

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Поповой Ирины Павловны  
«Исследование сопротивления разрушению сплава базовой композиции  
45X25H35C2Б и разработка методов оценки работоспособности реакционных  
змеевиков высокотемпературных установок пиролиза», представленную на  
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

Выполненная Поповой И.П. диссертационная работа относится к двум областям исследований, из 12 включенных в паспорт специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение): 1. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий; 5. Установление закономерностей и критериев оценки разрушения материалов от действия механических нагрузок и внешней среды.

Диссертация посвящена исследованию работоспособности сплава 45X25H35C2Б в условиях длительной работы в режиме сессий оборудования высокотемпературных установок пиролиза, включающих эксплуатацию, периодическое охлаждение для обслуживания с целью удаления отложений в трубах (кокса), и выход на эксплуатационный режим. Такой режим эксплуатации является крайне сложным в техническом отношении и требует подробного исследования процессов изменения структуры в материале деталей для обеспечения устойчивости процесса переработки углеродосодержащего сырья и повышения его технической и экономической эффективности.

**Актуальность** исследования определяется экстремально жесткими техническими условиями эксплуатации, включающими технические требования различного характера: 1) установленная допустимая рабочая температура процесса пиролиза (внутренней поверхности реакционных труб) составляет  $1070\text{ }^{\circ}\text{C}$  (отношение рабочей температуры к температуре солидуса сплава равно  $T_p/T_{\text{сол}} \approx 0,82$ ), что является предельным случаем в технике; температура внешней (нагреваемой поверхности труб) достигает  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_p/T_{\text{сол}} \approx 0,90$ ; 2) в процессе эксплуатации на внутренней поверхности труб выделяются отложения в виде пористого кокса, которые создают местные градиенты температуры с разогревом до  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что вызывает «коробление» труб, стимулирующее рост трещин; 3) сессионный режим высокотемпературной эксплуатации длительностью до 2000 часов усложняет анализ механики разрушения вероятностными аспектами, связанными с термоциклированием в процессе удаления отложений. Подход автора к анализу работоспособности сплава 45X25H35C2Б соответствует применяемому в современных исследованиях в России и за рубежом.

|                                            |             |
|--------------------------------------------|-------------|
| Вх. № <u>3675</u>                          | Исполнено   |
| <u>01</u> <u>12</u> <u>20</u> <u>14</u> г. | В ДЕЛО      |
| Основн. <u>4</u> л.                        | № _____     |
| Прил. _____ л.                             | подп. _____ |



### **Научная новизна диссертации.**

1. Разработана методика определения скорости роста трещины применительно к трубным элементам оборудования пиролиза углеводородного сырья на основе вычисления контурного  $C^*$ -интеграла функции напряженно-деформированного состояния от скорости деформации и скорости перемещения методом конечных элементов.
2. Определены механические характеристики для расчета долговечности реакционных труб из сплава 45X25H35C2Б при температуре эксплуатации 900-1100 °С:
  - длительная прочность и ползучесть для металла сварного шва;
  - характеристики усталости основного металла и сварного шва;
  - расчетная зависимость скорости роста усталостной трещины.
3. Разработана методика оценки ресурса эксплуатации трубных элементов при наличии в них трещиноподобных дефектов.

### **Практическая значимость работы.**

Результаты проведенных исследований использованы в практической деятельности: при разработке технических условий на трубные системы оборудования для пиролиза; при разработке методики оценки допускаемых размеров трещиноподобных дефектов в реакционных трубах и времени их безопасной эксплуатации в стационарном режиме эксплуатации.

Значительная часть исследований выполнена на материалах промышленной выплавки заготовок деталей оборудования для пиролиза, что подтверждает практическую значимость выполненной работы.

### **Достоверность и новизна исследований.**

Исследования проведены на основе современных методик изучения структуры и разрушения материалов, стандартизованными методами, на современном оборудовании для исследования и испытания сплавов с применением стандартизованных программ расчета напряженно-деформированного состояния деталей. Для сплавов системы Fe-Cr-Ni-C-Si-Nb, предназначенных для изготовления оборудования высокотемпературного пиролиза, такое исследование имеет научно-техническую новизну.

Результаты исследований, полученные автором, являются значимыми для науки в области материаловедения и находятся на уровне современных представлений о структуре и свойствах жаростойких жаропрочных сплавов, применяемых в химической промышленности для оборудования пиролиза углеводородного сырья.

**Замечания по тексту диссертации.** Процесс разрушения является конечным этапом жизненного цикла изделий, определяемого процессами их производства и эксплуатации. В этой связи имеется ряд замечаний по содержанию диссертации, представленной к защите по специальности 05.16.09 – материаловедение.

1. В работе не приведен анализ системы контроля качества реакционных труб в производстве, включая технические требования по



ГОСТ или техническим условиям и показатели приемочного контроля, с которыми, следует предположить, тесно связан процесс разрушения.

2. В работе не приводится обычно рекомендованный нормативно-технической документацией режим проведения первичной термической обработки заготовок деталей из этого класса сплавов, возможность ее исключения не обосновывается.

3. Исходная структура сплава состоит, в основном, из матричной  $\gamma$ -фазы на основе Fe-Cr-Ni со стабильным химическим составом ( $\approx 80\%$  объема) и эвтектики, содержащей  $\gamma$ -фазу и карбид на основе хрома  $M_7C_3$ , расположенной по границам дендритных ячеек ( $\approx 20\%$  объема). По-видимому, механизмы разрушения различных зон такой гетерогенной структуры (рис. 3.18, с. 81) должны отличаться, однако в диссертации эта особенность выбранного материала (сплав системы 45X25H35C2B) не рассматривается.

4. Структура сплавов системы Fe-Cr-Ni-C-Si-Nb при термической обработке и длительной высокотемпературной эксплуатации  $T_p/T_{сол}=0,80-0,90$  склонна к непрерывным изменениям, включая: а) переход первичного эвтектического карбида на основе хрома  $M_7C_3$  в  $M_{23}C_6$  и образование матричных карбидов; б) образование интерметаллических соединений с высоким содержанием кремния и ниобия; в) появление в структуре сплава карбонитридов на поздних стадиях эксплуатации. Имеется определенная вероятность, что эти факторы могут влиять на характер и механизмы разрушения реакционных труб при эксплуатации.

5. В главе 3, с. 52 утверждается «В условиях, когда максимальные напряжения не превышают **предел текучести**, и, следовательно, **пластические деформации в макрообъемах отсутствуют**, усталостное разрушение практически не наблюдается, поскольку число теплосмен в реальных конструкциях за срок их службы редко превышает несколько сот». Технический смысл этого утверждения применительно к теме исследования непонятен. При кратковременных испытаниях обычно определяют условный предел текучести сплава  $\sigma_{0,2}$  (деформация составляет  $0,2\%$ ), такие напряжения при эксплуатации изделий, скорее всего, являются недопустимыми. Возможно, автор имел в виду **предел упругости**.

6. Карбиды на основе хрома в сплавах этой системы содержат до  $20\%$  других металлических элементов (железа, никеля, молибдена, вольфрама), поэтому для них принято иное обозначение, например,  $M_{23}C_6$ , а не  $Cr_{23}C_6$  (с. 81, 162).

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, основные ее результаты опубликованы, в том числе в 5 научных журналах из списка, рекомендованного ВАК России. Содержание автореферата соответствует основным идеям и выводам диссертации. Текст диссертации и иллюстративный материал тщательно отредактированы, понятны и легко воспринимаются при изучении.

Теоретические положения, результаты исследований и выводы сформулированы достаточно полно и аргументировано. В диссертации научно обосновано решение технологической задачи – обеспечение жаростойким жаропрочным сплавом производства оборудования для пиролиза углеводородного сырья, работоспособного до температуры 1100 °С. Кандидатская диссертация отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней №842 от 24.09.2013 г. ВАК России, а ее автор Попова Ирина Павловна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение).

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, профессор



Анастасиади Григорий Панеодович

профессор кафедры «Технология и исследование материалов»  
Федерального государственного автономного учреждения высшего  
образования «Санкт-Петербургский политехнический университет».  
Почтовый адрес: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29.  
Телефон – (812) 2972095, e-mail – office@spbstu.ru

