

щади касания от приложенной нагрузки и вида обработки материала.

Расчеты фактической площади касания в зависимости от нагружения с учетом механических особенностей контактируемых материалов представляют особый интерес для специалистов, занимающихся отработкой режимов холодной сварки и обеспечением герметичности разъемных соединений трубопроводов.

1. Бойко Ю. С. Влияние холодной сварки на герметичность разъемных соединений с пластичной прокладкой // Космічна наука та технологія. Додаток.—2001.—7, № 1.
2. II Всеукраїнська молодіжна науково-практична конференція з міжнародною участю «Людина і космос»: Зб. тез. — Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2000.
3. Россошинский А. А., Заплитная А. Т., Кислицин В. М. Влияние давления на фактическую площадь касания при сварке давлением // Автоматическая сварка.—1969.—№ 7.

4. Сахацкий Г. П. Технология сварки металлов в холодном состоянии. — К.: Машиностроение, 1970.

#### DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF COLD WELDING IN DETACHABLE CONNECTIONS

Yu. S. Boiko

It is ascertained that at assembly and trial of pneumahydraulic systems (PHS), detachable seam of connection after removal from them the efforts of a tightening do not lose the air-tightness even in conditions of nominal loads. Basing on the theory of metal links and the carried out researches the calculations of diameter of a single spot of contact and actual square of contact depended on the pressure and from sort of processed material are done. The mathematical model is developed and offered which allows to judge about common character of the process cold weld in detachable connections, and also to select his optimal parameters.

УДК 669.1017

## СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ СТАРЕНИИ МАРТЕНСИТОСТАРЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

© Н. Е. Калинина, А. В. Дейнега

Дніпропетровський національний університет

Проведено оцінку способів зміцнення мартенситостаріючих сталей легуванням і термічною обробкою. Представлено механізм гомогенного і гетерогенного зародження інтерметалічних фаз при старінні. Розглянуто поетапне старіння багатокомпонентних сплавів системи Fe-Ni-Cr-Co-Mo.

Мартенситостареющие стали в настоящее время применяются для получения деталей и узлов ответственного назначения в ракетостроении, судостроении, оборонной промышленности и других отраслях техники.

Существуют две основные группы мартенситостареющих сталей: высоконикелевые (высокопрочные) и хромоникелевые (нержавеющие), некоторые представители указанных групп представлены в таблице.

В обычных углеродистых и легированных сталях высокая прочность достигается за счет формирования углеродистого мартенсита закалки или за счет карбидного упрочнения основы сплава. Мартенситостареющие стали представляют собой совершенно иной класс высокопрочных, высоколегированных, практически безуглеродистых сталей. Содержание углерода не превышает, как правило, трех сотых процента.

Их упрочнение происходит при отпуске за счет выделения в мартенситной матрице интерметал-

лидных фаз в условиях высокой плотности дислокаций ( $\approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ).

Высокая плотность дислокаций в мартенсите обеспечивает высокие прочностные свойства, а легирование никелем, хромом, молибденом и другими элементами способствует подвижности дислокаций и облегчает их скольжение в мартенситной матрице, что обеспечивает необходимую пластичность и вязкость.

Мартенситостареющие стали легируют, помимо Ni, также Cr, Co, Mo, Ti, Al, Mn, Si, Nb, Be, W, и Ce. Роль легирующих элементов в достижении прочности не одинакова:

- Никель, хром и кобальт упрочняют твердый раствор и уменьшают предел растворимости ряда элементов (Ti, Al, Mo), в  $\alpha$ -фазе, обеспечивая возможность получения частиц интерметаллидной фазы, содержащей Ni [1, 2, 4].
- Молибден упрочняет сталь при старении за счет выделения дисперсных частиц фаз типа  $\text{Ni}_3\text{Mo}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Mo}$  [1, 3]. Наличие молибдена в

Состав и свойства мартенситостареющих сталей

Марка	Ni, %	Cr, %	Co, %	Mo, %	Другие элементы, %	$\sigma_{0.2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0.2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU <sub>2</sub> Дж/м <sup>2</sup>
I группа										
H18K9M5T	17—18	—	9—10	4—5	Ti 0.7	210	190	8	40	4
H12M2D2Ю	11—12	—	—	1—2	Al 0.7 Cu 2—3 Ti 0.8	185	180	8	45	5
II группа										
X11H5M5K9	4—5	11—12	8—9	4—5	Al 0.8 Ce 0.02	130	115	16	55	10
X11H10M2T	9—10	11—12	—	1—2	Ti 0.7	150	140	12	52	6

твердом растворе уменьшает вероятность преимущественного выделения частиц по границам бывших зерен аустенита при старении и тем самым уменьшает степень охрупчивания сплава [1].

- Титан и алюминий являются наиболее эффективными элементами-упрочнителями высокопрочных мартенситостареющих сталей при старении за счет выделения дисперсных фаз типа  $\gamma$ -Ni<sub>3</sub>Ti, NiAl, NiTi, Ni<sub>2</sub>(AlTi) и др. [1, 3].

Структура образующихся интерметаллидов и их форма зависят от типа и концентрации легирующих добавок, вызывающих старение, и от содержания никеля. В многокомпонентных сплавах в процессе старения образуется несколько интерметаллидных фаз. Так, при старении сплавов H16Ю, H8Ю образуются частицы сферической формы, а в сплавах H16T, H16M5 — игольчатой и чечевицеобразной формы [4].

Зарождение частиц интерметаллидных фаз происходит преимущественно на дислокациях (гетерогенное зарождение). В сплавах с большим содержанием кобальта и молибдена (H16K15M5, H12K15M10) наблюдается гомогенное зарождение.

Процесс распада твердого раствора является многостадийным. Число стадий для сплавов одной и той же системы зависит от состава сплава и температуры: чем выше степень пересыщения, тем больше стадий распада.

Первая стадия (быстрая) обеспечивает основную часть эффекта упрочнения в изменениях твердости и прочности. Эта стадия протекает в чрезвычайно короткие промежутки времени, измеряемые минутами. На этой стадии возникают зоны или частицы (менее 5 нм) со структурой, изоморфной матрице.

На второй (медленной) стадии происходит увеличение в размерах дисперсных частиц (до 10 нм) и при дальнейшей выдержке — разрыв когерентной связи частиц с мартенситной матрицей.

Рассмотренные поэтапные стадии упрочнения наблюдаются далеко не во всех системах. Для систем Fe-Ni-Cr-Co-Mo, где первой стадии практически нет, отчетливо выражен инкубационный период, после которого начинается интенсивное упрочнение. Первая стадия при повышенной прочности мартенсита может отсутствовать, а максимальное упрочнение идет во второй стадии [3].

Повышение температуры нагрева приводит к перестариванию — частичному растворению частиц (в связи с увеличением растворимости в  $\alpha$ -фазе при повышенной температуре) и увеличению размера дисперсных выделений. При этом увеличивается среднее расстояние между частицами, что приводит к понижению прочности сплава.

Дальнейшее повышение температуры старения ускоряет протекание этих двух процессов и приводит к образованию  $\gamma$ -фазы, в которой оставшиеся выделения быстро растворяются. Кристаллы  $\gamma$ -фазы из-за наличия дефектов строения и вероятного обогащения по никелю обладают повышенной устойчивостью при охлаждении сплава.

Таким образом, доля прочности стали, составляющая около половины от общего значения ( $\sigma_B$ ) получается за счет Fe-Ni-мартенсита, а остальная часть — вследствие образования интерметаллидных соединений типа Ni<sub>3</sub>Mo, Ni<sub>3</sub>Ti, Fe<sub>2</sub>Mo и др. В результате выделения упрочняющих фаз в процессе старения твердость мартенсита закалки повышается с 30...35 до 60...62 HRC. Прочность Fe-Ni-Co-Mo — сталей, в зависимости от содержания упрочняющих элементов и режимов старения, может достигать 2800...3000 МПа и более при достаточно высокой пластичности [2].

Необходимо отметить, что режим старения для получения максимального упрочнения МСС не может быть унифицирован, так как существуют группы сталей с принципиально отличающейся кинетикой изменения свойств.

1. Перкас М. Д., Кардонский В. М. Высокопрочные мартенситостареющие стали. — М.: Металлургия, 1971.—225 с.
2. Бодяко М. Н., Астапчик С. А. Мартенситостареющие стали. — Минск: Наука и техника, 1976.—248 с.
3. Бирман С. Р. Экономно легированные мартенситостареющие стали. — М.: Металлургия, 1974.—208 с.
4. Еднорал А. Ф., Кардонский В. М., Перкас М. Д. Структурные изменения при старении безуглеродистого железоникелевого мартенсита. — М: Наука, 1972.—С. 63—79.

## STRUCTURE CHANGING DURING OF MARAGING-TYPE STEELS

N. E. Kalinina, A. V. Deinega

Heat treatment and doping hardening methods of maraging-type steels are estimated. The mechanism of homogenic and heterogenic burning of germinating intermetallic phases during aging is presented. Phase aging of multicomponent alloys of the Fe-Ni-Cr-Co-Mo system is suggested in this article.

УДК 629.78., 620.9

# ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОПРИЕМНИКА-АККУМУЛЯТОРА КОСМИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ, РАБОТАЮЩЕЙ ПО ЦИКЛУ БРАЙТОНА

© Л. И. Кныш, В. А. Габринец

Науково-дослідний інститут енергетики Дніпропетровського національного університету

Проводиться оптимізація основних параметрів системи «концентратор — приймач» космічної сонячної енергетичної установки, що діє за замкнутим газотурбінним циклом Брайтона. Теплоприймач конструктивно суміщено з теплоаккумулятором, принцип роботи якого оснований на використанні прихованого тепла фазового переходу «тверде тіло—рідина». В основу оптимізації положено величину геометрично-го ККД концентратора. За заданими параметрами циклу і величиною корисної електричної потужності визначаються ККД системи «дзеркало—приймач», оптимальний радіус концентратора і апертурного отвору теплоприймача-аккумулятора.

Потребность в электрической энергии для космических аппаратов непрерывно возрастает. В настоящее время космическая энергетика в основном базируется на использовании фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии (ФЭП). Однако большие перспективы для использования в космосе имеют энергетические установки с машинным преобразованием тепла. В частности установки, работающие по замкнутому газотурбинному циклу Брайтона. К преимуществам этих установок можно отнести:

- более высокий (20—25 %) КПД по сравнению с КПД ФЭП (14—19 %);
- неуязвимость по отношению к радиации;
- возможность получения легко регулируемого тока высокого напряжения;
- практически неограниченная мощность;
- хорошая сочетаемость с любым источником энергии.

В качестве первичного источника энергии может выступать энергия концентрированного солнечного излучения как наиболее экологически чистая, без-

опасная, имеющая неограниченный ресурс.

В настоящей работе рассмотрен полостной приемник лучистой энергии, совмещенный с тепловым аккумулятором. Такой приемник предназначен для поглощения концентрированного солнечного излучения. Концентрация солнечного излучения осуществляется с помощью параболического концентратора. Важнейшей задачей разработки таких систем является обеспечение требуемой температуры нагрева рабочего тела и теплоаккумулирующего материала (ТАМ) при минимальных потерях энергии.

Отраженные от концентратора лучи, плотность которых увеличивается во много раз, попадают в приемник тепла, помещенный в фокальной плоскости концентратора. Для солнечных высокотемпературных космических энергетических установок (КСЭУ) наиболее предпочтительной схемой является параболоид вращения в качестве зеркала и полость, имитирующая абсолютно черное тело, — в качестве приемника энергии.

При всех положительных качествах, которые имеет энергия Солнца как источник первичного