

W 142  $\frac{9}{111}$   
**Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок** / Под ред. Симса Ч.Т., Столоффа Н.С., Хагеля У.К.: Пер. с англ. В 2-х книгах. Кн. 1 / Под ред. Шалина Р.Е.— М.: Металлургия, 1995.— 384с.

Представлены сведения о природе, технологии и особенностях производства и применения металлических жаропрочных сплавов (суперсплавов на основе Ni, Co, Fe, а также— впервые— Nb и Mo) и других высокотемпературных конструкционных материалов. Рассмотрены такие вопросы, как использование оксидного дисперсного упрочнения в комбинации с механическим легированием, применение быстрой кристаллизации и др. Изложены современные фундаментальные металлофизические и физико-химические представления о природе связи структуры и состава с поведением материалов в разных температурно-силовых режимах работы, в том числе в агрессивных средах. Рассмотрены материалы, полученные направленной кристаллизацией, и монокристаллические, лишь недавно получившие применение в реальных двигателях.

В первой книге приведены общие сведения о суперсплавах, основные системы, фазовый состав и механические свойства сплавов.

Для научных и инженерно-технических работников в области металловедения— исследователей, разработчиков, эксплуатационников, а также аспирантов и студентов старших курсов вузов, специализирующихся в области металловедения и технологии жаропрочных сплавов. Ил. 142. Табл. 24. Библиограф. список: 415 назв.

Издание выпущено в счет дотации,  
 выделенной Комитетом РФ по печати

96-814/17  
 ЦЕНТРАЛЬНАЯ  
 ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ  
 БИБЛИОТЕКА

С 260800000-025 без объявления  
 040(01)—95

ISBN 5-229-00781-8 (рус., общ.)

ISBN 5-229-00 (рус., кн. 1)

ISBN 0-471-01147-9 (англ.)

© 1987 by John Wiley and Sons, Inc.  
 © Перевод на русский язык, "Металлургия", 1995

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию . . . . .	9
Предисловие . . . . .	12
Введение . . . . .	14
<b>Часть 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ</b> . . . . .	<b>16</b>
<b>Глава 1. Суперсплавы. Происхождение и природа. Ч.Т.Симс</b> . . . . .	<b>16</b>
1.1. Истоки и применение . . . . .	17
1.2. Развитие технологии . . . . .	22
1.3. Работа над свойствами . . . . .	30
1.4. Развитие методов обработки . . . . .	39
1.5. Неудачные решения . . . . .	46
<b>Глава 2. Конструкция газовой турбины и суперсплавы. Г.Е.Миллер, В.Л.Чемберс</b> . . . . .	<b>49</b>
2.1. Тепловые двигатели. Обоснование к развитию суперсплавов . . . . .	49
2.2. Детали и рабочая среда газовых турбин . . . . .	54
2.3. Модели поведения материалов . . . . .	63
2.4. Многоосные напряженные состояния и анизотропия . . . . .	78
2.5. Поведение материала в статистическом представлении . . . . .	81
<b>Часть 2. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ СПЛАВОВ</b> . . . . .	<b>83</b>
<b>Глава 3. Природа упрочнения. Н.С.Столофф</b> . . . . .	<b>83</b>
3.1. Факторы, контролирующие поведение сплавов в условиях растяжения . . . . .	84
3.2. Дисперсионное твердение (старение) сплавов на никелевой основе . . . . .	89
3.3. Дисперсноупрочняемые сплавы . . . . .	106
3.4. Критическая оценка моделей . . . . .	107
3.5. Дисперсионное твердение (старение) сплавов на основе Co . . . . .	115
3.6. Механизмы ползучести . . . . .	116
3.7. Механизмы упрочнения и проектирования сплавов . . . . .	121
<b>Глава 4. Сплавы на основе никеля. И.В.Росс, Ч.Т.Симс</b> . . . . .	<b>128</b>
4.1. Химический состав . . . . .	128
4.2. Кристаллическая решетка и микроструктура . . . . .	131
4.3. Внутризеренные и зернограницные явления . . . . .	157
4.4. Гафний . . . . .	160
4.5. Термическая обработка . . . . .	162
4.6. Направленная кристаллизация литейных сплавов на никелевой основе . . . . .	171
4.7. Разработка высокопрочных сплавов. Выводы . . . . .	172
<b>Глава 5. Сплавы на основе кобальта. А.Л.Белтран</b> . . . . .	<b>174</b>
5.1. Химический состав . . . . .	175
5.2. Фазовый состав сплавов . . . . .	180
5.3. Фазы г.п.у . . . . .	191
5.4. Фазы т.п.у . . . . .	193
5.5. Микроструктура и термическая обработка сплавов . . . . .	195

5.6. Механические свойства и механизмы упрочнения	204
---	-----

Глава 6. Сплавы на железоникелевой основе. Е.Е.Браун, Д.Р.Музыка	210
--	-----

6.1. Ретроспектива	211
6.2. Сплавы и их классификация	212
6.3. Фазовый состав, структура и фазовые соотношения	214
6.4. Физическое металловедение	218
6.5. Влияние процессов обработки на свойства и микроструктуру	233
6.6. Недавние и будущие разработки	238

Глава 7. Суперсплавы направленной кристаллизации. Д.Н.Даль	239
--	-----

7.1. Процесс направленной кристаллизации	241
7.2. Микроструктура	249
7.3. Термическая обработка	252
7.4. Проектирование сплавов	257
7.5. Механические свойства	263
7.6. Окисление и горячая коррозия	276
7.7. Направления для будущих разработок	276

### Часть 3. ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ

277

Глава 8. Поведение сплавов. Ч.Т.Симс	277
--------------------------------------	-----

8.1. Фазовые взаимодействия	277
8.2. Микроструктура т.п.у. фаз	279
8.3. Влияние т.п.у. фаз на механические свойства	283
8.4. Числа электронных дыр	288
8.5. Корреляция теории электронных дырок с фазовым составом сплавов	291
8.6. Расчеты фазового состава суперсплавов по числам электронных дырок с применением ЭВМ (программы ФАКОМП)	292
8.7. Применение программы ФАКОМП в производственной практике	299
8.8. Проблемы при расчетах фазового состава	300
8.9. Расчеты фазового состава	304

Глава 9. Механическое поведение. С.Флорин	308
---	-----

9.1. Свойства суперсплавов при невысоких температурах	309
9.2. Свойства суперсплавов при промежуточных температурах	318
9.3. Свойства суперсплавов при высоких температурах	328

Глава 10. Усталость. Р.В.Майнер	336
---------------------------------	-----

10.1. Циклическое деформирование	336
10.2. Возникновение трещины	347
10.3. Распространение трещины	361
10.4. Работа для будущего	371

### Часть 4. СТОЙКОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

Глава 11. Высокотемпературное окисление. Дж.Л.Смиалек, Дж.Х.Мейлер	
--	--

11.1. Основные принципы окисления сплавов	
---	--

11.2. Окисление сплавов системы М-Сг (образующих соединения $Cr_2O_3$ )	
11.3. Системы, формирующие соединения $Al_2O_3$ . Сплавы — покрытия	
11.4. Влияние других общепринятых легирующих элементов	
11.5. Сложные суперсплавы на никелевой основе	

Глава 12. Горячая коррозия. Ф.С.Петтит, К.С.Джиггинс	
--	--

12.1. Влияние условий работы и испытания	
12.2. Кинетика деградации материала при горячей коррозии	
12.3. Начальная стадия горячей коррозии	
12.4. Механизмы развития горячей коррозии	
12.5. Эффекты, связанные с влиянием на горячую коррозию различных химических элементов	
12.6. Стойкость к разъеданию при горячей коррозии некоторых суперсплавов	
12.7. Перспективы создания суперсплавов с повышенной стойкостью к горячей коррозии	

Глава 13. Защитные покрытия. Дж.Х.Вуд, Эд.Х.Голдман	
---	--

13.1. Методы нанесения покрытий	
13.2. Оценка покрытий	
13.3. Рабочие характеристики покрытий	
13.4. Теплозащитные барьерные покрытия	

### Часть 5. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 14. Выплавка и рафинирование. Л.В.Лербе	
---	--

14.1. Основные предпосылки	
14.2. Основные процессы выплавки	
14.3. Процессы переплава и рафинирования	
14.4. Тенденции сегодня и в будущем	

Глава 15. Прецизионное литье. В.Р.Фримен	
--	--

15.1. Основные процессы	
15.2. Модели	
15.3. Керамические стержни	
15.4. Системы оболочковых изложниц	
15.5. Конструктивные особенности литейного процесса	
15.6. Процесс литья	

Глава 16. Деформируемые сплавы. В.Г.Коугс, Т.Е.Хаусон	
---	--

16.1. Современные процессы промышленной металлообработки	
16.2. Понятие о переменных параметрах процесса обработки	
16.3. В ближайшем десятилетии	

Глава 17. Порошковая металлургия. С.Ричман, Д.С.Чанг	
--	--

17.1. Методы получения порошков	
17.2. Методы консолидации	
17.3. Термомеханическая обработка	
17.4. Механические свойства	

17.5. Перспективы порошковой металлургии . . . . .

Глава 18. Соединение деталей. В.Енискавич . . . . .

- 18.1. Преимущества сварки . . . . .
- 18.2. Проблемы, связанные со сваркой . . . . .
- 18.3. Сварочные процессы . . . . .
- 18.4. Автоматизация сварки . . . . .
- 18.5. Описание сварных соединений . . . . .
- 18.6. Кратковременный термический цикл . . . . .
- 18.7. Измерение трещиностойкости . . . . .
- 18.8. Испытания на горячую пластичность . . . . .
- 18.9. Влияние малых примесей и добавок . . . . .
- 18.10. Сплавы, упрочняемые выделениями  $\gamma'$ -фазы . . . . .

Глава 19. Альтернативные материалы. Н.С.Столофф, Ч.Т.Симс . . . . .

- 19.1. Интерметаллические соединения . . . . .
- 19.2. Композиционные материалы . . . . .
- 19.3. Тугоплавкие металлы . . . . .
- 19.4. Керамические материалы . . . . .

Глава 20. Будущее суперсплавов. Дж.Х.Хоппин III, Ч.П.Дейнези . . . . .

- 20.1. Разработка сплавов . . . . .
- 20.2. Сверхчистые металлы . . . . .
- 20.3. Легирующие микроэлементы и следы примесей . . . . .
- 20.4. Кобальт в суперсплавах . . . . .
- 20.5. Сплавы на основе Co . . . . .
- 20.6. Дисперсионноупрочняемые оксидами сплавы . . . . .
- 20.7. Покрyтия и разработка сплавов для покрытий . . . . .
- 20.8. Разработка технологических процессов . . . . .
- 20.9. Конкурирующие системы материалов . . . . .
- Приложение А. Фазовые диаграммы. Р.Л.Дрешфилд, Т.П.Гэбб . . . . .
- Приложение Б. Свойства суперсплавов. Т.П.Гэбб, Р.Л.Дрешфилд . . . . .
- Библиографический список . . . . .

## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Перед нами второе издание книги "Суперсплавы" под редакцией известных американских ученых Р.Симса, Н.Столоффа и У.Хагеля (после первого прошло более 15 лет). Целое поколение инженеров и научных работников пользовалось этой книгой, которая по широте охвата проблемы создания высокотемпературных материалов может быть сравнима лишь с широкоизвестным классическим трудом Э.Гудремона "Специальные стали".

Книга является переработанным и дополненным изданием, включившим в себя информацию о достижениях в области теории и практики жаропрочных сплавов вплоть до 1985г.

В конце книги "Суперсплавы" первого издания<sup>1</sup> авторы останавливались на перспективах развития жаропрочных материалов, прогнозируя пути их развития. Хотелось бы с позиций сегодняшнего дня, т.е. оказавшись в будущем по отношению уже не только к первому, но и ко второму изданию книги, так как, к сожалению, выпуск русского второго издания книги задерживается на 7–8 лет по сравнению со временем выхода книги "Суперсплавы" в США, рассмотреть, какие из прогнозов автора реализованы, а какие не удалось реализовать, какие направления оказались перспективными, а какие не выдержали испытания временем.

Критическая проблема газотурбинных двигателей— создание рабочей охлаждаемой лопатки, работающей в условиях наиболее жесткого воздействия температуры, циклических и термоциклических напряжений, активной коррозионной и окислительной среды, решается за счет изготовления лопаток из суперсплавов с направленной и монокристаллической структурами, а также специальными видами защитных покрытий. Применение технологии монокристаллического литья и разработка специально легированных монокристаллических сплавов позволили повысить рабочую температуру на металле лопаток на 80–120 °С по сравнению с лопатками из сплавов с равноосной структурой. Температура газа перед рабочей

<sup>1</sup>В русском переводе под названием "Жаропрочные сплавы" (авторы Ч.Т.Симс и У.Хагель) выпущена в 1976 г. издательством "Металлургия" под редакцией Е.М.Савицкого. *Прим. ред. изд-ва.*

лопаткой первой ступени на современных двигателях достигает 1700–1800 °С.

Состоялся прогноз и по использованию рения в качестве наиболее эффективного легирующего элемента в жаропрочных сплавах. Разработан ряд литейных жаропрочных сплавов для монокристаллического литья (CMSX-2, ЖС-32), которые по температурному уровню работоспособности приближаются к эвтектическим жаропрочным сплавам.

Эвтектические сплавы пока не нашли практического использования главным образом из-за экономических соображений. Однако можно ожидать, что в связи в общей тенденции повышения рабочих температур материала лопаток именно эти суперсплавы могут оказаться единственно пригодными для создания охлаждаемых лопаток ГТД. Тем более, что в настоящее время разработаны композиции эвтектических жаропрочных сплавов с высоким уровнем жаропрочности вплоть до 1200 °С.

Эффективным оказался путь использования комплексных защитных покрытий, включающих нанесение керамических теплозащитных слоев. Применение такого рода покрытий снижает рабочую температуру металла лопаток на 40–80 °С, защищая поверхность металла лопаток от воздействия коррозионной и окислительной среды.

Разработка жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов  $TiAl$ ,  $Ti_3Al$  и  $NiAl$ ,  $Ni_3Al$  остается одним из перспективных направлений, не реализованным в полной мере. Однако следует отметить, что созданы отечественные жаропрочные деформированные и литейные сплавы на базе легированного интерметаллида  $Ni_3Al$ , которые обладают высокими характеристиками сопротивления окислению и в настоящее время нашли применение для деталей соплового аппарата двигателей, работающих при высоких температурах без защитного покрытия.

К перспективным следует отнести и композиционные жаропрочные материалы на основе керамики, а также "углерод-углеродные" композиты. Реализация этих материалов в конструкции деталей ГТД требует разработки надежных способов защиты от окисления и специального проектирования лопаток, учитывающих резко выраженную анизотропию свойств этих материалов.

Таким образом, основными материалами для лопаток ГТД в

настоящее время остаются монокристаллические сплавы на основе никеля. Ресурс монокристаллических лопаток может быть повышен за счет пространственного ориентирования их кристаллической структуры по отношению к действующим термическим напряжениям, а также повышением эффективности системы охлаждения лопаток.

Важнейшую роль в формировании высокого комплекса механических свойств жаропрочных сплавов наряду с легированием играет структурный фактор. Это особенно важно при изготовлении крупногабаритных деталей ГТД, к которым следует в первую очередь отнести диски турбины. Применение специальных методов выплавки и изотермического прессования позволяет в значительной степени уменьшить ликвационную неоднородность высоколегированных жаропрочных сплавов и обеспечить однородную мелкозернистую структуру по всему объему дисков, малочувствительную к концентраторам напряжений.

Эти технологические приемы позволяют получать больше-размерные диски из сверхпрочных сплавов диаметром более одного метра. Существенный прогресс достигнут при изготовлении дисков методом порошковой металлургии, применение которых расширяется в двигателестроении.

Перечисленные выше материаловедческие проблемы были успешно решены с использованием металлургических методов выплавки, обеспечивающих глубокую рафинировку металла по вредным примесям. К эффективным способам металлургического воздействия, успешно развиваемым в России, следует отнести термовременную обработку расплавов при определенных критических температурах, приводящих к их рафинированию и гомогенизации и, как следствие, повышению комплекса служебных характеристик и качества отливок.

Совпадение прогноза развития жаропрочных сплавов, изложенного авторами, с современным состоянием повышает ее ценность. По полноте изложения металлургических и практических вопросов, связанных с разработкой термически стабильных жаропрочных сплавов, технологии изготовления деталей ГТД из них, представленным фактическим свойствам различных материалов книга Ч.Симса, Н.Столоффа и У.Хагеля "Суперсплавы II" является наиболее полным систематическим изданием, имеющим энциклопедический характер.

Академик *Р.Е.Шалин*

Первые успешные полеты самолетов на ракетной тяге осуществлены (во время второй мировой войны Германией и Великобританией) с помощью двигателей, имеющих относительно скромные характеристики. Уровень последних был ограничен свойствами материалов, использованных для изготовления этих двигателей. При совершенствовании реактивных двигателей постоянно приходилось на них ориентироваться. Однако анализ прогресса в разработке материалов, начиная с 1942 г., указывает на ряд значительных улучшений свойств, позволивших постоянно увеличивать температуру и рабочее напряжение. Этим улучшений достигали как путем усовершенствования процессов производства, так и путем изменений в химическом составе материалов, а часто и совмещением обоих путей. В результате тяга в 363 кг, полученная на двигателе Уитллы в 1942 г., возросла за 40 с небольшим лет до 29483,5 кг, т.е. в 80 раз.

Вначале в качестве ведущих материалов для изготовления лопаток выступали сплавы на основе Co, тогда как сплавы на основе Fe использовали там, где требовались материалы, не подвергающиеся воздействию высоких температур, например для изготовления дисков. В результате постепенного улучшения обычной практики эксплуатации двигателей такие деформируемые сплавы, как S-816, уступили дорогу грубозернистому точному литью из сплавов на кобальтовой основе. Вслед за этим в промышленности научились регулировать размер зерна и структуру, разработчики поняли, как предотвратить нежелательную потерю пластичности, и рабочие температуры возросли до 815 °C. С той поры и поныне точное литье при изготовлении деталей из суперсплавов непрерывно играет ведущую роль.

Параллельно шло развитие систем на никелевой основе, очень важных, многоцелевых и в настоящее время наиболее употребительных сплавов, упрочняемых выделениями  $\gamma'$ -фазы в  $\gamma$ -матрице. При этом пришлось разработать технологию с применением вакуумной металлургии, чтобы путем регулирования концентрации примесей можно было обеспечить достаточную прочность "высоколегированным" композициям. Затем еще больших концентраций легирующих элементов как средства дальнейшего повышения запасов прочности и температуры достигли созданием особых способов переплава, из которых вакуумно-дуговой переплав не является самым выдающимся.

Для этих достижений потребовались независимые усилия со стороны исследовательских групп и групп разработчиков, которые продемонстрировали и оценили роль состава и структуры сплавов, реализовали преимущества чистоты, ранее считавшейся недостижимой, создали усовершенствованные методы для новых изменений состава и структуры, обеспечивающих решение конкретных проблем. В конечном счете это привело к таким удивительным разработкам, как направленно закристиллизованные и монокристаллические лопатки, из которых последние лишь совсем недавно нашли применение в реальных двигателях.

На протяжении всего периода времени, потраченного на упомянутые разработки, металлурги, разработчики и производственники сознавали, что в конечном счете сплавы на никелевой и кобальтовой основах придется заменить системами с более высокой температурой плавления, т.е. на основе тугоплавких металлов. Подобное мнение неудивительно, если помнить о тенденции к снижению температуры плавления сплавов как следствии роста степени легирования, да еще в условиях, когда сплавы используются при температурах, составляющих все большую долю от их собственной температуры плавления! Основные попытки сначала были предприняты в отношении сплавов Mo и Nb. Они не принесли успеха применительно к заданным для этих сплавов рабочим температурам и долговечностям, однако сохранили надежду на благоприятные результаты при температурах несколько выше 1100 °C при условии, что будут найдены подходящие

защитные покрытия. В дальнейшем достигли превосходных значений прочности и разработали ряд перспективных покрытий, но не смогли реализовать ожидаемого уровня долговечности. Позднее в качестве наиболее подходящих по своей природе рассматривали сплавы на основе Cr, которые в конечном счете тоже не принесли успеха из-за чрезмерно высокой хрупкости.

Следует также упомянуть ранние эксперименты с керамикометаллическими материалами и серию разработок этого "керамического" периода, начиная с 1950 г. И те, и другие привели к созданию интересных монокристаллических конструкций. Однако на практике ни одна из приемлемых конструкций этого рода не могла конкурировать с суперсплавом, аустенитные суперсплавы сохраняли свое превосходство.

В связи с появлением технологических процессов, включающих быструю кристаллизацию, стали разрабатывать и исследовать сплавы еще более сложные, используя при этом новые возможности еще более точного контроля и регулирования сегрегации примесей, управления по выбору структурой той или иной фазы. Более того, создание сверхтонкого зерна и структур методами порошковой металлургии обеспечивает легкость достижения и использования сверхпластичности. Стандартно линейные сплавы типа IN-100 и MAR-M 509 изготавливают очень прочными при низких и промежуточных температурах и в то же время легко приобретающими сложные формы, включая почти окончательные формы рабочей детали. Кто мог бы предвидеть в 1960-х гг., что такой литейный сплав, как In-100, можно будет сделать сверхпластичным и использовать в качестве материала для дисков, работающих при 650—700 °C? Можно полагать, что создание структур, обеспечивающих сверхпластичность, окажет решающее влияние на технологию производства и обработки суперсплавов.

Наконец мы можем наблюдать начало довольно широкого применения сплавов, упрочняемых дисперсными частицами оксидов; для производства этих сплавов используют также комплекс методов легирования и обработки, созданных за прошедшие годы. Механическое легирование (с использованием тонкодисперсных полностью легированных порошков) и быстрая кристаллизация позволят применять сплавы на основе Ni и Co, упрочненные дисперсными оксидными частицами, при температурах, не превышающих 1100 °C.

Применять сплавы, плавящиеся ниже 1400 °C, при 1100 °C и выше, т.е. при температуре, превышающей 80% абсолютной температуры плавления сплава? Да, это время наступило. Используя композитные материалы с металлической матрицей, можно достичь и большей доли температуры плавления.

Таким образом, чрезвычайно активная взаимосвязь процессов легирования, химического состава и структуры в совокупности с превосходным научным обеспечением в виде изучения структуры, свойств и стабильности создали для суперсплавов такое положение в машиностроении, которое даже не снилось их первым исследователям и разработчикам!

Настоящая книга играет очень важную роль для использования и постоянного развития этих успехов в промышленности, особенно когда над сплавами и материалами-заменителями думают и работают, но еще не производят их для реального применения. Труды, вошедшие в настоящую книгу, и должны обеспечить модель для ряда этих новых материалов, изучаемых для того, чтобы с их помощью заменить или превзойти суперсплавы.

Профессор материало- и машиноведения  
в Массачусетском технологическом институте

*Николас Дж. Грант*

За прошедшие годы было предложено много определений термина суперсплавы. По нашему мнению, это сплавы, имеющие в основе элементы VIII группы, разработанные для эксплуатации при повышенных температурах и проявляющие в совокупности достаточную механическую прочность и устойчивость поверхности. Прогресс в развитии суперсплавов сделал возможным создание современных реактивных двигателей со все более высоким отношением развиваемой тяги к собственной массе двигателя. Суперсплавы играют жизненно важную роль в промышленных газовых турбинах, углереперерабатывающих и других установках, в которых действуют высокие температуры и сильно агрессивные среды.

Книга "Суперсплавы", опубликованная в 1972 г., была первой исчерпывающей монографией по данному предмету. К двадцати главам, представленным двадцатью восемью специалистами, была приложена подборка фазовых диаграмм и сведений о механических свойствах и химическом составе многих промышленных суперсплавов. Несколько лет назад стало ясно, что требуется переработка, настолько интенсивным оказался прогресс в области выплавки, легирования и способов обработки. В последние годы опубликованы прекрасные работы, но ни одна из них не дала столь полного изложения предмета, как "Суперсплавы".

По этой причине в начале 1985 г. редакторы решили подготовить новую книгу примерно того же объема, но с акцентом на новые разработки — увеличение роли порошковой металлургии, решительный переход на направленно закристиллизованные и монокристаллические суперсплавы и т.д. Хотя многие главы были полностью переписаны (а некоторые вообще написаны другими авторами), есть главы, содержание которых просто интенсивно обновлено (например, "Природа упрочнения", "Сплавы на основе никеля") или оставлено почти неизменным (например, глава о сварке). Поскольку современные суперсплавы работают при температурах, приближающихся к уровню 90% их абсолютной температуры плавления, возможности дальнейшего совершенствования газовых турбин ожидают от новых материалов: керамики, тугоплавких металлов (ниобия), композитов, интерметаллических соеди-

нений. Поэтому в новую книгу включена глава, посвященная материалам, которые должны прийти на смену суперсплавам. С другой стороны, из книги исключены главы, посвященные обработке резанием и сплавам на основе хрома. К услугам материаловедов-разработчиков и для полноты картины в книгу введена также новая глава о проектировании суперсплавов.

Как и в предыдущем издании, в каждой главе поставлено целью дать и научные, и технические основы, необходимые для понимания рассматриваемых в ней проблем. Посвящение целой главы направленной кристаллизации или только деформируемым сплавам прямо свидетельствует, насколько быстро и постоянно происходит внедрение новых методов обработки.

Следует отметить, что хотя авторы данной книги все из США, она достаточно полно отражает результаты активного исследования, разработок и применения суперсплавов в Японии, странах Западной Европы и Советском Союзе. Примером активной работы в этой области, проводимой странами Европейского сообщества, могут служить программы COST 50 и COST 50I. Полагаем, что книга "Суперсплавы II" может быть использована в совокупности со сборниками трудов по суперсплавам таких регулярных конференций, как "Seven Springs Meetings" в США и изданий COST по материалам конференции в Бельгии. Это позволило бы полностью характеризовать положение суперсплавов и в промышленности, и в торговом обмене.

Для облегчения чтения текста его математическое обеспечение было сокращено до минимума. Можно верить, однако, что несмотря на это, авторам удалось сохранить особую полезность книги как учебного пособия для колледжей и ускоренных курсов по суперсплавам. В приложении Б приведен перечень официальных торговых марок сплавов.

Редакторы выражают особую признательность авторам, потратившим много времени и усилий на подготовку своих глав, а также на критические замечания по тексту, его проверке и предоставлении необходимой информации авторам книги.

Троя, Нью-Йорк  
Энн Арбор, Мичиган  
Октябрь 1986 г.

Честер Т.Силс  
Норман С.Столофф  
Уильям К.Хагелъ

## Часть 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### Глава 1. СУПЕРСПЛАВЫ, ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ПРИРОДА

Честер Т.Симс (*Chester T.Sims, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York*)

Суперсплавы представляют класс материалов, который трудно вместить в какие-либо строгие рамки. Однако определенное, принятое в кавге "Суперсплавы" [1] около 14 лет назад, оказалось вполне приемлемым: "Суперсплав— это сплав, как правило, на основе элементов VIII группы периодической системы, разработанный для эксплуатации при повышенной температуре под воздействием сравнительно высоких механических нагрузок в условиях, при которых от материала часто требуется высокая поверхностная стабильность".

Различают три основных класса суперсплавов в соответствии с их основой: никелевые, кобальтовые и суперсплавы на основе железа. Кроме того, выделяют важную подгруппу суперсплавов, содержащих в значительных количествах и никель, и железо и обладающих металлургическими характеристиками, аналогичными таковым у сплавов на основе вольфрама. Их называют железоникелевыми суперсплавами.

Из широкого набора металлургических материалов, поставляемых на рынок, суперсплавы эксплуатируют при температурах, наиболее близких к температуре плавления. Реализовать в очень большой мере возможности технологии высокотемпературного машиностроения удалось благодаря суперсплавам. Они работают "на переднем" крае газовых турбин, приводящих в движение реактивные самолеты. В свою очередь применение реактивных двигателей явилось главным стимулом для создания и применения суперсплавов. Однако помимо газовых турбин воздушного, морского, автомобильного транспорта и промышленного назначения суперсплавы находят применение в космических кораблях, ракетных двигателях, атомных реакторах, подводных лодках, паровых теплоцентралях и нефтехимическом оборудовании. Многие суперсплавы (возможно, 15–20 % из них) разработаны для использования в качестве коррозионно-стойких материалов. Настоящая книга посвящена главным образом рассмотрению вопросов, касающихся высокотемпературного применения суперсплавов. Но значительную часть приводимых в ней сведений можно отнести и к проблемам эксплуатации в коррозионных средах. Коротко эти сведения будут рассмотрены ниже.

В данной главе сделана попытка рассказать историю суперсплавов. Часть разделов посвящена полезному в техническом и научном отношении анализу излагаемых в хронологическом порядке сведений о поведении суперсплавов и особенностях их изготовления. В том числе дана оценка важным факторам, касающимся собственности и других внешних сторон проблемы, игравшим побудительную роль при создании этих необычных и действительно ключевых материалов. В этой главе дано некоторое представление об экономике и применении суперсплавов, но главное ее предвзвешивание в том, чтобы послужить введением и фоном для последующих глав.

## 1.1. Истоки и применение

### Машины

Всю свою историю люди придумывали и создавали для собственных нужд различные механические устройства. Сотни лет назад, может быть с первыми практическими сведениями о мощи восходящего теплого воздуха (рис. 1.1,а), стало очевидно, что рост полезного действия устройства связан с использованием повышенных температур. В дальнейшем этот вывод, уже обоснованный термодинамически, привел к Брайтоновскому циклу — важнейшей физической доктрине, согласно которой более высокие рабочие температуры (вместе с более низкими температурами теплоотводной среды) обеспечивают более эффективное действие устройства (см. гл.2).

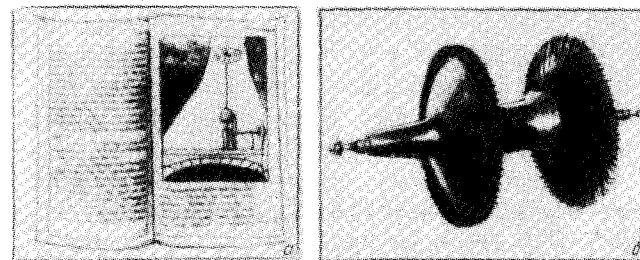


Рис.1.1. К происхождению газотурбинного двигателя:  
а — первая газовая турбина, которую можно использовать в домашних условиях; заимствовано из сочинения епископа Гиббонса "Математическое волшебство", 1648 г. [7]; б — ротор первой удачной промышленной газовой турбины, конструкция Эгидиуса Эллингга [2]

Брайтоновскую концепцию реализовали в ротационных двигателях, и в XIX в. начали появляться относительно совершенные паровые турбины. В начале XX в. в Европе в качестве энергетических установок использовали газовые турбины. Первая успешно примененная турбина сконструирована норвежцем Эгидиусом Эллинггом [2]. С наступлением XX в. избрательное человечество быстро прогрессировало, создав бензиновый двигатель и осуществив полет на пропеллерной тяге по существу параллельно с разработкой турбинных двигателей.

В первые десять лет работы над созданием двигателя поняли, что аэропланам требуется устройство, повышающее

давление подачи топливно-воздушной смеси в двигатель внутреннего сгорания, поскольку давление атмосферного воздуха понижено на высотах, где летит аэроплан. Работа проводилась в Европе и Соединенных Штатах. Одно из усилий, предпринятых Стэнфордом Моссом из Корнельского университета совместно с фирмой "Дженерал электрик" и армией США, увенчалось созданием самолетного двигателя с турбо-наддувом. Это нововведение ускорило деятельность по непрерывному совершенствованию металлических сплавов и по существу выдвинуло разработку и создание высокотемпературных металлических материалов в США на ведущее место в мире.

Вслед за этим возник технологический феномен чрезвычайной важности. Прогресс в аэродинамической теории привел к изменениям в мышлении конструкторов Англии, Германии и Италии. Они уяснили, что из-за вихревого сопротивления на две трети снижается мощность самолета, летающего на обычной тяге, применили к осевым компрессорам и турбинам прандтлеву теорию крыла ("несущей плоскости") с ее концепцией подъемной силы и поняли, что сверхзвуковые реакции на кончиках пропеллеров не позволят аэропланам двигаться намного быстрее 650 км/ч. В совокупности эти три фактора привели к технологической парадигме – концепции самолета с реактивным двигателем. И это была не эволюция, а революция.

Понятие "реактивный самолет" заняло свое место в общественном сознании вместе с полетом, совершенным в 1937 г. на самолете фирмы "Хейнкель" с турбинным двигателем Ганса фон Охайна в Германии, а также – независимо от этой разработки – полетом на самолете с двигателем Уиттля в 1939 г. в Англии. Ряд ключевых событий из истории этого процесса представлен на рис. 1.2 [7].

С появлением новой технологии конструкторам стало ясно, что дальнейший прогресс произойдет с переходом к еще более высоким температурам и что для выполнения необходимых работ потребуются новые материалы. С тех пор огромное значение от прогресса в области реактивной тяги и создания промышленных газовых турбин приобрела развивающаяся технология машиностроения. Самым решительным образом этот прогресс зависел и от работоспособности жаропрочного сплава. Область технологических разработок, тре-

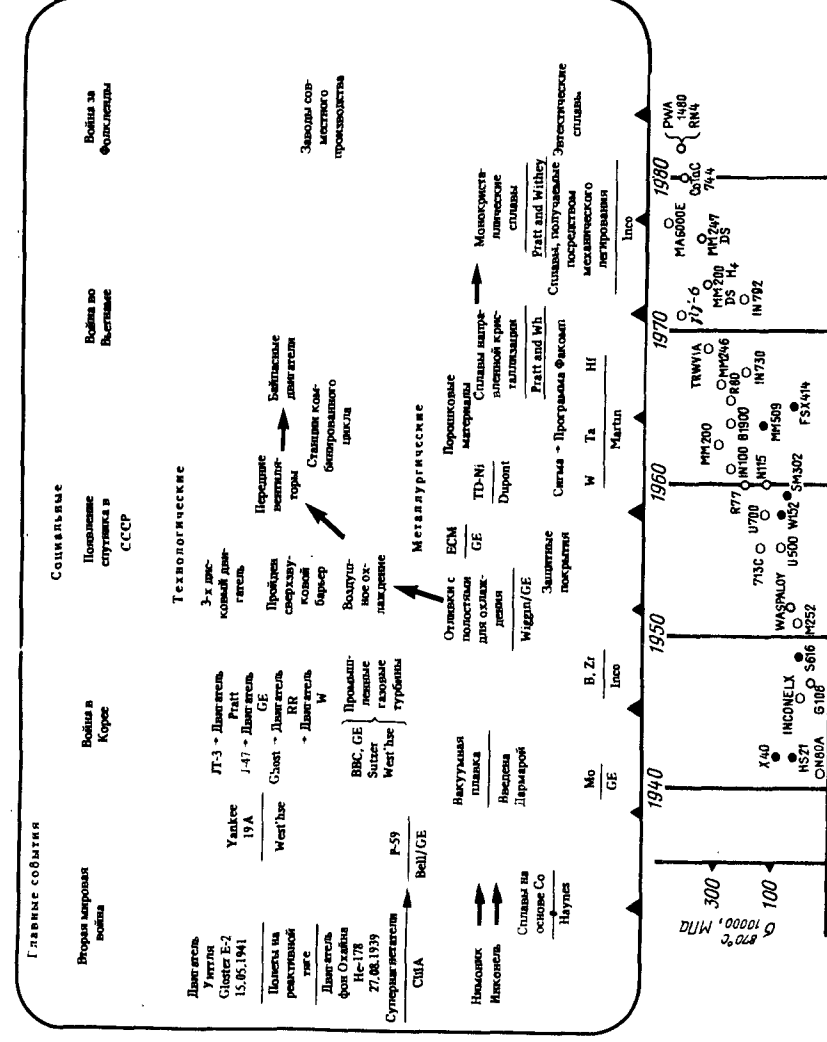


Рис.1.2. История суперсплавов от начала до наших дней с указанием появления сплавов новых марок возрастающей работоспособности [7]



бующих создания высоконадежных суперсплавов, определяется конструкцией газотурбинного двигателя и включает его диски, лопасти (или лопатки<sup>1</sup>), камеры сгорания и многие другие детали (см. гл.2 и рис. 1.9).

### Металл

Металлургия развивалась от века меди и железа до эпохи более прочных и коррозионно-стойких сплавов. В период 1910–1915 годов были "открыты" и разработаны нержавеющие аустенитные стали. Существенно при этом, что гамма-решетка (г.ц.к.) аустенитной нержавеющей стали явилась фактически той надежной основой, на которой возникли и развивались суперсплавы. Правда, в те времена разработка сплавов для турбонагнетателя шла традиционно, путем упрочнения ферритных сталей.

В 1929 г. Бедфорд и Пиллинг (*Bedford, Pilling*) и фактически одновременно Мерика (*Merica*) добавили небольшое количество Ti и Al в известный к тому времени Cr–Ni сплав 80/20 (г.ц.к.). Получили значительный прирост сопротивления ползучести, и, таким образом, появление суперсплавов случайно совпало по времени с парадигмой реактивного двигателя [8]. Вслед за этим в Англии, Соединенных Штатах и Германии эдисоновские опыты успешно завершились созданием прочных сплавов, построенных из твердого раствора хрома в никеле ( $\gamma$ -фаза) с аустенитной структурой, карбидов и мелкодисперсных частиц фазы, выделяющейся в процессе старения. Однако даже спустя почти десять лет когерентные выделения  $\gamma'$ -фазы, этой жизненно важной фазы с решеткой г.ц.к., еще не были обнаружены прямым наблюдением [9]. Одновременно на конкурентной основе разрабатывали аустенитные карбидоупрочняемые сплавы на основе Co, поскольку из них легче было получить отливки сложной формы.

Параллельные технологические разработки, связанные с развитием реактивного двигателя, требовали все более прочных аустенитных сплавов, ибо стало ясно, что потенциальные возможности двигателя этого нового типа беспредельны.

<sup>1</sup> В англоязычной литературе их называют *blades* применительно к самолетным двигателям и *buckets* применительно к промышленным турбинам. *Прим.перев.*

С начала 1940-х гг. и второй мировой войны история суперсплавов складывалась из все более новых усовершенствований путем создания новых композиций и процессов производства. Сначала в течение длительного времени создавали тяговые реактивные двигатели для военных целей. Но в дальнейшем энергетические и транспортные предприятия все более нуждались в газовых турбинах для электростанций, газопроводных насосов и других приводных устройств. При создании подобных турбин нередко требовались суперсплавы с различными характеристиками. По существу в пятидесятых и шестидесятых годах нашего века разработка суперсплавов приобрела характер взрыва, так же как и развитие процессов их производства в семидесятых и восьмидесятых.

Историю этих разработок творили люди и компании преимущественно в США и Англии. На рис. 1.3 [7] приведены имена наиболее выдающихся разработчиков и компаний, занятых производством суперсплавов (для иллюстрации при каждом имени указано по крайней мере три марки суперсплавов, разработанных данным лицом и нашедших промышленное применение).

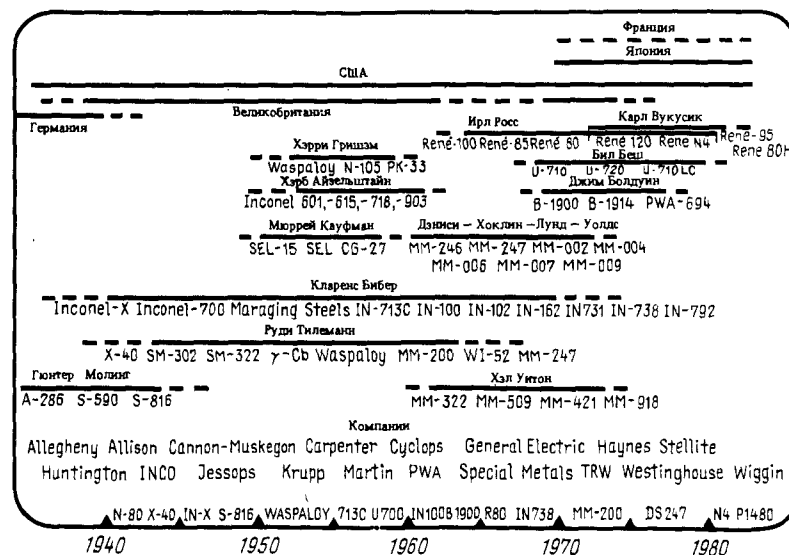


Рис.1.3. Страны, компании и специалисты, сыгравшие ведущую роль в разработке суперсплавов [7]

# Металлолом

Первый научный сайт про металлы в Рунете

Большое спасибо за чтение ознакомительной версии контента с сайта “Металлолом”. Если вы заинтересованы в полной версии, пожалуйста - нажмите кнопку “Facebook” или “Twitter” и поделитесь своей находкой, чтоб остальным было легче найти наш сайт.

После этого вам нужно будет обновить страницу, где вы расшарили ссылку - и полный контент будет доступен вам для чтения онлайн прямо на сайте!

Если вы находите данный ресурс полезным - пожертвуйте, сколько можете

<https://secure.wayforpay.com/payment/mitalolom>



## **Важно!**

Весь контент защищен авторскими правами и служит только для ознакомительных целей - например, когда вам нужно написать реферат или курсовую.

После прочтения и ознакомления, вам нужно будет удалить скачанный контент или оплатить издателю.