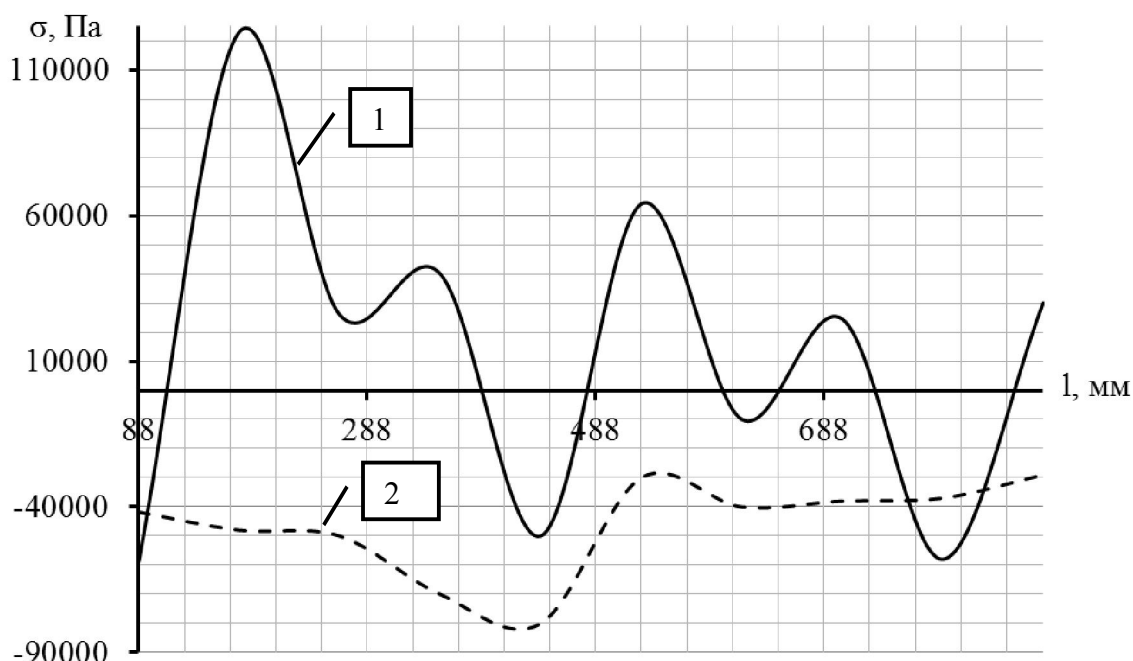


Рис. 3. Распределение напряжений относительно оси вращения детали: 1 – без установления теплового сопротивления (прокладки); 2 – с установлением теплового сопротивления (прокладки)

На рис. 3 кривой 1 показано изменение напряжений на поверхности нанесения покрытия вдоль оси вращения детали в направлении от закрепления к свободному концу. Наибольшие перепады напряжений (около 170000 Па) наблюдают в зоне установления гильзы во втулку (на участке до 280 мм). Также негативным фактором является наличие напряжений растяжения в покрытии. Для избежания этого необходимо уменьшить интенсивность отведения тепла в узлы установки для напыления.

Уменьшить интенсивность теплоотвода можно путем установления теплового сопротивления в качестве прокладки между гильзой и фланцем, а для уменьшения неравномерности распределения температур незакрепленную часть гильзы целесообразно охлаждать извне.

Полученные результаты исследования показали, что установление теплового сопротивления в качестве теплоизолирующей прокладки между гильзой и фланцем, а также дополнительное охлаждение незакрепленной части гильзы выравнивает температурные поля в детали.

В результате выравнивания температур напряжения в детали и покрытии в процессе охлаждения по окончании напыления распределяются относительно равномерно (рис. 3, кривая 2). Перепады напряжений при этом становятся значительно меньше (максимальный перепад – около 50000 Па), распределение напряжений – относительно равномерным, а напряжения растяжения отсутствуют.

Выводы

1. Во время плазменного напыления отверстий длинных деталей типа «гильза» температурные поля распределяются неравномерно, что приводит к возникновению значительных перепадов напряжений в детали.

2. Выровнять температурные поля позволяет установление теплового сопротивления между деталью и приспособлением для закрепления этой детали в станке, а также дополнительное охлаждение незакрепленной внешней поверхности детали. Характеристики тепловых сопротивлений и охлаждения целесообразно определять на основе расчетов с использованием программ конечно-элементного анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хасуи А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Мorigаки; пер. с яп. В. Н. Попова; под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985 – 240 с.
2. Савуляк В. І. Температурні поля та напруження в підшипниках ковзання з композиційними покриттями / В. І. Савуляк, А. В. Губанов, Т. Ф. Архіпова // Наукові нотатки. – 2007. – № 20(2). – С. 159 – 162.
3. Савуляк В. І. Температурні поля та деформації під час відновлення деталей транспортної техніки / В. І. Савуляк, С. А. Заболотний, В. Й. Шенфельд // Вісник СНУ ім. Володимира Даля. – 2009. – № 11. – С. 48 – 52.
4. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
5. Боли Б. Теория температурных напряжений / Б. Боли, Д. Уэйнер. – М.: Мир, 1964. – 510 с.

Савуляк Валерий Иванович – д. т. н., проф., заведующий кафедрой технологии повышения износостойкости, E-mail: vsavulyak@mail.ru.

Заболотный Сергей Антонович – к. т. н., доц., старший преподаватель кафедры технологии повышения износостойкости, E-mail: zab82@mail.ru.

Украинец Максим Сергеевич – студент института машиностроения и транспорта, E-mail: maximukrainets22@gmail.com.

Винницкий национальный технический университет.