

УДК 669.018.44

DOI: 10.12737/article_59d496ed88af13.99343265

И.В. Ворначева, ассистент,

В.Н. Гадалов, д.т.н.,

И.А. Макарова, аспирант,

А.В. Филонович, д.т.н.

(ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,

Курск, ул. 50 лет Октября, 94)

E-mail: gadalov-vn@yandex.ru; filon8@yandex.ru

Внутреннее трение литого сплава с никель-хромовой матрицей после термической обработки

Рассмотрены результаты измерений внутреннего трения сплава с никель-хромовой матрицей, изучена температурная зависимость внутреннего трения от термической обработки.

Ключевые слова: никель-хромовый сплав; термическая обработка; внутреннее трение; дислокация; эффект Финкельштейна–Розина.

I.V. Vornacheva, Assistant,

V.N. Gadalov, D.Eng.,

I.A. Makarova, Post graduate student,

A.V. Filonovich, D. Eng.

(FSBEI VE "South-Western State University", 94, October 50 Years Str., Kursk)

Inner friction of cast alloy with nickel-chrome matrix after thermal treatment

The results of inner friction measurements of alloy with nickel-chrome matrix are considered, an inner friction temperature dependence upon thermal treatment are considered.

Keywords: nickel-chromium alloy; thermal treatment; inner friction; dislocation; Finkelstein-Rosin effect.

Жаропрочные сплавы на никель-хромовой основе широко используются для изготовления ответственных изделий, работающих при повышенных температурах, при наложении сложного поля напряжений. В результате воздействия температуры в таких изделиях протекают релаксационные процессы, существенно изменяющие структуру и свойства металла [1–2].

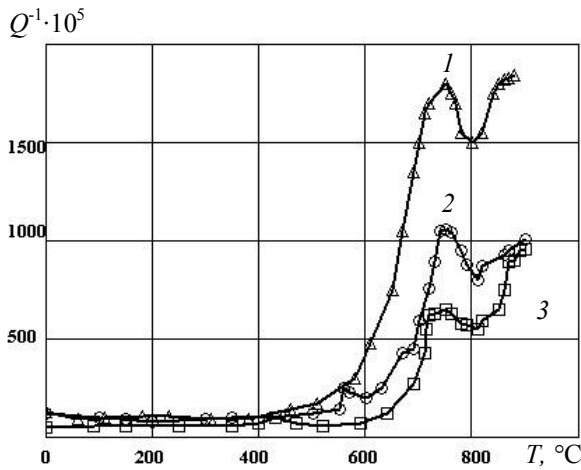
Релаксационные свойства сплава в литом состоянии будут отличаться от свойств после термической обработки. Их сопоставление позволит получить важную информацию о процессах, обуславливающих формирование структуры и свойств исследуемого материала.

В работе приведены результаты измерений внутреннего трения сплава (0,05 % C; 19,6 % Cr; 9,8 % Fe; 5,2 % Mo; 1,4 % Al; 2,8 % Ti, остальное Ni) в интервале температур 20...900 °C после различных режимов термической обработки с обсуждением некоторых релаксационных явлений. Внутреннее трение изучали на крутильном маятнике с автоматической регистрацией данных. Низкочастотные измерения 1,5...2,5 Гц проводили на образцах сечением 1,0x1,0 мм и длиной 120 мм. Относительная деформация сдвига не превышала $5 \cdot 10^{-5}$.

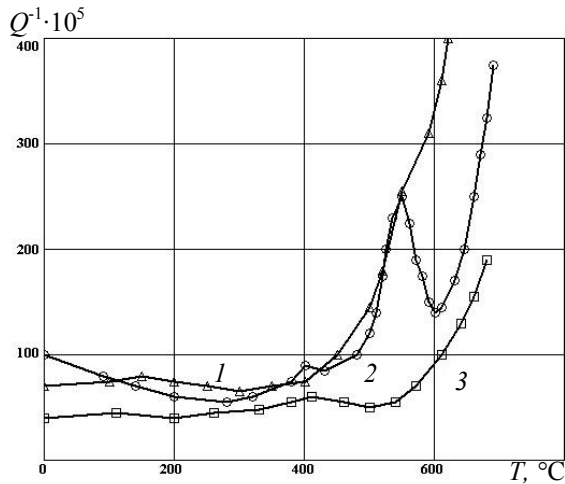
Нагрев образцов под закалку и последующее старение осуществляли в запаянных кварцевых

ампулах, остаточное давление внутри составляло $3 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Выдержка при нагреве под закалку составляла 4 ч. Температурную зависимость внутреннего трения $Q^{-1}(T)$ снимали через 10 мин после соответствующей термической обработки. Погрешность в определении внутреннего трения не превышала 3 %.

На рис. 1 а, б приведены кривые $Q^{-1}(T)$ исследуемого сплава после стандартной термообработки. В литом (исходном) состоянии на кривой $Q^{-1}(T)$ имеется пик при 180 °С с энергией активации 25 ± 2 ккал/г·атом.



а)



б)

Рис. 1. Температурная зависимость внутреннего трения в интервалах 20...900 °С (а) и 20...700 °С (в увеличенном масштабе Q^{-1}) (б):

1 – исходное состояние; 2 – закалка при 1150°С (4 ч), охлаждение на воздухе; 3 – закалка при 1150°С (4 ч), охлаждение на воздухе плюс старение при 710°С (16 ч)

Это связано с его неупругостью, вызванной атомами углерода в г.ц.к. решетке твердого раствора (пик Финкельштейна–Розина) [3]. Ме-

ханизм возникновения этого пика связан с миграцией атомов внедрения в поле напряжений в аустените. В закаленном от 1150 °С (охлаждение на воздухе) сплаве в области температур 200...400 °С никаких аномалий не наблюдается.

Охлаждение в воде повышает плотность дислокаций в аустените, что приводит к формированию четкого пика при 280 °С с энергией активации 30 ± 2 ккал/г·атом (рис. 2).

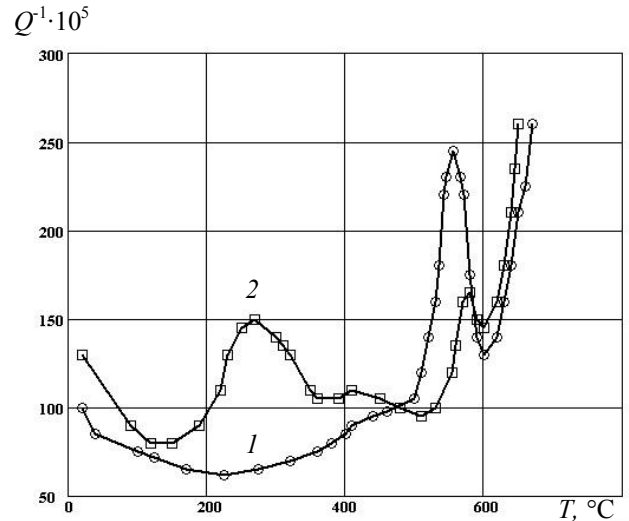


Рис. 2. Влияние скорости охлаждения (температура закалки 1150 °С, 4 ч) на температурную зависимость внутреннего трения:

1 – охлаждение на воздухе; 2 – охлаждение в воде

Энергия активации релаксационных процессов определяли по формуле Верта-Маркса. Появление аналогичного пика наблюдается при температуре 310 °С в образце, закаленном на воздухе с 1200 °С (рис. 3). При понижении температуры закалки до 1100 °С пик в этом интервале температур не наблюдается. С повышением температуры до 1250 °С резко возрастает фон внутреннего трения, на кривой $Q^{-1}(T)$ имеется ярко выраженный максимум при 200 °С (эффект Финкельштейна–Розина). Значительная высота его объясняется увеличением количества свободного углерода за счет растворения карбидных частиц, обогащающих твердый раствор с повышением температуры закалки.

Эта зависимость для образцов, закаленных на воздухе с 1200 °С, и для образца, прошедшего закалку в воду с 1150 °С, имеет максимумы. Такое аномальное поведение амплитудной зависимости внутреннего трения в аустенитных сталях и в твердых растворах с г.ц.к. структурой связана с наличием широких дефектов упаковки, что даже приводит к ярко выраженной аномалии кривой $Q^{-1}(T)$, проявляющейся в из-

менении пика Финкельштейна–Розина, за счет появления дополнительно пика, который накладывается на указанный.

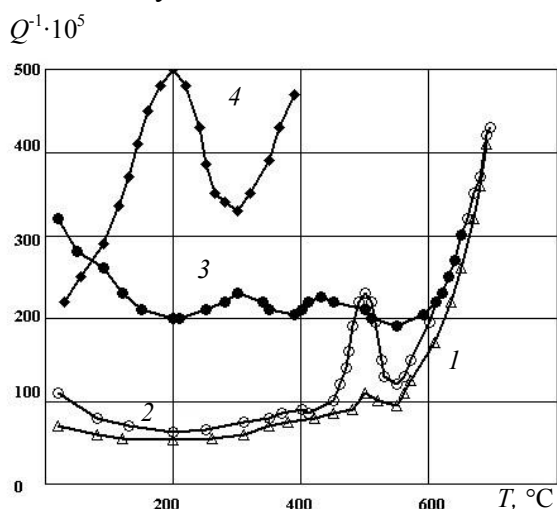


Рис. 3. Влияние температуры закалки (охлаждение на воздухе) на температурную зависимость внутреннего трения:

1 – 1100 °C; 2 – 1150 °C; 3 – 1200 °C; 4 – 1250 °C

В исследуемом сплаве такая связь между 300 °C максимумом и аномалией кривой $Q^{-1}(\epsilon)$ наблюдается, но с одним отличием, касающимся природы релаксации, вызвавшей пик. В аустенитных сталях образование пика связано с суперпозицией двух процессов: миграцией атомов углерода в аустените и взаимодействием внедренных атомов с дислокациями [4]. В рассматриваемом случае максимум затухания объясняется этим же механизмом, однако взаимодействие внедренных атомов происходит с расщепленными дислокациями, которые характерны для твердых растворов с г.ц.к. структурой [5].

В пользу того, что взаимодействие атомов внедрения происходит с расщепленными дислокациями, говорит появление аномалии на кривых $Q^{-1}(\epsilon)$, которые связаны с широкими дефектами упаковки. Для закаленных образцов характерно появление максимума в области комнатных температур. При нагреве до 200 °C фиксируется его нисходящая ветвь (см. рис. 2, 3). При старении пик полностью устраняется.

Рассматривая температурный интервал 400...600 °C закаленных образцов, следует отметить два максимума затухания, которые в результате последующего старения уменьшаются. Энергии активации первого и второго пиков соответственно равны 39 и 46±2 ккал/г·атом. Пик обусловлен вязким течением по границам зерен. Высота его, ширина и температура появления характеризуют подвижность атомов, рас-

положенных на границах зерен в поле напряжений, что дает возможность представить состояние границ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гадалов, В.Н. Электроискровое легирование поверхности сплавов на основе никеля и титана / В.Н. Гадалов, С.Г. Емельянов, Н.М. Игнатенко, И.В. Ворначева, В.И. Савельев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2016. – № 1 (18). – С. 9–20.
2. Гадалов, В.Н. Уточнение эффективности стандартной термической обработки стали марки 30ХГСА / В.Н. Гадалов, А.В. Фролов, В.И. Муравьев, И.В. Ворначева, Т.Н. Розина // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 2 (50). – С. 121–128.
3. Головин, С.А., Головин, И.С. Внутреннее трение и механическая спектроскопия металлов и сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – №5. – С. 3–11.
4. Гадалов, В.Н. Особенности полигонизации и рекристаллизации в медных микрокристаллах: монография / В.Н. Гадалов, А.В. Филонович, Д.Н. Романенко, И.В. Ворначева. – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга». 2016. – 92 с.
5. Гадалов, В.Н. Упрочнение и разупрочнение кристаллов меди и алюминия / В.Н. Гадалов, А.В. Филонович, И.В. Ворначева. – Deutschland, Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing. 2016. – 110 с.

REFERENCES

1. Gadalov, V.N. Alloy surface electro-spark alloying based on nickel and titanium / V.N. Gadalov, S.G. Yemeliyanov, N.M., Ignatenko, I.V. Vornachyova, V.I. Saveliev // *Proceedings of South-Western State University. Series: Techniques and Engineering*. – 2016. – No. 1(18). – pp. 9-20.
2. Gadalov, V.N. Updating of common thermal treatment efficiency of steel 30HGSA / V.N. Gadalov, A.V. Frolov, V.I. Muraviyov, I.V. Vornachyova, T.N. Rozina // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2016. – No. 2 (50). – pp. – 121-128.
3. Golovin, S.A., Golovin, I.S. Inner friction and mechanical spectroscopy of metals and alloys // *Metal Science and Metal Thermal Treatment*. – 2012. – No.5. – pp. 3-11.
4. Gadalov, V.N. *Peculiarities of Cell Formation and Recrystallization in Copper Micro-Crystals*: monograph / V.N. Gadalov, A.V. Filonovich, D.N. Romanenko, I.V. Vornachyova. – Kursk: Publishing House of CC “University Book”. 2016. – pp. 92.
5. Gadalov, V.N. *Strengthening and Softening of Copper and Aluminum Crystals* / V.N. Gadalov, A.V. Filonovich, I.V. Vornachyova. - Deutschland, Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing. 2016. – pp. 110.

Рецензент д.т.н. Н.А. Корневский