УДК 621.165

С.А. КАЧАН, к. т. н., доцент (БНТУ)
г. Минск

РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННЫХ ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК КЛАССА A-USC

История развития паросиловых установок – это эволюция в направлении большей удельной мощности и эффективности прежде всего за счет повышения начальных параметров пара.

В 1950-х годах передовыми машиностроительными компаниями было быстро достигнуто повышение рабочей температуры паротурбинных установок вплоть до 650°С. Для эксплуатации при таких высоких температурах в турбинах использовались аустенитные роторы и корпуса. Турбины были относительно небольшими, в основном мощностью менее 50 МВт, и это означало, что высокие коэффициенты теплового расширения и низкая теплопроводность, характерные для аустенитных материалов, не были таким препятствием, как при проектировании современных мощных установок. Однако и у этих малых новаторских турбин было много проблем, в том числе из-за применения аустенитных сплавов, поэтому для повышения надежности с 1960-х до начала 1990-х годов начальная температура пара стабилизировалась на уровне около 540°С (рисунок 1) [1].

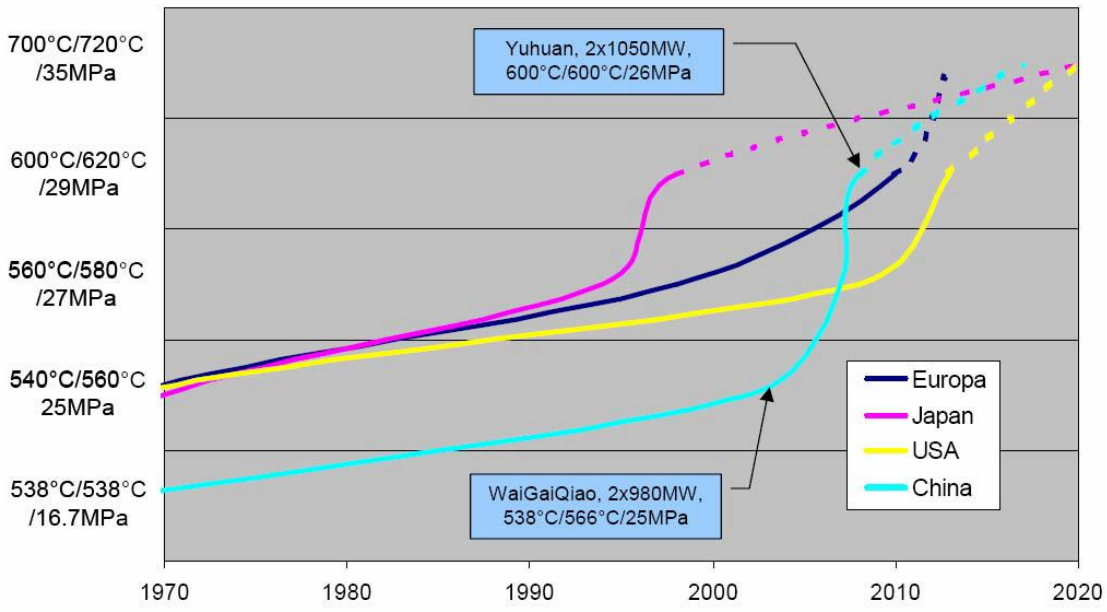

Рис. 1. Динамика рабочих температур паросиловых установок в мире

В начале 2000-х годов начальные параметры пара на угольных тепловых электростанциях возросли от сверхкритического (Super Critical – SC) до супер сверхкритического давления (Ultra Super Critical – USC) при начальной температуре 600°C (рисунок 1) [1].

Перед лицом экологических проблем актуальным является дальнейшее повышение тепловой экономичности. Так, расчеты для угольных электростанций показывают, что при увеличении параметров свежего пара до 700°C и 35 МПа выбросы CO_2 могут быть сокращены примерно на четверть по сравнению со средними мировыми показателями [2]. При этом КПД установок приблизится к 50% [2].

С 2008 года в рамках национального проекта в Японии машиностроительные компании и научно-исследовательские институты разрабатывают паросиловую установку класса A-USC (Advanced Ultra Super Critical) с начальной температурой 700°C [2, 3]. В период с 2008 года были испытаны материалы и технологии, относящиеся к котлам, турбинам и арматуре.

Допустимый предел применения усовершенствованной стали 12Cr, которая в настоящее время рассматривается для коммерциализации, находится на уровне 630°C, а достижение более высоких температур пара требует использования аустенитных сплавов на основе никеля.

Из-за отмеченных выше свойств таких сплавов даже при достижении высоких характеристик прочности на пробном малогабаритном образце, трудно достичь требуемых свойств прочности в образцах большой массы и объема. По этой причине производство сплава на основе никеля весом порядка десяти тонн, который может использоваться для роторов паровых турбин, и проверка его долговременной надежности являются наиболее важными вопросами для разработки установок класса A-USC. Кроме того, необходимо спроектировать компоненты таким образом, чтобы использование дорогостоящих сплавов на основе никеля было ограничено. В частности, трудно изготовить большой кованый ротор, и поэтому производство сварного ротора из разнородных материалов с использованием сплавов на основе никеля и хромистой стали является одной из ключевых технологий для реализации A-USC. Применяемый метод сварки: TIG (Tungsten Inert Gas) – сварка в среде инертного газа [2].

Конструкция ротора сложна, а рабочие допуски при его производстве и сборке очень жесткие. При этом сплав на основе никеля представляет собой труднообрабатываемый материал, твердый и вязкий. Поскольку теплопроводность сплава низкая, а тепло во время резки концентрируется локально, существует проблема, заключающаяся в том, что местное повреждение инструмента происходит уже в начале процесса. Трудности с выбором

инструмента и управлением смазочно-охлаждающей жидкостью в настоящее время преодолены, и может быть достигнута точность обработки, аналогичная точности традиционного производства [2].

Для проверки надежности изготовленный сварной ротор испытан вращением при нагреве до рабочих температур [2]. Испытательный стенд позволяет моделировать температурное поле 700°C или выше с использованием тепла, излучаемого нагревателем. Он снабжен приводным двигателем, способным к длительным тестам ротора при вращении на номинальной частоте 3600 об/мин в вакууме. Эти испытания были предназначены, главным образом, для подтверждения технологичности ротора турбины из сплава на основе никеля реальных размеров и для оценки остаточного срока службы компонентов. Во время испытаний круглосуточно контролировались вибрация вала, тепловые расширения, температура окружающей среды панели нагревателя и температура ротора. Неразрушающий контроль показал удовлетворительное прохождение тестов.

Некоторые испытания материалов и сварных соединений котла и турбины на ползучесть превысили 100 000 часов, и долгосрочная проверка надежности близится к завершению [2].

Помимо достижения требуемых показателей жаропрочности и сопротивления ползучести, высокотемпературная газовая коррозия для первичного и промежуточного пароперегревателей котлов класса A-USC на 700°C, использующих уголь с высоким содержанием серы, будет серьезной проблемой. Поэтому в рамках японского проекта 2008 года проводятся лабораторные испытания на коррозию материалов-кандидатов, таких как сплавы на основе железа-никеля и никеля [3]. Данные этих испытаний показывают, что сплавы для 700°C A-USC имеет такую же коррозионную стойкость, что и сплав 25Cr-20Ni, который применяется для котлов USC на 600°C, сжигающих уголь с высоким содержанием серы [3].

Другой существенной проблемой для высокотемпературных котлов класса A-USC является окисление труб, коллекторов и трубопроводов со стороны пара [3]. Когда толщина паровой окалины значительно увеличивается, это вызывает ухудшение теплопередачи и приводит к значительному повышению температуры металла труб, а также засорению или закупорке труб и абразивному повреждению лопаток турбины из-за отслоения окалины. Способом преодоления проблемы в [3] рассматривается дробеструйная обработка внутренней поверхности труб.

В заключение отметим, что усовершенствованные установки класса A-USC, целевая температура пара которых составляет 700°C, разрабатываются не только в Японии, но и во всем мире: в Европейском Союзе, США, а

в последнее время также в Индии и Китае. На ближайшие десятилетия разработка технологий A-USC – это важная актуальная задача производителей паросиловых установок, использующих ископаемое топливо.

Список литературы:

1. Materials and Design Solutions for Advanced Steam Power Plants / T.-U. Kern, K. Wieghardt, H. Kirchner // 4th Int. Conf. Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, Hilton Head, SC. – 2004.
2. Development of 700°C Class Steam Turbine Technology / Eiji Saito, Shin Nishimoto, Hiroyuki Endo, Ryuichi Yamamoto, Kenji Kawasaki, Jun Sato // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, vol. 54 No. 3. – September 2017.
3. Development of Advanced Ultra Supercritical Fossil Power Plants in Japan：Materials and High Temperature Corrosion Properties / Yuji Fukuda // Kure Research Laboratory, Babcock-Hitachi K.K., Kure-shi, Hiroshima-ken, Japan. – August 2016.

Информация об авторе:
Качан Светлана Аркадьевна, к.т.н., доцент, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, д. 65, kachan@bntu.by