

## Раздел третий

# КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ РЕАКТОРОВ НОВЫХ ПОКОЛЕНИЙ, РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ И ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

УДК 669.24:539.4.015

## СТАРЕНИЕ СПЛАВА ТИПА HASTELLOY В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

*С.А. Бакай*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*

*E-mail: serg.bakai@kipt.kharkov.ua, http://www.kipt.kharkov.ua*

Исследованы процессы старения в Ni-Mo-Cr-сплаве типа Hastelloy. Установлена интенсификация старения при термической обработке в ультразвуковом поле закаленного материала (термоультразвуковая обработка) и дано физическое обоснование выбора акустических параметров. Определены оптимальные режимы старения при термической и термоультразвуковой обработках сплава типа Hastelloy.

В последнее время в реакторостроении используются термостойкие тройные сплавы на основе никеля, молибдена и хрома. Так, основным материалом – кандидатом для топливного контура жидкосольевых реакторов - является сплав, известный как сплав Hastelloy (Ni~70 мас. %, Mo~10 мас. %, Cr~6 мас. %), он впервые использовался в США [1]. В ННЦ ХФТИ разработан и исследован Ni-Mo-Cr-сплав типа Hastelloy, в котором для достижения сочетания высоких физико-механических характеристик и коррозионной стойкости финишной операцией после закалки является термообработка (ТО), реализующая процессы старения [2, 3]. Было показано, что оптимальные режимы старения для сплава типа Hastelloy достигаются при довольно больших временах ТО. Известно, что ультразвуковое воздействие (УЗВ) при ТО может существенно ускорять кинетику распада твердого раствора за счет интенсификации диффузионных процессов и увеличения числа потенциальных мест для образования зародышей новой фазы [4]. В связи с этим целью настоящей работы было изучение механических свойств сплава типа Hastelloy, после старения в поле ультразвуковых механических колебаний.

Сплав типа Hastelloy, приготовленный методом литья с низкой скоростью охлаждения [1], имеет следующий химический состав (таблица).

После поэтапной прокатки слитка при 1200 К до толщины 1,5 мм изготавливались образцы путем электроискровой резки. Полученные таким образом образцы проходили закалку (нагрев до 1400 К с выдержкой в течение часа и последующее охлаждение в воду). Далее осуществлялась ТО при температуре 975 К в атмосфере аргона разной продолжительности, а также в сочетании с УЗВ.

Химический состав Ni-Mo-Cr-сплава типа Hastelloy

Хим. элементы	Сплав типа Hastelloy, мас. %
Ni	78 ± 2
Mo	10 ± 3
Cr	6 ± 2
Ti	~ 0,5
Fe	~ 0,2
Al	~ 1
Mn	~ 0,5
Nb	~ 0,5

Для проведения ТО материала в ультразвуковом поле использовалась установка, подробно описанная в [5]. Источником ультразвуковых колебаний служил магнитострикционный преобразователь, который возбуждался ультразвуковым генератором УЗГ 2-4 М. Образцы жестко крепились к концентратору механических колебаний. Амплитуда ультразвуковых механических колебаний контролировалась виброметром UVM-4M с точностью до 0,1 мкм. Использовались образцы длиной  $\lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина волны в никеле, что позволяло осуществлять УЗВ в режиме стоячей волны (частота  $f = 19,5$  кГц). После ТО в ультразвуковом поле из центральной части образцов вырезались микрообразцы для механических испытаний на растяжение при 300 К; длина рабочей части составляла 10 мм, что соответствовало области равномерного распределения амплитуды ультразвукового напряжения. Микроструктура сплава изучалась металлографическим методом с использованием оптического микроскопа ММР-4.

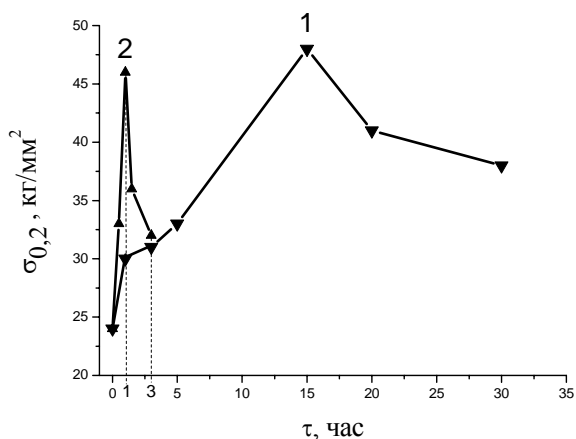


Рис. 1. Зависимость предела текучести  $\sigma_{0,2}$  сплава титана Hastelloy от времени термообработки  $\tau$  (1 – термообработка после закалки; 2 – термообработка в ультразвуковом поле после закалки)

На рис. 1 показана зависимость предела текучести  $\sigma_{0,2}$  при растяжении сплава типа Hastelloy от времени ТО после закалки. Видно, что в результате ТО наблюдается эффект дополнительного упрочнения, причем, максимум упрочнения достигается при 15 ч ТО. Микроструктурный анализ показал, что после ТО в течение 15 ч происходит образование на границах зерен разрозненных или относительно взаимосвязанных частиц избыточных фаз в виде карбидов и интерметаллидов. Таким образом, при ТО после закалки наблюдается распад твердого раствора, т.е. процесс старения, обусловленный, как известно [6], структурными перестройками на стадии формирования избыточной фазы. Следует отметить, что при больших временах ТО ( $> 15$  ч) с развитием старения частицы вторых фаз начинают укрупняться и теряют когерентность с матрицей. При этом уменьшается эффективная объемная доля этих частиц, являющихся барьерами для движения дислокаций, и прирост предела текучести после ТО снижается.

Влияние УЗВ на протекание процесса старения в сплавах в значительной степени определяется амплитудой продольных ультразвуковых колебаний  $A_{уз}$ , которая является основным параметром оптимизации [7]. Для конструкционных кристаллических материалов, к которым относится исследуемый сплав, УЗВ с большими амплитудами колебаний, реализующими процессы массового размножения дислокаций, весьма проблематично. Это обусловлено тем, что для сплава типа Hastelloy характерна высокая степень закрепленности дислокаций примесными атомами и легирующими элементами, а также наличием разветвленной дислокационной структуры с повышенной плотностью дислокаций [8]. В результате при УЗВ с  $A_{уз} > A_{п}$  ( $A_{п}$  – пороговое значение амплитуды [9]) в сплаве типа Hastelloy развиваются усталостные процессы. В настоящей работе было установлено, что по мере роста амплитуды ультразвуковых колебаний процессы усталости при  $T = 975$  К развиваются раньше, чем в сплаве формируется

структура с повышенной плотностью дислокаций. Это обусловлено знакопеременным и динамическим характером нагружения при УЗВ, что приводит к локализации деформации и усталостному разрушению материала. Поскольку процесс старения сплава типа Hastelloy предусматривает применение продолжительных ТО, то для физического обоснования выбора амплитудного и временного режимов УЗВ в процессе ТО в настоящей работе озвучивание сплава осуществляли при различных  $A_{уз}$  и временах  $\tau$ . Это позволило построить кривую высокочастотной усталостной прочности (кривая Веллера)  $A_{уз} = F(\ln N)$ , где  $N = ft$  – число циклов нагружения до разрушения (рис. 2).

Кривая Веллера позволила осуществить подбор акустических параметров УЗВ. Так, например, амплитуда УЗВ, при которой не достигается предел усталостной прочности сплава типа Hastelloy в течение  $\tau \geq 5$  ч, равна  $A_{уз} = 2$  мкм. Именно такое значение  $A_{уз}$  было выбрано в настоящей работе для изучения кинетики старения сплава при термоультразвуковой обработке.

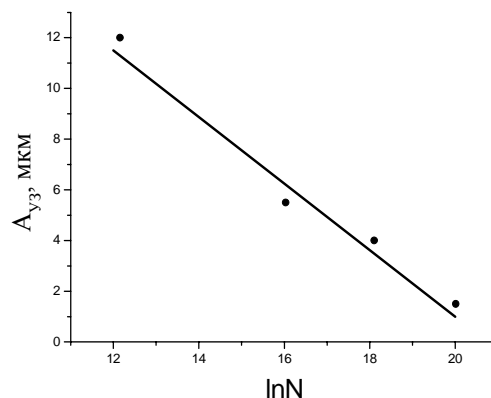


Рис. 2. Кривая Веллера при  $T=975$  °C для сплава титана Hastelloy (частота нагружения  $\sim 19,5$  кГц)

Было установлено, что уже после нескольких минут УЗВ в процессе ТО наблюдается резкое увеличение сопротивления пластической деформации при последующих испытаниях. Причем, максимальное упрочнение достигается при  $\tau \approx 1$  ч (см. рис. 1), а дальнейшее УЗВ приводит к падению  $\sigma_{0,2}$ . Наблюдаемая интенсификация старения сплава типа Hastelloy связана с усилением диффузионных процессов в ультразвуковом поле в результате образования избыточной концентрации вакансий, и, как следствие, приводящих к увеличению объемной доли частиц выделяющихся фаз. Кроме того, из-за селективного поглощения колебательной энергии на дислокациях увеличивается число мест преимущественного зарождения таких выделений. Дальнейшее ультразвуковое воздействие при ТО приводит к снижению когерентности на границах фаза-матрица и коагуляции частиц выделяющейся фазы. Таким образом, структура с высокой плотностью мелких частиц-выделений трансформируется в структуру с меньшей концентрацией, но крупных частиц. Формирование такой структуры обуславливает смену механизма пластического течения при

последующих испытаниях сплава: от перерезания дислокациями мелких стопоров (механизм Набарро-Мотта) к механизму прогиба дислокационных петель между частицами-стопорами с образованием малых дислокационных колец вокруг них (механизм Орована). Для реализации последнего механизма, как известно [10], необходимы меньшие напряжения. В результате наблюдается падение предела текучести вплоть до значений, меньших, чем  $\sigma_{0,2}$  после закалки.

### ВЫВОДЫ

1. Показана интенсификация процесса старения закаленного сплава типа Hastelloy в поле ультразвуковых механических колебаний. Сокращение оптимального времени старения сплава в 5 раз связано с формированием повышенной концентрации частиц мелкодисперсной фазы.

2. Дано физическое обоснование выбора акустических параметров УЗВ при ТО сплава типа Hastelloy, обеспечивающих оптимальный режим процесса старения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. P.N. Haubereich, J.R. Engel. Experience with molten salt reactor experiment // *Nucl. Appl. Technol.* 1970, v. 8, p. 118-136.

2. V.M. Azhazha, A.S. Bakai, I.V. Gurin, I.M. Nekludov, et al. Study for reactors employing molten fluoride salts or Pb-Bi coolant using an electron irradiation test facility // *Problems of Atomic Science and Technology.* 2005, №4, p. 3-19.

3. A.S. Bakai. Combined effect of molten fluoride salt and irradiation on Ni-based alloys // *Materials Issues for Generation IV Systems.* 2008, p. 537-557.

4. А.В. Кулемин. *Ультразвук и диффузия в металлах.* М.: «Металлургия», 1978.

5. A.S. Bakai, S.A. Bakai, G.N. Malik, V.M. Gorbatenko, V.M. Netesov, V.A. Emlyaninov. The ultrasonic mechanical test facility for research of impact ultrasonic vibrations on mechanical properties of materials // *Problems of Atomic Science and Technology.* 2005, №4, p. 104-107.

6. О.И. Волчок, Г.Н. Малик, В.С. Оковит, Л.А. Чиркина. Исследование процессов ультразвуковой релаксации в сплаве Nb-Ti // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования (теория и эксперимент)».* 1989, в. 7(7), с. 40-42.

7. К.В. Чуистов. *Старение металлических сплавов.* Киев: «Наукова думка», 1985, с. 166-169.

8. N. Wanderka, A. Bakai, C. Abromeit, D. Isheim, D.N. Seidman. Effects of 10 MeV electron irradiation at high temperature of a Ni-Mo-based Hastelloy // *Ultra-microscopy.* v. 107, p. 786-790.

9. И.А. Гиндин, О.И. Волчок, В.К. Аксенов. Влияние температуры озвучивания и чистоты материала на акустическое упрочнение // *Физика металлов и металловедение.* 1979, т.48, в. 3, с. 641-646.

10. Р. Хоникомб. *Пластическая деформация металлов.* М.: «Мир», 1972.

Статья поступила в редакцию 07.12.2009 г.

## СТАРІННЯ СПЛАВУ ТИПУ HASTELLOY В УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ПОЛІ

*С.О. Бакаї*

Досліджені процеси старіння в Ni-Mo-Cr-сплаві типу Hastelloy. Встановлена інтенсифікація старіння під час термічної обробки в ультразвуковому полі загартованого матеріалу (термоультразвукова обробка) та дано фізичне обґрунтування вибору акустичних параметрів. Визначені оптимальні режими старіння під час термічної та термоультразвукової обробки сплаву типу Hastelloy.

## AGING OF HASTELLOY TYPE ALLOY IN ULTRASONIC FIELD

*S.A. Bakai*

Aging processes in Ni-Mo-Cr alloy Hastelloy type was investigated. Hardened material aging intensification under thermal treatment in ultrasonic field (thermal-ultrasonic treatment) was established. Physical justification of choice acoustic parameters has been given. Optimum regimes of alloy aging under thermal and thermal-ultrasonic treatments are defined.