

УДК 669.018.8: 539.214

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»
(г. Харьков, E-mail: mamalui@kpi.kharkov.ua)

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ НА ФОРМОУСТОЙЧИВОСТЬ ДИСПЕРСИОННО СТАРЕЮЩИХ СПЛАВОВ ПРЕЦИЗИОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Изучено влияние электронно-лучевой обработки, а также поверхностного легирования на структуру, физические свойства и стабильность Cr-Ni-Al сплава. Установлено, что все эти способы обработки не вызывают дополнительной деформации в процессе длительной выдержки при температуре эксплуатации.

Вивчено вплив електронно-променевої обробки, а також поверхневого легування на структуру, фізичні властивості і стабільність Cr-Ni-Al сплаву. Встановлено, що всі ці способи обробки не викликають додаткової деформації в процесі тривалої витримки при температурі експлуатації.

В современном прецизионном приборо- и аппаратостроении используется немагнитный жаропрочный и коррозионноустойчивый сплав 40Cr-57Ni-3Al. В большинстве случаев к деталям из данного сплава предъявляются высокие требования структурной стабильности, а соответственно, формы и физических свойств.

Однако исследования показали, что исследуемый сплав Cr-Ni-Al является дисперсионно твердеющим. Старение образцов Cr-Ni-Al сплава сопровождается значительным уменьшением объема и соответственно длины образца на величину $\Delta l/l = -0,44\%$. Это связано с распадом γ_1 -твердого раствора на основе Ni, образуемого при закалке сплава, и формированием гетерогенной смеси в процессе старения, состоящей из α -фазы (практически чистого хрома), γ' -фазы (интерметаллида Ni_3Al) и γ_2 -твердого раствора, обедненного легирующими элементами [1]. Для повышения стабильности структуры, формы и размеров образцов Cr-Ni-Al сплава при сохранении его высоких прочностных характеристик разработан оптимальный режим термической обработки, обеспечивающий высокую степень распада пересыщенного γ_1 -твердого раствора; закалка $t = 1150$ °C, 30 мин + старение, $t = 650$ °C, $\tau = 10$ ч [2]. Выбранный оптимальный режим термообработки сплава наряду с сохранением высоких механических свойств обеспечивает требуемую стабильность – изменение объема при работе в течение 5000 ч при $t = 100$ °C не превышает $\Delta V/V \approx 1,2 \cdot 10^{-3}\%$.

Однако достигнутая таким образом стабильность может быть нарушена, если при последующем изготовлении узлов из термообработанных деталей применяются технологические операции, вызывающие фазовые превращения в сплаве.

Одной из часто применяемых финишных операций является соединение или герметизация деталей путем электронно-лучевой обработки. В связи с этим необходимо исследовать степень влияния электронно-лучевой обработки на последующую стабильность размеров и свойств деталей из Cr-Ni-Al сплава.

Рентгеноструктурный и микрорентгеноспектральный анализы показали, что в зоне теплового действия электронно-лучевой обработки преобладает γ_1 -фаза, тогда как вне этой зоны присутствуют γ' и α -фаза. Об этом свидетельствуют результаты металлографического анализа и измерения микротвердости образца в зоне провара и вне этой зоны. Структура зо-

ны провара идентична структуре сплава после закалки, а структура сердцевины представляет собой структуру отпущенного образца. Это подтверждается и распределением твердости в радиальном и аксиальном направлениях в плоскости продольного сечения образца.

Следовательно, при электронно-лучевой обработке в зоне ее теплового влияния происходит $\alpha \rightarrow \gamma_1$ превращение и затем фиксируется структура закалки. Это создает потенциальную возможность прохождения при последующих нагревах процесса обратного $\gamma_1 \rightarrow \alpha$ превращения, которое, как указано выше, сопровождается значительным уменьшением размеров образца. Проверка этого обстоятельства выполнена дилатометрированием образцов, подвергнутых электронно-лучевой обработке. Нагрев до заданной температуры осуществлялся в течение часа, изотермическая выдержка при $t = 650^\circ\text{C}$ составляла 10 часов. При дилатометрировании длина образцов значительно уменьшилась. Относительная деформация образцов достигала $\sim 16 \cdot 10^{-3}\%$.

Затем необходимо было выяснить, в какой степени такая деформация может быть реализована в условиях эксплуатации (при $\sim 100^\circ\text{C}$). С этой целью образцы, имеющие несколько поясков электронно-лучевой обработки, подвергались длительному (~ 500 ч) дилатометрированию при $\sim 100^\circ\text{C}$. Результаты его представлены зависимостью деформации образца от продолжительности изотермической выдержки (рис. 1). Относительная деформация образца в результате изотермической выдержки составляет $\delta l_{500} = 1,5 \cdot 10^{-3}\%$ (погрешность измерений $\delta l = 3 \cdot 10^{-4}\%$). Аналитическое экстраполирование деформации образца на достаточно длительное время (~ 500 ч) дает $\delta l_{500} = 4,4 \cdot 10^{-3}\%$, что удовлетворяет техническим требованиям.

Наряду с изучением влияния электронно-лучевой обработки на стабильность размеров деталей из сплава 40ХНЮ исследовалось влияние данного вида обработки на свойства сплава, в частности на коэффициент линейного расширения. Установлено, что электронно-лучевая обработка практически не изменяет коэффициента линейного расширения сплава ($\alpha \approx 11,3 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$).

Таким образом, электронно-лучевая обработка не влияет на стабильность размеров деталей исследуемого сплава и коэффициент линейного расширения и вполне допустима при изготовлении прецизионной аппаратуры. Следует учесть, однако, некоторые сопутствующие этой технологической операции обстоятельства. В зоне электронно-лучевой обработки вследствие происходящих в ней структурных превращений неизбежно возникновение значительных напряжений, величина которых, как показывает проведенная нами оценка, достигает ~ 92 мг/мм 2 . Учитывая довольно высокий уровень напряжений, возникающих из-за структурных превращений в зоне электронно-лучевой обработки, чтобы избежать коробления деталей, узлов с осевой симметрией, необходимо особое внимание уделять стабильности режима электронно-лучевой обработки при соединении деталей. Кроме того, в связи с фазовыми превращениями в зоне электронно-лучевой обработки могут изменяться размеры сопрягаемых деталей, в связи с чем следует учитывать необходимость проведения последующих доводочных финишных операций.

Для повышения износостойкости деталей из исследуемого Cr-Ni-Al сплава их поверхность подвергалась электроискровому легированию твердым сплавом, содержащим элементы W, Ti, Co.

Результаты исследования поверхностно легированных образцов сплава Cr-Ni-Al, закаленных и состаренных по оптимальному режиму 650°C , 10 ч, указывают на наличие де-

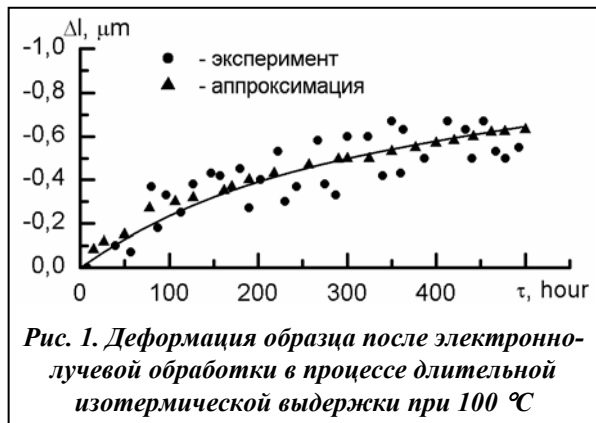


Рис. 1. Деформация образца после электронно-лучевой обработки в процессе длительной изотермической выдержки при 100°C

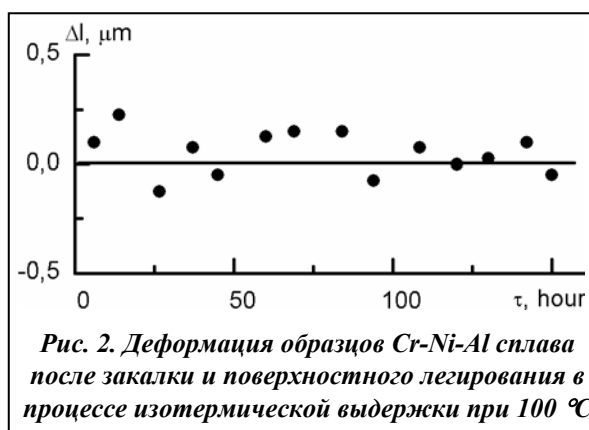


Рис. 2. Деформация образцов Cr-Ni-Al сплава после закалки и поверхностного легирования в процессе изотермической выдержки при 100 °С

формации в результате легирования при $t = 100$ °С, не превышающей $\Delta l/l \approx 4,5 \cdot 10^{-3}\%$.

В данной работе приведены результаты исследования влияния поверхностного легирования на структуру и размеры только закаленных образцов Cr-Ni-Al сплава. Структура приповерхностной зоны образца практически не отличается от структуры матрицы и типична для Cr-Ni-Al сплава после закалки.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа указывают, что в процес-

се легирования происходит диффузия W, Ti, Co в матрицу закаленного Cr-Ni-Al сплава на глубину ~ 5 мкм. Для закаленного и состаренного сплава глубина диффузии в матрицу W и Ti ~ 30 , Co ~ 35 мкм. Таким образом, скорость диффузии элементов твердого сплава в закаленную матрицу намного ниже скорости их диффузии в закаленную и отпущенную матрицу. Это связано с тем, что в закаленном состоянии Cr-Ni-Al сплав является практически однофазным и имеет крупнозернистую структуру, а при старении наблюдается распад твердого раствора с образованием гетерогенной смеси, что облегчает протекание диффузии по межфазным границам.

Таким образом, отсутствие практически диффузии легирующих элементов в матрицу закаленного сплава исключает доводку и изменение размеров деталей сплава при проведении легирования в отличие от закаленного и состаренного по оптимальному режиму состояния сплава, где в процессе легирования происходит увеличение размеров образцов $\Delta l/l \sim 10 \cdot 10^{-3}\%$ [3, 4].

Для выяснения влияния поверхностного легирования закаленного Cr-Ni-Al сплава на стабильность размеров проведено длительное dilatометрирование при 100 °С. Его результаты представлены на рис. 2 в виде зависимости величины деформации от продолжительности изотермической выдержки $\Delta l = f(\tau)$. Среднеквадратичная абсолютная погрешность измерений $\Delta l \approx \pm 0,15$ мкм. Из рис. 2 следует, что изменение размеров практически отсутствует, т.е. стабильность так же высока, как и в нелегированных закаленных квазиравновесных образцах. Поверхностное легирование закаленных образцов Cr-Ni-Al сплава практически не изменяет и коэффициент линейного расширения сплава $\alpha_{\text{зак}} \approx 12,6 \cdot 10^{-6}$ 1/град, $\alpha_{\text{зак+лег}} = 12,6 \cdot 10^{-6}$ 1/град.

Таким образом, полученные данные указывают на целесообразность применения поверхностного легирования Cr-Ni-Al сплава в закаленном состоянии, так как к минимуму сводятся изменения размеров и свойств, а следовательно, повышается долговечность работы прецизионной аппаратуры и снижается трудоемкость процессов термической обработки

Литература

1. Акишенцева А. П. Металлография коррозионно-стойких сталей и сплавов: Справочник / А. П. Акишенцева. – М.: Металлургия, 1991. – 288 с.
2. Атаманюк В. В. Технологія конструкційних матеріалів: Навч. посібник / В. В. Атаманюк. – К.: Кондор, 2006. – 528 с.
3. Палатник Л. С. Формоустойчивость поверхностно легированных образцов Cr-Ni-Al сплава / Л. С. Палатник, Я. И. Каган, Н. Б. Фатьянова // Электрон. обработка материалов. – 1988. – № 1. – С. 13–15.
4. Ерболатулы Д. Влияние структурных превращений на сверхпластические и прочностные свойства аустенитных никель-хромовых и кобальт-никелевых сплавов / Д. Ерболатулы, Д. Л. Алонцева, М. К. Скаков // Вестн. КарГУ. Сер. Физика. – 2004. – Т. 34, № 2. – С. 18–21.

Поступила в редакцию
15.11.10