

УДК 673.6.0

Д. И. Жук, аспирант, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
 Р. Ф. Гаффанов, кандидат технических наук, ИРК «Проект», Москва
 А. В. Щенятский, доктор технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗАПОРНО-РЕГУЛИРУЮЩЕЙ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

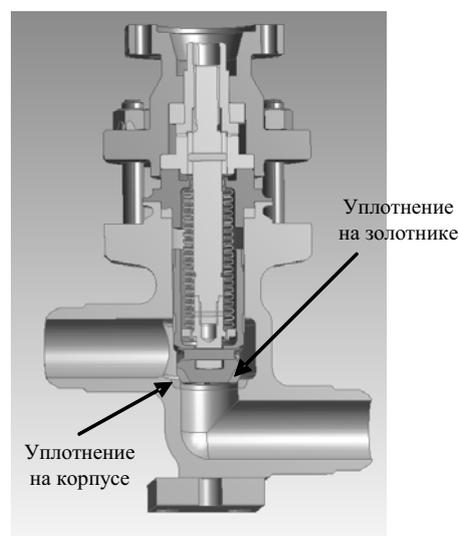
Трубопроводная арматура является одной из самых ответственных частей водопроводов контуров теплоносителя ТЭЦ и АЭС. Данный тип изделий работает в условиях высоких давлений и температур и относится к 1-му классу технической безопасности, поэтому к ресурсу работоспособности и безопасности изделия предъявляются повышенные требования по сравнению с другими типами аналогичной арматуры [1]. Данная статья рассматривает класс запорно-регулирующих арматур с повышенными требованиями к надежности и безотказности технического объекта. Одной из наиболее частых проблем, приводящих к выходу арматуры из строя, является разрушение наплавки на седлах, служащих для обеспечения герметичности соединения (рис. 1).



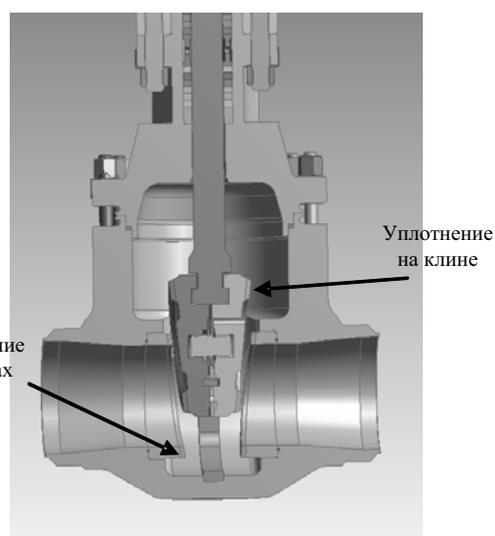
Рис. 1. Треснувшая наплавка Hогanas X-FeSP573 (ЦН-12М-67) на клиновой задвижке. Разрушение произошло спустя 1500 циклов открытия и закрытия задвижки при высокой температуре

Уплотнительные поверхности на запорных органах имеют различную конфигурацию; как правило, это износостойкая наплавка, которая наносится на поверхность корпуса или седла корпуса и непосредственно на запорный орган (рис. 2). Поверхность наносимого покрытия, как правило, имеет различную форму, свойства материала, что влияет на его работоспособность. Площадь контактных поверхностей существенно влияет на выбор приводов запорного

органа и нагрузочную способность уплотнения, поэтому требуется сохранять компромисс между мощностью привода и нагрузочной способностью уплотнений.



а



б

Рис. 2. Уплотнительные поверхности на запорных органах: а – клапана сильфонного; б – задвижки клиновой

Несмотря на то что все узлы производимой арматуры, в том числе и наплавка, рассчитываются по

общепринятым аналитическим методикам [2], они не способны учесть все внешние факторы воздействия, из-за чего разрушение, потеря герметичности происходит до истечения предполагаемого срока службы. Существующие методы расчета имеют ряд допущений [3, 4, 5]:

- геометрия рабочих поверхностей покрытия идеальна;
- давление на рабочие поверхности седел равномерное;
- не учитывают температурное воздействие (неравномерное распределение температурных полей и деформаций).

В проведенных исследованиях [6] было установлено, что контактные поверхности могут терять контакт между собой из-за высоки продольных и поперечных деформаций, что может существенно влиять на контактное давление как в сторону увеличения (что может спровоцировать повышение давления в соединении покрытия седел), так и в сторону уменьшения давления в зоне контакта (потеря герметичности).

В связи с этим существует необходимость разработки методики расчета уплотнительных поверхностей седел (УПС) с учетом теории тепломассопереноса и физики твердого тела.

Проведенный анализ показал, что теория расчета уплотнений, применяемая при проектировании запорной и запорно-регулирующей арматуры, работающей в условиях высоких давлений и температур, объединяет следующие взаимозависимые задачи:

- 1) тепловую для распределения температур в материале арматуры;
- 2) задачу деформирования твердого тела;
- 3) контактную для сопряжения поверхностей наплавки в месте уплотнения и контактов частей арматуры.

Для корректного решения задачи о нахождении напряжений в наплавке от действия температурных полей необходимо совместное решение всех трех задач. Наиболее подходящим математическим аппаратом для постановки задач является метод конечных элементов [7, 8] так как он позволяет учесть:

- нелинейность форм деталей и контактирующих поверхностей;
- градиент температурных полей и деформаций;
- контактное взаимодействие и нелинейность поведения материала.

Тепловая задача

Широко известен факт увеличения объема тела при увеличении температуры из-за увеличения межатомного расстояния в микроструктуре материала. Этот эффект часто используется в технике, например, для посадок с натягом. Однако он может иметь негативное влияние и приводить к появлению внутренних и контактных напряжений в механическом устройстве. Связано это, прежде всего, с градиентом температур в устройстве, а также с жестким закреплением механизма. Трубопроводная арматура чаще всего закрепляется присоединением ее к трубопроводу, поэтому в нашем случае напряжения в наплав-

ке вызываются неравномерностью температур в арматуре (рис. 3). Довольно большая часть арматуры, особенно с повышенными требованиями к надежности, на ТЭЦ и АЭС работает при высоких температурах (до $0,5t_{пл}$). Помимо того что подобные условия эксплуатации значительно ухудшают физико-механические свойства материалов, они также приводят к появлению термонапряжений, которые могут привести к разрушению наплавки.

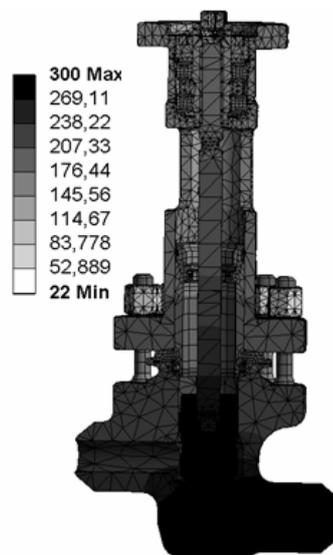


Рис. 3. Распределение температурных полей в клиновой задвижке

Уравнение теплопроводности описывается зависимостью [8]

$$\theta_{cm}(N, t) = \theta_T(N, t);$$

$$\frac{\lambda_{cm} \partial \theta_{cm}(N, t)}{\partial n} = \frac{\lambda_T \partial \theta_T(N, t)}{\partial n}, \quad (1)$$

где θ – температура; λ – коэффициент теплопроводности.

В случае задвижки, работающей при повышенных температурах, можно выделить 2 тепловых граничных условия: внутренняя поверхность, контактирующая с рабочей средой, имеет температуру рабочей среды; через все внешние поверхности устройства происходит теплообмен с окружающей средой. Полученное численными методами распределение температур в материале сильфонного клапана представлено на рис. 3.

Термопрочностная задача

Определения температурных деформаций и напряжений [9, 10]

$$\{\epsilon_0^e\} = \alpha \Delta T \{N^e\}^T, \quad (2)$$

где α – коэффициент линейного температурного расширения; ϵ_0^e – температурные деформации.

Напряжения и деформации связаны между собой формулой (3), которая является следствием закона

Гука, поскольку подразумеваются только упругие деформации:

$$[\sigma] = [D](\varepsilon^e + \varepsilon_0^e), \quad (3)$$

где D – матрица жесткости.

Задача контактного взаимодействия

Запорно-регулирующая арматура – сложное устройство, состоящее из большого числа различных компонентов. Для проведения расчета уплотнительных поверхностей требуется расчет всей системы как целого, включающий большое количество взаимосвязанных деталей. В случае когда заведомо известно, что в процессе эксплуатации поверхности, находящиеся в контакте не будут двигаться друг относительно друга, можно применить граничное условие, запрещающее относительное перемещение узлов поверхности одного и другого тела. В случае когда взаимное перемещение поверхностей возможно, задача значительно усложняется. Решение контактной задачи сводится к решению системы линейных уравнений, объединенной общими граничными условиями [11]:

$$\begin{cases} [K_1]\{X_1\} = \{P_1\}, \\ [K_2]\{X_2\} = \{P_2\}. \end{cases} \quad (4)$$

При этом влияние одного тела на другое заключается в прикладывании силы к узлу, решение находится итерационным способом, одна поверхность может осциллировать вокруг другой с затухающими колебаниями.

$$(K + \varepsilon G^T G)u = F, \quad (5)$$

Получено 06.05.2016

где F – сила контакта; u – величина проникновения одного тела в другое.

Из проведенного анализа становится очевидным необходимость совершенствования методики расчета уплотнительных поверхностей и наплавов уплотнительного узла, которая обобщала бы в себе все особенности конструкции, контактного взаимодействия и влияние внешней среды (механического, температурного и контактного взаимодействия).

Библиографические ссылки

1. НП-068-05. Трубопроводная арматура для атомных станций.
2. Общие технические требования. – М. : НТЦ ЯРБ, 2005.
3. Там же.
4. ПНАЭ Г. 7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М. : Энергоатомиздат, 1989.
5. ПНАЭ Г-7-008–89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭУ. – М. : Энергоатомиздат, 1990.
6. Гаффанов Р. Ф., Щенятский А. В. Управление процессом формирования соединения с натягом, собираемого термическим методом // Вестник ИжГТУ. – 2008. – № 3. – С. 9–13.
7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / пер. с англ. под ред. Б. Е. Победри. – М. : Мир, 1975. – 541 с.
8. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / под ред. Б. Е. Поберди. – М. : Мир, 1979. – 392 с.
9. Гаффанов Р. Ф., Щенятский А. В. Указ. соч.
10. Зенкевич О. Указ. соч.
11. Соснович Э. В., Щенятский А. В. Особенности определения силовых факторов при численном моделировании гидропрессовых соединений / Тез. докл. XXXI науч.-техн. конф. (ИжГТУ, 15–17 апр.1998 г.). – В 2 ч. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 1998. – С. 217–219.