

УДК 620.193.4:620.193.5

И.М. Медведев¹, Я.Ю. Никитин¹, А.И. Пузанов², А.Б. Лантев¹**МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ
НА СТОЙКОСТЬ К СУЛЬФИДНО-ОКСИДНОЙ КОРРОЗИИ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-93-100

Установлено, что для оценки стойкости сплавов к сульфидно-оксидной коррозии (СОК) в основном используют три вида испытаний: стендовые, в печах и электрохимические. Наиболее широко распространены испытания в печах. В качестве агрессивной среды при таком виде испытаний чаще всего используют состав 75% Na₂SO₄+25% NaCl. Температура испытаний может варьироваться от 650 до 950°C. Основными критериями оценки стойкости сплава к СОК является изменение массы и глубина поврежденного слоя. Ряд опубликованных работ посвящен исследованиям влияния СОК на механические свойства жаропрочных сплавов.

Ключевые слова: жаропрочные сплавы, разрушение, эксплуатация, ресурс, агрессивная среда.

I.M. Medvedev¹, Ya.Yu. Nikitin¹, A.I. Puzanov², A.B. Laptev¹**HOT CORROSION TESTING METHODS FOR
HIGH-TEMPERATURE ALLOYS (review)**

Hot corrosion testing of superalloys can be conducted using burner rig, deposit recoat method or electrochemical testing. Periodical deposition of salts, followed by heating in furnace is the most common way to evaluate resistance of superalloy to hot corrosion. 75% Na₂SO₄+25% NaCl is the most common corrosive solution for this type of testing. Test temperatures range from 650 to 950°C. The main criteria for assessment of alloys resistance to hot corrosion is gravimetry, which is used to measure weight loss and corrosion depth. Many researchers have also investigated the influence of hot corrosion on mechanical properties of high temperature alloys.

Keywords: superalloys, destruction, service conditions, durability, corrosive environment.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Акционерное общество «ОДК-Авиадвигатель» [Joint Stock Company «UEC-Aviadvigatel»]; e-mail: office@avid.ru

Введение

Проблема высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии (СОК) известна с 40-х годов двадцатого века, однако особое внимание этой проблеме стало уделяться в конце 60-х годов во время военного конфликта во Вьетнаме [1]. В результате длительной работы авиации над морской акваторией наблюдалась сильная коррозия деталей «горячей» части газотурбинных двигателей (ГТД), приводящая к преждевременному отказу и нерегламентированному ремонту техники. С тех пор понимание поведения металлов и сплавов при высоких температурах, особенно их коррозионного поведения, а также обеспечение защиты поверхностных слоев стало объектом научных исследований [2–5].

Материалы деталей турбин должны быть не только жаропрочными, но и противостоять агрессивным условиям эксплуатации в газовой среде при рабочих температурах

[6]. Проблемы, связанные с высокотемпературной газовой коррозией, остаются полностью неразрешенными и по настоящее время. Применение современных многокомпонентных покрытий частично решает проблему горячей коррозии на защищенных деталях [7]. Тем не менее в современных двигателях обнаруживаются детали турбины, имеющие повреждения, вызванные протеканием сульфидно-оксидной коррозии – СОК (рис. 1). Прежде всего, это связано с невозможностью создания абсолютно стойких к СОК жаропрочных сплавов, невозможностью защитить все детали коррозионностойкими покрытиями, а также с ужесточением условий работы двигателей [8, 9].



Рис. 1. Коррозионные повреждения на лопатках турбины ГТД

Таким образом, ресурс современных ГТД в значительной мере определяется интенсивностью процессов их коррозии в эксплуатационных условиях и степенью влияния повреждений на прочностные характеристики материалов. В настоящее время влияние коррозии на прочностные характеристики (статическая прочность, малоцикловая и многоцикловая усталость, длительная прочность, циклическая трещиностойкость) изучено лишь на уровне качественного сравнения характеристик некоторых применяемых сплавов без возможности оценки ресурса их работы применительно к деталям турбины ГТД.

Решение вопросов, связанных с высокотемпературной коррозией, усложняется отсутствием в промышленности общепринятых (стандартизованных) методик испытания жаропрочных сплавов на стойкость к СОК и отсутствием методик и алгоритмов получения математических моделей, позволяющих прогнозировать ресурс деталей с учетом воздействия данного вида коррозии.

В связи с обозначенными проблемами представляется актуальной разработка расчетно-экспериментальной методики оценки ресурса основных материалов «горячей» части ГТД, позволяющей прогнозировать развитие коррозионных поражений и степень их влияния на ресурсные показатели материалов.

Целью данной работы является обзор современных методов испытаний жаропрочных сплавов на стойкость к высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 18. «Климатические испытания для обеспечения безопасности и защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов, конструкций и сложных технических систем в природных средах» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [10].

Основные виды испытаний на стойкость к высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии

В результате анализа литературных источников [1, 11–30] установлено, что существует три основных подхода к проведению испытаний жаропрочных сплавов на стойкость к СОК: испытания на специализированных стендах, имитирующих условия работы частей ГТД; испытания в печах и электрохимические испытания.

Стендовые установки для проведения коррозионных испытаний, как правило, состоят из горелок для сжигания газообразного или жидкого топлива, системы подачи топлива и воздуха, камеры сгорания и системы крепления образцов. Для имитации условий приморской эксплуатации в рабочий объем установки вводят морскую воду впрыскиванием в камеру сгорания; для создания благоприятных условий возникновения и развития коррозионных поражений в топливо вводят такие примеси, как сера и ванадий. Пример подобной установки, а также вид образцов после испытаний представлены на рис. 2 и 3 соответственно.



Рис. 2. Вид установки для проведения стендовых испытаний на стойкость к высокотемпературной коррозии [31]



Рис. 3. Вид образцов после проведения испытаний на стенде [31]

Как правило, условия проведения стендовых испытаний гораздо жестче реальных условий эксплуатации, поэтому при экстраполяции результатов таких испытаний требуется дополнительная оценка долговечности выбранного сплава применительно к конкретным рабочим условиям.

Преимуществом стендовых испытаний является наибольшее приближение к условиям эксплуатации по сравнению с другими видами испытаний, недостатком – высокая стоимость, длительность испытаний, а также отсутствие единых стандартов, позволяющих сопоставлять результаты, полученные на различных испытательных стендах. С точки зрения прогнозирования ресурса деталей с учетом возможной коррозии в процессе эксплуатации повсеместное использование такого вида испытаний приведет к значительному удорожанию стоимости разработки сплавов.



Рис. 4. Процесс испытаний образцов на стойкость к высокотемпературной коррозии в печи с воздушной атмосферой

Одним из самых распространенных способов оценки стойкости материалов и покрытий деталей ГТД к СОК являются испытания в печах (рис. 4). При таком виде испытаний на поверхность образцов, как правило, наносятся солевые отложения (осадок) требуемого состава и производится выдержка в муфельных электропечах при заданной температуре. Нанесение отложений, как правило, выполняется с использованием воздушного напыления; иногда при необходимости введения частиц золы наносится паста. Часто при проведении таких испытаний над поверхностью испытуемых образцов прокачивается необходимая смесь газов, как правило, содержащая SO_2 . Наиболее распространенная газовая среда – воздух. Температура испытаний может варьироваться от 650 до 950°C. В большинстве исследований [12, 13, 16, 17] используется состав Na_2SO_4+NaCl в различных пропорциях. Наиболее распространено соотношение 75% $Na_2SO_4+25%$ $NaCl$. Достаточно часто также применяется состав $Na_2SO_4+K_2SO_4$ [16, 17, 18], реже применяется Na_2SO_4 без дополнительных добавок. В качестве дополнительных составляющих может использоваться ванадий и продукты сгорания различных видов топлива [14, 19, 20, 23, 26]. Пример внешнего вида образцов после испытаний представлен на рис. 5. В большинстве случаев такой вид испытаний не требует наличия дорогостоящего оборудования и позволяет получить сравнительные данные по стойкости различных сплавов и покрытий к СОК в относительно короткие сроки. Данный вид испытаний не имитирует все условия, возникающие в процессе работы

двигателя (давление газового потока, напряжения и др.), а следовательно, не позволяет делать заключения о долговечности деталей.



Рис. 5. Вид образцов жаропрочного сплава после проведения испытаний в печи

В виду того, что СОК обычно происходит под слоем жидкого расплава солей, некоторыми исследователями предпринимались попытки провести электрохимические исследования коррозии такого вида. При применении этих методов образцы, как правило, подвергаются воздействию такой же среды, что и при испытаниях в печах, а экспериментальная установка представляет собой электрохимическую ячейку, в состав которой входят электролит из расплава соли, эталонный электрод и рабочий электрод [32]. Так, в работе [19] применен ряд электрохимических измерений, таких как электрохимический шум, электрохимическая импедансная спектроскопия (ЭИС), потенциодинамическая поляризация. Показано, что результаты электрохимических исследований коррозии жаропрочного сплава Inconel 740 при температурах 700–800°C сопоставимы с результатами измерения массы и позволяют более полно исследовать стадии высокотемпературной коррозии.

Критерии оценки коррозионной стойкости жаропрочных сплавов

Степень деградации материала при высокотемпературной коррозии может оцениваться разными способами, однако чаще всего используют определение потери массы образцов и измерение глубины проникновения коррозии. В исследованиях [22, 28, 30] в качестве критерия оценки стойкости жаропрочных сплавов к СОК в основном используется изменение массы образцов. Для более полного описания коррозионных процессов используются оптическая металлография, сканирующая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ и рентгеноструктурный анализ. Некоторыми авторами [16, 18, 23, 27] при исследовании процессов СОК жаропрочных сплавов используется статистическая обработка результатов оценки глубины коррозионных повреждений.

Влияние сульфидно-оксидной коррозии на прочностные характеристики жаропрочных сплавов

Часть публикуемых работ посвящена исследованию влияния СОК на прочностные характеристики (высокотемпературную ползучесть, малоцикловую усталость) жаропрочных сплавов. Как правило, СОК приводит к существенному снижению прочности, что обусловлено образованием локальных коррозионных поражений, которые являются концентраторами напряжений.

В статье [24] рассмотрено влияние солевых расплавов двух пропорций (75% Na_2SO_4 +25% NaCl и 90% Na_2SO_4 +10% NaCl) на высокотемпературную ползучесть жаропрочного сплава Nimonic-263 при температурах 800 и 850°C. При температуре

850°C наблюдалось снижение времени до разрушения образцов до 40,4%, а при 800°C – до 22,6% в сравнении с исходным состоянием. Существенного влияния пропорций солевого расплава на время до разрушения не обнаружено. Показано, что при непродолжительных испытаниях время до разрушения образцов с солевым расплавом на поверхности и в исходном состоянии практически одинаково, в то время как при длительных испытаниях СОК существенно ускоряет процессы разрушения. В работе [26] рассмотрено влияние солевого расплава состава 30% Na_2SO_4 +10% NaVO_3 + NaCl и уровня нагрузки на высокотемпературную ползучесть сплава марки 617 при температуре 850°C. При высоких механических нагрузках (125 МПа) время до разрушения образцов с расплавом солей и без различается незначительно, при меньших нагрузках (85–105 МПа) наблюдается существенное уменьшение времени до разрушения образцов, подвергающихся коррозионному воздействию. Показано, что длительное приложение механической нагрузки не меняет механизмов СОК, но усиливает межкристаллитную коррозию вследствие раскрытия трещин.

В публикации [12] оценено влияние двух типов солевых расплавов (75% Na_2SO_4 +25% NaCl и 90% Na_2SO_4 +5% NaCl +5% V_2O_5) на малоцикловую усталость жаропрочного сплава IN 718 при 650°C. Для всего диапазона амплитуд деформаций – от $\pm 0,4$ до $\pm 1,0\%$ – обнаружено уменьшение стойкости к усталостному разрушению до 16,5% в сравнении с исходным состоянием. Показано, что большая часть усталостных трещин зарождалась в основании питтингов, образовавшихся под действием высокотемпературной коррозии. В исследовании [21] рассмотрено влияние солевого расплава состава 90% Na_2SO_4 +10% NaCl на малоцикловую усталость никелевого жаропрочного сплава марки SU 263 при 800°C. Для всего диапазона амплитуд деформаций $\Delta\varepsilon_r/2$ – от $4,0 \cdot 10^{-3}$ до $1,0 \cdot 10^{-2}\%$ – обнаружено уменьшение стойкости к усталостному разрушению от 43,8 до 87,5% в сравнении с исходным состоянием. Ввиду высокой температуры испытаний коррозия II рода не развивалась (на образцах питтинги не обнаружены), но расплав солей разрушил защитный слой оксида хрома и вызвал окисление границ зерен, что привело к изменению деформативных свойств сплава.

Авторами работы [25] рассмотрено влияние солевого расплава состава 75% Na_2SO_4 +25% NaCl на малоцикловую усталость никелевого жаропрочного сплава марки DZ125 при 850°C. Для всего диапазона нагрузок (от 640 до 760 МПа) обнаружено уменьшение количества циклов до разрушения по сравнению с исходными образцами. Показано, что большие нагрузки приводят к более существенному уменьшению времени до разрушения образцов, покрытых расплавами солей. В статье [20] рассмотрено влияние двух типов высокотемпературной коррозии солевых расплавов на малоцикловую усталость жаропрочного сплава Nimonic-263. Коррозию I рода инициировали нанесением расплава состава 90% Na_2SO_4 +10% NaCl при температуре 800°C, а II рода – нанесением расплава состава 88% Na_2SO_4 +7% NaCl +5% NaVO_3 при температуре 700°C. Испытания проведены в диапазоне амплитуд деформаций $\Delta\varepsilon_r/2$ – от 0,4 до 1,0%.

Показано различие в механизмах усталостного разрушения при разных типах коррозии: для коррозии I рода характерно распространение межкристаллитных трещин, что приводит к уменьшению количества циклов до разрушения в интервале от 43,8 до 66,9%, в то время как для коррозии II рода характерно образование трансгранулярных трещин, что приводит к уменьшению количества циклов до разрушения в интервале от 18,4 до 44,1% в сравнении с исходным состоянием.

Обсуждение и заключения

Наиболее широко используемым способом оценки стойкости жаропрочных сплавов к СОК является метод испытания в печах. В качестве агрессивной (коррозионной) среды при таком виде испытаний в большинстве работ используют смесь солей Na_2SO_4 + NaCl .

Оценку стойкости сплавов к СОК в основном проводят путем измерения массы и глубины поврежденного слоя образцов. Для вероятностной оценки возникновения коррозионных поражений заданного уровня используются статистические методы. Проводятся также исследования по оценке влияния коррозионных повреждений на прочностные характеристики (малоцикловую усталость, высокотемпературную ползучесть) и совместного влияния коррозионной среды и термомеханических нагрузок на прочностные характеристики.

Расчетно-экспериментальные методики оценки коррозионного ресурса жаропрочных сплавов, используемых для изготовления деталей ГТД, отсутствуют как в Российской Федерации, так и за рубежом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sidhu T.S., Agrawal R.D., Prakash S. Hot corrosion of some superalloys and role of high-velocity oxy-fuel spray coatings – a review // *Surface and coating technology*. 2005. Vol. 198. Is. 1–3. P. 441–446.
2. Космин А.А., Будиновский С.А., Матвеев П.В., Смирнов А.А. Исследование жаропрочного сплава ЖС36 с различными типами ионно-плазменных защитных покрытий на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии в области температур 850–900°C // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №12. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.08.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-5-5.
3. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Луцкая С.А. Методы повышения коррозионной стойкости жаропрочных никелевых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2018. №4. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.08.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-3-8.
4. Космин А.А., Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Жаро- и коррозионностойкое покрытие для рабочих лопаток турбины из перспективного жаропрочного сплава ВЖЛ21 // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №1 (46). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-17-24.
5. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // *Конверсия в машиностроении*. 1999. №2. С. 42–47.
6. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение, 2008. Т. 2: Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства. 367 с.
7. Братухин А.Г., Решетников Ю.Е., Иноземцев А.А. и др. Основы технологии создания газотурбинных двигателей для магистральных самолетов. М.: Авиатехинформ, 1999. 553 с.
8. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // *Автоматическая сварка*. 2013. №10. С. 23–32.
9. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
10. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
11. Nicholls J.R., Saunders S.R.J. Comparison of hot-salt corrosion behaviour of superalloys in high and low velocity burner rigs // *High Temperature Technology*. 1989. Vol. 7. Is. 4. P. 193–201. DOI: 10.1080/02619180.1989.11753437.
12. Mahobia G.S., Paulose N., Mannan S.L. et al. Effect of hot corrosion on low cycle fatigue behavior of superalloy IN718 // *International Journal of Fatigue*. 2014. Vol. 59. P. 272–281. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.08.009.
13. Mannava V., Rao A.S., Paulose N. et al. Hot corrosion studies on Ni-base superalloy at 650°C under marine-like environment conditions using three salt mixture (Na₂SO₄+NaCl+NaVO₃) // *Corrosion Science*. 2016. Vol. 105. P. 109–119. DOI: 10.1016/j.corsci.2016.01.008.

14. Zhao S., Xie X., Smith G.D., Patel S.J. Research and Improvement on structure stability and corrosion resistance of nickel-base superalloy INCONEL alloy 740 // *Materials and Design*. 2006. Vol. 27. P. 1120–1127. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.03.015.
15. Lortrakul P., Trice R.W., Trumble K.P., Dayananda M.A. Investigation of the mechanisms of Type-II hot corrosion of superalloy CMSX-4 // *Corrosion Science*. 2014. Vol. 80. P. 408–415. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.11.048.
16. Sumner J., Encinas-Oropesa A., Simms N.J., Nicholls J.R. Type II hot corrosion: Kinetics studies of CMSX-4 // *Oxidation of Metals*. 2013. Vol. 80. Is. 5–6. P. 553–563. DOI: 10.1007/s11085-013-9395-x.
17. Sumner J., Encinas-Oropesa A., Simms N.J., Nicholls J.R. Type II hot corrosion: Behavior of CMSX-4 and IN738LC as a function of corrosion environment // *Materials and Corrosion*. 2014. Vol. 65. P. 188–196. DOI: 10.1002/maco.201307425.
18. Nicholls J.R., Simms N.J., Encinas-Oropesa A. Modelling hot corrosion in industrial gas turbines // *Materials at High Temperatures*. 2007. Vol. 24. Is. 3. P. 149–162. DOI: 10.3184/096034007X263587.
19. Aung N.N., Liu X. Effect of temperature on coal ash hot corrosion resistance of Inconel 740 superalloy // *Corrosion Science*. 2014. Vol. 82. P. 227–238. DOI: 10.1016/j.corsci.2014.01.020.
20. Sahu J.K., Ravi Kumar B., Das S.K. et al. Isothermal high temperature low cycle fatigue behavior of Nimonic-263: Influence of type I and type II hot corrosion // *Materials Science and Engineering A*. 2015. Vol. 622. P. 131–138. DOI: 10.1016/j.msea.2014.11.016.
21. Sahu J.K., Gupta R.K., Swaminathan J. et al. Influence of hot corrosion on low cycle fatigue behavior of nickel base superalloy SU 263 // *International Journal of Fatigue*. 2013. Vol. 51. P. 68–73. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.02.006.
22. El-Awadi G.A., Abdel-Samad S., Elshazly E.S. Hot corrosion behavior of Ni based Inconel 617 and Inconel 738 superalloys // *Applied surface science*. 2016. Vol. 378. P. 224–230. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.03.181.
23. Sumner J., Potter A., Simms N.J., Oakey J.E. Hot corrosion resistance of gas turbine materials in combusted syngas environments // *Materials at High Temperatures*. 2015. Vol. 32. Is. 1–2. P. 177–187. DOI: 10.1179/0960340914Z.00000000098.
24. Bagui S., Ray A.K., Sahu J.K. et al. Influence of saline environment on creep rupture life of Nimonic-263 for marine turbine application // *Materials Science and Engineering A*. 2013. Vol. 566. P. 54–60. DOI: 10.1016/j.msea.2012.12.081.
25. Yang X., Li S., Qi H. Effect of high-temperature hot corrosion on the low cycle fatigue behavior of a directionally solidified nickel-base superalloy // *International journal of fatigue*. 2015. Vol. 70. P. 106–113. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.08.011.
26. Homaeian A., Alizadeh M. Interaction of hot corrosion and creep in Alloy 617 // *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 66. P. 373–384. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.03.012.
27. Simms N.J., Encinas-Oropesa A., Nicholls J.R. Modelling the Development of Type I Hot Corrosion on Coated and Uncoated Single Crystal Superalloys // *Materials Science Forum*. 2008. Vol. 595–598. P. 689–698. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.595-598.689.
28. Liu E., Zheng Z., Guan X. et al. Influence of Pre-oxidation on the Hot Corrosion of DZ68 Superalloy in the Mixture of Na₂SO₄-NaCl // *Journal of Materials Science and Technology*. 2010. Vol. 26. Is. 10. P. 895–899. DOI: 10.1016/S1005-0302(10)60143-0.
29. Zhang K., Liu M.M., Liu S.L. et al. Hot corrosion behaviour of a cobalt-base super-alloy K40S with and without NiCrAlYSi coating // *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. Is. 5. P. 1990–1998. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.02.022.
30. Chang J.X., Wang D., Zhang G. et al. Interaction of Ta and Cr on Type-I hot corrosion resistance of single crystal Ni-base superalloys // *Corrosion Science*. 2017. Vol. 117. P. 35–42. DOI: 10.1016/j.corsci.2017.01.011.
31. Dever J.A., Nathal M.V., DiCarlo J.A. Research on High-Temperature Aerospace Materials at NASA Glenn Research Center // *Journal of Aerospace*. 2013. Vol. 26. Is. 2. P. 500–514. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000321.
32. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок в 2 кн. / под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля; пер. с англ. М.: Металлургия, 1995. Кн. 1. 384 с.