

УДК 669.017.8: 621.785.784

**А. А. Мамалуй**, д-р физ.-мат. наук

**Н. Б. Фатьянова**, канд. физ.-мат. наук

**Т. Н. Шелест**, канд. физ.-мат. наук

**А. Я. Дульфан**, канд. физ.-мат. наук

Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»

(E-mail: mamalui@kpi.kharkov.ua)

## **ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ДИСПЕРСИОННО СТАРЕЮЩИХ СПЛАВАХ В ПРЕЦИЗИОННОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ**

*Исследовано изменение структуры и физических свойств Cr-Ni-Al сплава в процессе дисперсионного старения. Для повышения стабильности структуры и размеров сплава при сохранении высокой прочности разработан оптимальный режим его термообработки, обеспечивающий максимальное завершение распада твердого раствора, при этом относительное изменение размеров не превышает  $\Delta l/l \sim 5 \cdot 10^{-5}$ . Предложен метод дальнейшего повышения стабильности с образованием квазиравновесного однофазного твердого раствора, при этом  $\Delta l/l \leq 3 \cdot 10^{-6}$ .*

*Досліджено зміну структури і фізичних властивостей Cr-Ni-Al сплаву у процесі дисперсійного старіння. Для підвищення стабільності структури та розмірів сплаву при збереженні високої міцності розроблено оптимальний режим його термообробки, який забезпечує максимальне завершення розпаду твердого розчину, при цьому відносна зміна розмірів не перевищувала  $\Delta l/l \sim 5 \cdot 10^{-5}$ . Запропоновано метод подальшого підвищення стабільності з утворенням квазірівноважного однофазного твердого розчину, при цьому  $\Delta l/l \leq 3 \cdot 10^{-6}$ .*

### **Введение**

В настоящее время широко исследуются способы и технологии создания твердотельных микроструктур с заранее заданными параметрами [1] и изучается их стабильность. Вопросы обеспечения стабильности таких микроструктур, особенно в экстремальных условиях эксплуатации сплавов, изучен еще недостаточно. Необходимость таких исследований ощущается все острее, так как в последнее время предъявляются жесткие требования к стабильности формы и размеров, а следовательно, структуры и физических свойств деталей и узлов различных прецизионных аппаратов, эксплуатируемых в экстремальных условиях (высокие и низкие температуры и давления, химически агрессивные среды, длительное термоциклирование и т. д.).

### **Основная часть**

В данной работе особое внимание уделено возможности обеспечения высокой стабильности формы деталей (при сохранении других эксплуатационных свойств) перспективного, но недостаточно изученного коррозионно-стойкого жаропрочного немагнитного дисперсионно стареющего 40Cr-57Ni-3Al сплава. Образцы сплава закаливали в воду от 1150 °C с выдержкой 0,5 ч и затем проводили их дилатометрическое исследование при различных температурах с использованием дифференциального дилатометра Шевенара с коэффициентом оптико-механического увеличения по шкале деформаций 1288,57. Погрешность измерений  $\Delta l/l \leq 3 \cdot 10^{-6}$ . На разных стадиях термической обработки проводили микроструктурный, электронографический и рентгеноструктурный анализы.

При старении сплава Cr-Ni-Al происходит распад  $\gamma_1$ -твердого раствора с ГЦК-решеткой на основе никеля с образованием сложной эндотаксиальной [2, 3] пластинчатой композиции, состоящей из обедненного легирующими элементами  $\gamma_2$ -твердого раствора, интерметаллида  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al и  $\alpha$ -фазы, представляющей собой практически чистый хром. В результате этого наблюдается сжатие образцов: максимальное изменение их размеров  $\Delta l/l = -0,44\%$ .

Для достижения высокого уровня размерной и структурной стабильности Cr-Ni-Al-сплава исследования проводили в двух направлениях:

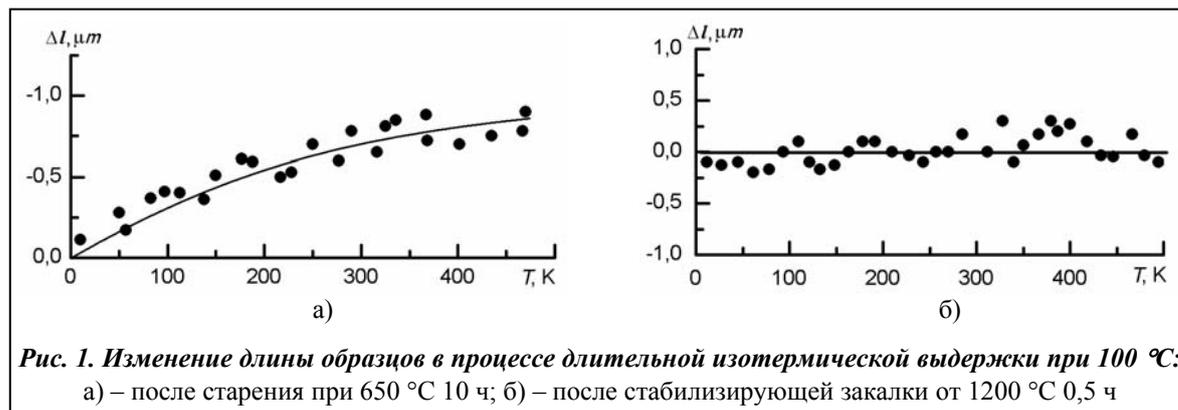
- 1) определение оптимального режима искусственного старения, в наибольшей степени обеспечивающего завершение распада твердого раствора, приближающего сплав к термодинамическому равновесию;
- 2) разработка нового метода существенного повышения стабильности сплава путем практически полного устранения каких-либо фазовых превращений в интервале температур 0–100 °С в течение длительного времени.

Анализ наших данных показал, что распад  $\gamma_1$ -твердого раствора закаленного сплава Cr-Ni-Al протекает в наибольшей степени в процессе искусственного старения при 650 °С в течение 10 ч. Однако после длительной изотермической выдержки при 100 °С образцы, состаренные по выбранному оптимальному режиму, все же изменяют свои размеры (рис. 1). В результате экстраполяции полученных данных установлено, что после выдержки при 100 °С 5000 ч относительное изменение длины образцов составляет  $\Delta l/l \cong 4,8 \cdot 10^{-5}$  (рис. 1, а). Следует отметить, что стабильность размеров деталей из исследуемого сплава после старения при 650 °С 10 ч повышается на порядок по сравнению с аналогичной характеристикой деталей, обработанных по стандартному режиму (старение при 550 °С 5 ч).

Изменение длины образцов при указанных режимах термической обработки можно объяснить эффектом ступенчатого распада пересыщенных твердых растворов, свидетельствующих о двухстадийности и скачкообразном завершении микропроцессов старения, который наблюдался нами при дилатометрическом исследовании данного сплава (рис. 2). Первая стадия распада заключается в микродиффузионном перераспределении легирующих элементов в решетке определенного микроучастка твердого раствора, вторая – в бездиффузионном скачкообразном образовании новых фаз в данном микроучастке (рис. 2, кривая 1).

Из этого следует, что после закалки и высокотемпературного старения в образцах сплава Cr-Ni-Al имеются микроучастки, в которых либо не происходило старения, либо прошла только его первая (диффузионная) стадия. При этом вторая стадия распада твердого раствора протекает в процессе последующей длительной выдержки при 100 °С в результате бездиффузионного скачкообразного формирования и выделения дисперсных фаз, что и обуславливает изменение размеров образцов.

Каждая ступенька дилатометрической кривой исследуемого Cr-Ni-Al-сплава соответствует определенному акту распада пересыщенного твердого раствора, но не в отдельном зерне, а одновременно в большой совокупности изолированных друг от друга монокристаллов, хаотически распределенных по всему объему образца. Такие участки оказываются под-



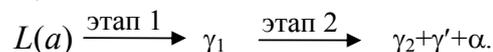
готовленными в данный момент времени к завершению распада твердого раствора – к формированию новых фаз.

В начале изотермической выдержки при 100 °С длина ступенек мала, а по мере протекания процесса старения она увеличивается. Длина ступенек тем больше, чем больше размер зерна твердого раствора. Количество ступенек увеличивается с повышением температуры старения, так как растет скорость диффузии.

Аналогичный ступенчатый характер распада твердого раствора наблюдается при dilatометрическом исследовании других сплавов и сталей в процессе их старения или отпуска после закалки (рис. 2, кривые 2–5).

Таким образом, после искусственного старения по оптимальному режиму (650 °С 10 ч) в сплаве 40Cr-57Ni-3Al наблюдается максимальная степень распада твердого раствора. При этом структурная размерная стабильность деталей из такого сплава повышается по сравнению с аналогичными характеристиками деталей после стандартной обработки. Однако старение по оптимальному режиму не приводит к полному подавлению дальнейшего распада твердого раствора в процессе последующей длительной выдержки при пониженных температурах (примерно 100 °С), несмотря на очень малую скорость диффузии легирующих элементов. При этом исследуемый сплав приближается к более полному термодинамическому равновесию.

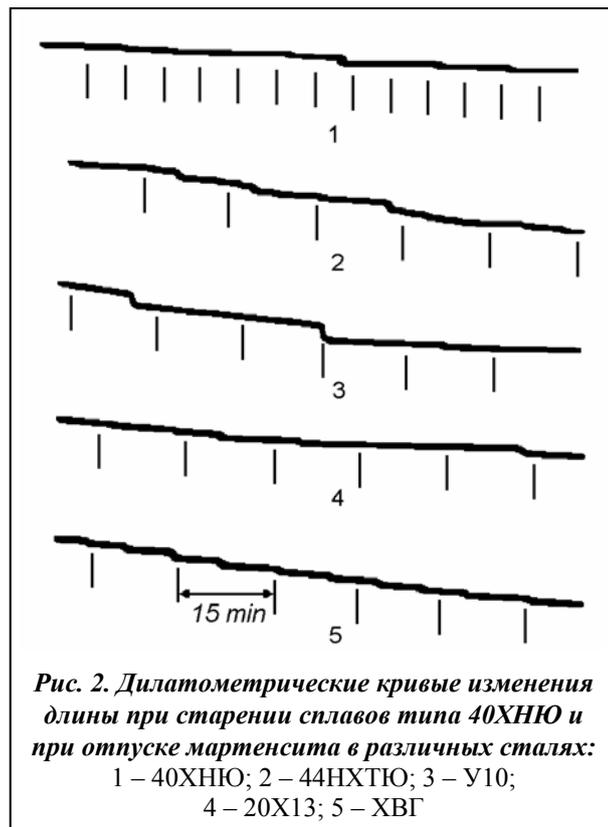
Для решения задачи дальнейшего повышения стабильности размеров данного сплава и особенно его формоустойчивости нами разработан новый метод обработки. Сущность его – создание в закаленном сплаве более совершенного, чем в искусственно состаренном, состояния термодинамического равновесия, называемого «квазиравновесием», подобно тому, как это выполняется для аморфных сплавов (металлические стекла и т. п.). Состояние квазиравновесия, а следовательно, высокая стабильность аморфного сплава достигается лишь в том случае, если химические потенциалы всех его компонентов равны или очень близки к химическим потенциалам тех же компонентов, но в истинно термодинамически равновесном гетерогенном кристаллическом сплаве, образующемся для сплава Cr-Ni-Al по следующей схеме фазовых превращений:



Как было показано в работе [4], стабильность аморфной фазы  $a$ , полученной при закалке жидкого расплава  $L(a)$ , тем выше, чем ближе ее состав к составу эвтектики (или «квазиэвтектики»), поскольку лишь в таком случае выполняются условия квазиравновесия: точного или приблизительного равенства указанных химических потенциалов распадающихся и образующихся фаз.

Приведенные теоретические представления использованы при решении задачи более совершенной, практически полной стабилизации формы закаленного сплава Cr-Ni-Al, чем после старения по оптимальному режиму (650 °С 10 ч).

Указанные условия квазиравновесия справедливы не только для металлических стекол и других аморфных сплавов, но и для переохлажденного закаленного кристаллического



*Рис. 2. Дилатометрические кривые изменения длины при старении сплавов типа 40ХНЮ и при отпуске мартенсита в различных сталях: 1 – 40ХНЮ; 2 – 44ХНТЮ; 3 – У10; 4 – 20Х13; 5 – ХВГ*

$\gamma_1$ -твердого раствора. При этом наиболее хорошо они выполняются для сплавов, близких по составу к эвтектическому.

Анализ двойных (Ni-Cr) и тройных (Ni-Cr-Al) диаграмм равновесия показал, что исследуемый сплав Ni-40% Cr-3% Al по составу близок к эвтектическому.

Для получения однофазного гомогенного пересыщенного  $\gamma_1$ -твердого раствора сплава 40ХНЮ рекомендуется закалять в воде от 1200 °С после выдержки при этой температуре в течение 5 ч. В результате такой обработки стабильность размеров закаленного квазиравновесного сплава существенно повышается: «деформация» образцов  $\Delta l/l \leq 3 \cdot 10^{-6}$ , что меньше, чем состаренных образцах, по крайней мере, на порядок и близко к пределу чувствительности метода измерения (см. рис. 1, б).

Таким образом, стабильность формы квазиравновесного закаленного сплава повышается не менее чем на порядок, по сравнению со стабильностью образцов, после закалки и старения по оптимальному режиму. Диффузионные процессы при 100 °С резко замедляются вследствие того, что химические потенциалы составляющих элементов в квазиравновесном закаленном состоянии близки к их потенциалам в гетерогенном – истинно термодинамически равновесном состоянии. Поэтому распада  $\gamma_1$ -фазы практически не происходит. Следует отметить, что в стабилизированном квазиравновесном закаленном  $\gamma_1$ -твердом растворе в результате длительного старения при температурах, не превышающих 400 °С, процессов распада (искусственного старения и т. п.) практически не происходит. Об этом свидетельствует также то, что вылеживание закаленных квазиравновесных однофазных образцов при нормальной температуре в течение семи лет не приводит к изменению их структуры, физических и механических свойств. Заметный распад и уменьшение стабильности квазиравновесного закаленного сплава 40ХНЮ начинается лишь при температурах выше 400 °С.

### Выводы

Полученные результаты показывают возможность дальнейшего повышения термодинамической и размерной стабильности (формоустойчивости) сплавов системы Cr-Ni-Al, используемых в прецизионном приборостроении, что заключается в достижении условий более совершенного квазиравновесия.

### Литература

1. *Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя* / Ред. І. К. Походня. – К.: Наук. думка. – 1998. – 660 с.
2. *Komatsu S. Microscopic observation of  $\gamma'$  and  $\alpha$ -Cr duplex-precipitation in 40Cr-4Al-Ni alloy* / S. Komatsu, M. Nakahashi, I. Watanabe // *J. Japan Inst. Metals.* – 1976. – Т. 40, № 12. – Р. 1208–1215.
3. *Ерболатулы Д. Особенности формирования мелкозернистых структур и влияние их на сверхпластические свойства сплавов 40ХНЮ и 67КН5Б* / Д. Ерболатулы // *Физика и химия наноматериалов: Материалы Междунар. науч. шк.-конф., 2005 г. – Томск (Россия).* – С. 52–55.
4. *Палатник Л. С. О стабильности аморфных систем* / Л. С. Палатник, И. И. Фалько // *Журн. физ. химии.* – 1983. – Т. 57, № 10. – С. 2398–2412.

Поступила в редакцию  
29.03.10