

УДК 620.18; 669.2/.8.017

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТОК
НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СПЛАВА 40ХНЮ-ВИ

С.А. Яковлева, А.Г. Щербак

Исследованы основные свойства дисперсионно-твердеющего сплава 40ХНЮ-ВИ, влияние режимов последовательных термических обработок на его структурно-фазовое состояние, а также на механические свойства, в том числе на характеристики размерной стабильности, которые определяют получение и сохранение высокой точности прецизионных деталей газового подшипника поплавкового гироскопа. Установлены оптимальные режимы закалки сплава и выявлена корреляция условий старения и показателей размерной стабильности, таких как прецизионный предел упругости $\sigma_{0,0001}$. Определен диапазон температур старения 400–550°С, который является перспективным для получения повышенных значений прецизионного предела упругости с сохранением требуемого уровня пластичности сплава.

Ключевые слова: размерная стабильность, дисперсионно-твердеющий сплав, микроструктура, прецизионный предел упругости, закалка, старение.

Введение

В настоящее время прецизионные гироскопические приборы, такие как поплавковые гироскопы, достигли исключительно высокой точности, которую они должны обеспечивать в течение всего рабочего ресурса без какой-либо регулировки. Одним из важнейших узлов поплавкового гироскопа является гиromотор, который выполняет функцию носителя кинетического момента и представляет собой ротор, разгоняемый статором и взвешенный с помощью газодинамических обращенных подшипников. Постоянство рабочего зазора между деталями подшипника является одним из основных факторов, определяющих надежность и точностные характеристики как гиromотора, так и прибора в целом [1]. В связи с этим к прецизионным деталям газового подшипника, которые изготавливаются из дисперсионно-твердеющего сплава 40ХНЮ-ВИ, предъявляются требования по геометрической точности размеров и формы на уровне десятых долей микрометра, которая должна сохраняться в течение длительного периода эксплуатации при осевом вращении со скоростью 12000 об/мин при рабочей температуре 55°С.

На сегодняшний день высокая точность прибора и постоянство рабочих характеристик в течение периода хранения, постановки прибора в навигационную систему и эксплуатации обеспечиваются в недостаточной степени. Исследование стабильности геометрических параметров деталей подшипникового узла показало, что даже при вылеживании при комнатной температуре на части деталей происходит изменение их формы: в течение года отклонение от круглости сферической поверхности деталей меняется от 0,3 мкм до 0,8 мкм.

Основной причиной изменения геометрических параметров прецизионных деталей, изготовленных из металлических сплавов, является энергетическая метастабильность структурно-фазового состояния сплава, как термодинамической системы, связанная с наличием структурных остаточных напряжений, возникающих в результате термической, механической и других видов обработок. При переходе сплава (под действием рабочих нагрузок, вибраций, температуры) в более стабильное энергетическое состояние происходит релаксация напряжений, приводящая к деформации детали [2]. По этой причине для сохранения высоких точностей прецизионных деталей газового подшипника поплавкового гироскопа в течение длительного времени необходимо повышение размерной стабильности сплава 40ХНЮ-ВИ и разработка технологии изготовления деталей, обеспечивающей уровень остаточных напряжений, не превышающих значений характеристик стабильности сплава.

Можно считать, что совершенствование режимов термической обработки позволит получить микроструктуру сплава, при которой обеспечивается требуемая стабильность размеров и достигается заданный уровень механических свойств. Выявление критериев, связывающих параметры микроструктуры с характеристиками размерной стабильности сплава, позволит выбирать более эффективные режимы термической обработки при проектировании технологического процесса изготовления прецизионных деталей.

Целью работы является исследование влияния режимов термических обработок сплава 40ХНЮ-ВИ на его структурно-фазовое состояние и показатели размерной стабильности для определения режимов, обеспечивающих повышение стабильности геометрических параметров прецизионных деталей и получение требуемых прочностных свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- выявление микроструктурных параметров и характеристик, определяющих размерную стабильность дисперсионно-твердеющего сплава;

– исследование влияния режимов термообработок, включающих закалку и старение (дисперсионное твердение), на формирование микроструктуры сплава 40ХНЮ-ВИ и на его механические характеристики, в том числе характеристики размерной стабильности.

Характеристика сплава 40ХНЮ-ВИ

Сплав 40ХНЮ-ВИ является дисперсионно-твердеющим на основе системы хром–никель, содержащий 39–40% хрома, 3,5–3,8% алюминия, остальное – никель. В сплаве возможно присутствие следующих фаз: α -Cr, γ -Ni, γ' – интерметаллид Ni_3Al [3].

По существующей технологии изготовления деталей сплав подвергается следующей термообработке: закалка (нагрев до 1150°C с выдержкой после полного прогрева 30 мин, быстрое охлаждение в воде) и старение (дисперсионное твердение) в вакууме при температуре 760°C, выдержка 5 ч.

После закалки сплав представляет собой γ -Ni твердый раствор с включениями первичной фазы α -Cr (рис. 1, а). Размер кристаллического зерна матрицы составляет 10–25 мкм. После старения сплав содержит три фазы: помимо γ -Ni и α -Cr присутствует интерметаллидная фаза γ' – Ni_3Al (рис. 1, б).

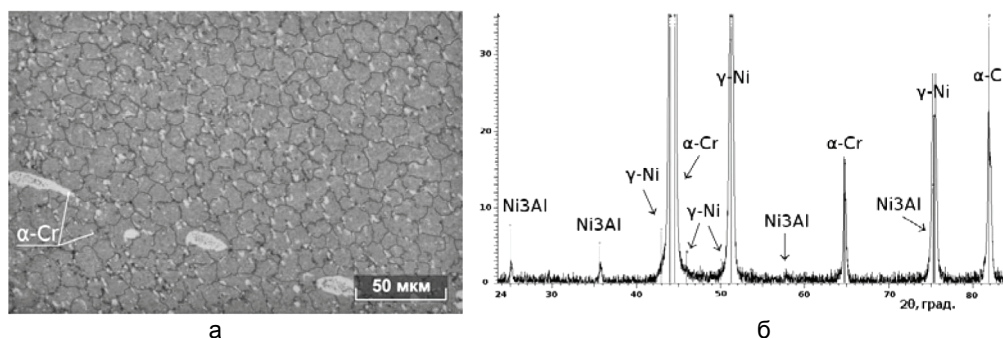


Рис. 1. Микроструктура сплава 40ХНЮ-ВИ в закаленном состоянии (а); фрагмент дифрактограммы образца после старения (б)

Как видно на рис. 1, а, частицы α -фазы сохраняются в закаленном состоянии и присутствуют в форме достаточно крупных вытянутых включений и в виде сферических выделений, расположенных как в теле, так и по границам зерен.

Факторы, определяющие размерную стабильность дисперсионно-твердеющего сплава

Этап 1 – закалка. На этапе закалки необходимо перевести различные составляющие сплава в твердый γ -раствор с тем, чтобы при последующей операции старения произошло выделение интерметаллидной фазы при пониженных температурах в высокодисперсном состоянии. Сохранение в закаленном состоянии включений фазы α -Cr значительно влияет на последующие процессы распада матрицы и равномерность выделения интерметаллидных частиц и соответственно на изотропность материала и его свойства, в том числе на сопротивление микропластическим деформациям, которое является характеристикой размерной стабильности сплава и, как следствие, изготавливаемых прецизионных деталей.

Для улучшения показателей стабильности дисперсионно-твердеющего сплава необходимо обеспечение следующих условий:

- получение однофазного твердого раствора (исключение фазы α -Cr);
- сохранение размера зерна.

В то же время на основании анализа изотермических разрезов тройной системы Al-Cr-Ni при разных температурах [4] можно сделать вывод, что при достижении системой фазового равновесия температура закалки сплава 1150° достаточна для растворения α -фазы и перехода системы в однофазную область.

Этап 2 – старение. Показатели сопротивления микропластическим деформациям сплава во многом характеризуют стабильность его размеров. Чем больше напряжение, при котором начинается пластическое течение материала, т.е. движение дислокаций, тем выше его размерная стабильность. В связи с этим для повышения характеристик стабильности дисперсионно-твердеющего сплава на этапе старения необходимо создавать эффективные препятствия для движения дислокаций.

Как известно, дислокации могут преодолевать эти препятствия или перерезая их, или обходя вокруг [5]. При действии механизма перерезания деформация идет по меньшему числу систем скольжения, где действуют достаточно высокие приведенные напряжения сдвига, поэтому повышаются значения напряжения, необходимого для начала пластической деформации. Для реализации этого механизма и, следовательно, получения более высоких значений сопротивления микропластическим деформациям в качестве основных параметров оптимальной микроструктуры, с учетом данных работ [5, 6], можно определить следующие:

- частичная когерентность структур выделения и их дисперсность;
- минимизация расстояния между частицами, чтобы дислокация не могла пройти между ними;
- равномерное распределение частиц выделений по объему сплава.

Такая микроструктура обычно характерна для ранних стадий старения.

Исследование влияния режимов термообработок на структурно-фазовое состояние и механические свойства сплава 40ХНЮ-ВИ

Этап 1 – закалка. Для исключения α -фазы исследовалось изменение микроструктуры сплава при повышении температуры закалки до 1200°C, так как более высокая температура закалки способствует более полному прохождению диффузионных процессов. Как показали практические результаты, хотя с увеличением температуры закалки на 50°C объемная доля α -фазы уменьшается с 5,45% до 1,2%, но происходит значительный рост зерна: закалка от 1150°C (рис. 2, а) – зерно 10–25 мкм, от 1200°C (рис. 2, б) – 20–100 мкм.

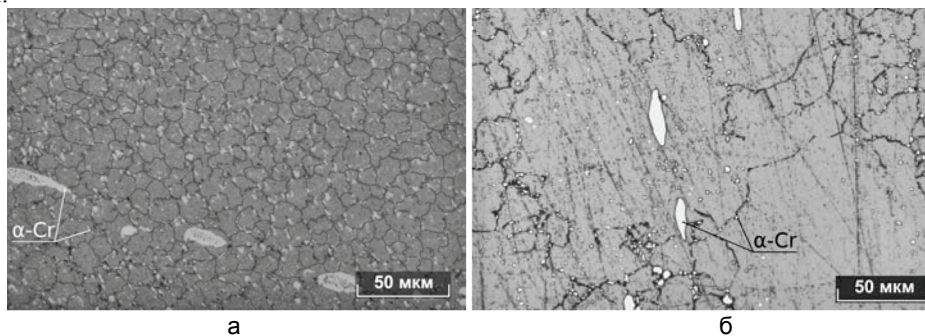


Рис. 2. Микроструктура сплава 40ХНЮ-ВИ после закалки: от 1150°C, выдержка 30 мин (а); от 1200°C, выдержка 30 мин (б)

Увеличение времени выдержки при закалке от 1200°C до 2,5 ч также не приводит к полному растворению α -фазы, а способствует дальнейшему росту зерна, что связано с рекристаллизацией, и отрицательно сказывается на пластичности сплава после последующего старения, сводя ее практически до нуля. В этом случае наиболее эффективной для закалки является температура 1150°C, позволяющая сохранить мелкое зерно и, что согласуется с теоретическими данными (изотермические разрезы тройных систем), получить однофазный раствор. Для достижения системой максимально равновесного состояния и полного растворения α -фазы при этой температуре закалки исследовалось влияние времени выдержки на микроструктуру сплава.

На рис. 3 приведена микроструктура сплава после закалки от 1150°C с выдержкой при закалке в течение 10 ч.

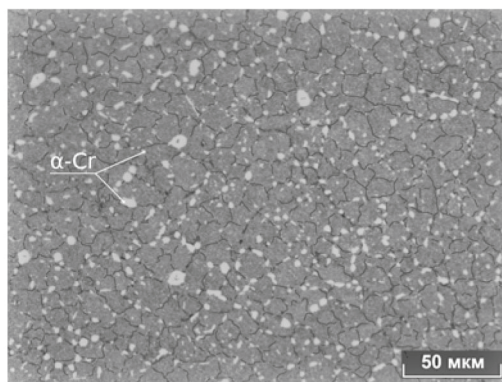


Рис. 3. Микроструктура сплава 40ХНЮ-ВИ после закалки от 1150°C, выдержка 10 ч

С увеличением времени выдержки при закалке происходит растворение мелких частиц α -Cr и укрупнение частиц на границах зерен. Данные рентгеноструктурного анализа показывают, что доля α -фазы уменьшается с 5,45% (при выдержке 30 мин) до 4,2% при выдержке 10 ч. Все это свидетельствует о крайне медленных диффузионных процессах, что делает увеличение времени выдержки под закалку как способ растворения α -фазы, недостаточно эффективным.

Для получения однофазного γ -твердого раствора может являться эффективным применение метода высокотемпературной термоциклической обработки сплава, который за счет интенсификации процессов диффузии, фазовых и структурных превращений позволит сократить длительность термической обра-

ботки и растворить выделения α -фазы, что положительно скажется на свойствах сплава после старения, в том числе на его размерной стабильности.

Этап 2 – старение. Рентгеноструктурные исследования закаленных и состаренных образцов показывают (рис. 4, а), что при старении происходит распад γ -твердого раствора с выделением интерметаллида Ni_3Al и фазы α -Cr. Причем, объемное содержание и распределение преимущественно по границам или в теле зерна фазы α -Cr в закаленном состоянии влияет на процессы распада и соотношение объемных долей выделяющихся фаз – α -фазы и интерметаллидной. В связи с этим для операции закалки важно предусмотреть дополнительные термические обработки, которые позволили бы уменьшить долю первичной α -фазы и не приводили бы к укрупнению зерна матрицы. Но, даже если в производственных условиях такие режимы будут малоприменимы, улучшить показатели размерной стабильности сплава можно за счет правильного выбора режимов старения.

В работе исследовалось изменение механических характеристик, таких как твердость и относительное удлинение, в зависимости от температуры старения при одинаковых выдержках 5 ч и предварительной закалке с 1150°C . Результаты изменения этих свойств представлены на рис. 4, б, где отражены как экспериментальные данные, так и значения из известных источников [2].

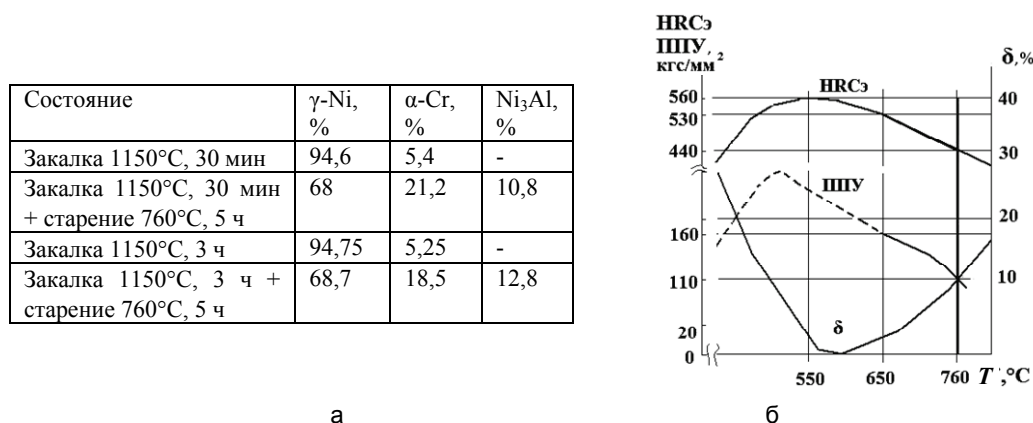


Рис. 4. Результаты рентгеноструктурных исследований (а); изменение свойств сплава 40ХНЮ-ВИ от температуры старения, закалка с 1150°C (б) (пунктиром выделено предположительное изменение ППУ)

В качестве характеристики размерной стабильности сплава измерялся прецизионный предел упругости (ППУ) $\sigma_{0,0001}$. Значение ППУ для сплава, состаренного при 760°C , составило 1120 МПа, а для режима 650°C – 1615 МПа. На основе аналитических расчетов и предположений и результатов известных экспериментальных исследований других дисперсионно-твердеющих сплавов [7] была построена кривая изменения ППУ (показана пунктиром), где пик значений приходится на начальные стадии процесса старения, позволяющие создавать в микроструктуре сплава эффективные препятствия для движения дислокаций и повышать напряжения начала пластической деформации. Следует отметить, что пик ППУ будет более острым и не полностью совпадающим с пиком твердости (57–60 HRC₃), так как ППУ характеризует поведение сплава в микрообъемах и является более чувствительным к структурным и фазовым изменениям, чем твердость, которая является относительно условным показателем происходящих в сплаве процессов.

В настоящее время старение проводится при температуре 760°C с выдержкой 5 ч. Этот режим соответствует стадиям перестаривания сплава, поэтому интерметаллидные частицы некогерентны матрице, расстояние между ними достаточно большое, и движущиеся дислокации обходят частицы; соответственно, пластическая деформация начинается при сравнительно меньших напряжениях, что снижает размерную стабильность сплава.

Перспективной областью исследования температур старения, позволяющих повысить размерную стабильность сплава и соответственно повысить стабильность геометрических параметров прецизионных деталей, является диапазон 400 – 550°C . Эти ранние стадии процесса старения позволяют формировать структуру сплава, более близкую к структуре, соответствующей высоким значениям характеристик размерной стабильности при сохранении значений относительного удлинения. По этой причине в дальнейшем целесообразно исследовать именно этот диапазон температур с определением величин времени выдержки при старении, оптимальных с точки зрения образования когерентных или полукogerентных частиц, чтобы достигнуть максимального ППУ сплава 40ХНЮ-ВИ без снижения его пластичности (и относительного удлинения δ как показателя пластичности), а соответственно – и более высокой размерной стабильности прецизионных деталей газового подшипника поплавокoвого гироскопа, изготавливаемых из этого сплава.

Заключение

В результате проведенной работы исследованы основные свойства сплава 40ХНЮ-ВИ, влияние режимов термических операций закалки и старения на его структурно-фазовое состояние, а также на механические свойства, в том числе на характеристики размерной стабильности, которые важны для сохранения высоких точностей прецизионных деталей газового подшипника поплавкового гироскопа.

Выявлено, что наилучшим режимом закалки сплава является температура 1150°C с выдержкой 30 мин после полного прогрева заготовки. Установлено, что увеличение времени выдержки при закалке до 10 ч в незначительной мере обеспечивает растворение включений первичной фазы α -Cr, также как и повышение температуры закалки до 1200°C, приводящее к резкому росту зерна и ухудшению пластических свойств сплава. Перспективным для улучшения свойств размерной стабильности является дальнейшее исследование и применение дополнительных термических операций, таких как, например, высокотемпературная термоциклическая обработка.

Установлено, что применяемый в технологии изготовления прецизионных деталей режим старения при температуре 760°C с выдержкой 5 ч требует уточнения, поскольку не обеспечивает достаточно высокие параметры размерной стабильности сплава, такие как ППУ, необходимые для формообразования прецизионных узлов поплавкового гироскопа и сохранения их точности в течение длительного времени эксплуатации. Определен диапазон температур 400–550°C, который является перспективным для получения повышенных значений ППУ с сохранением пластичности сплава и требует дальнейшего исследования с установлением оптимальной температуры и времени выдержки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 10-08-00158а.

Литература

1. Сипенков И.Е., Филиппов А.Ю., Болдырев Ю.Я., Григорьев Б.С., Заблоцкий Н.Д., Лучин Г.А., Панич Т.В. Прецизионные газовые подшипники. – СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2007. – 504 с.
2. Марингер (Maringer R.E.), Имгрэм (Imgram A.G.). Влияние некоторых факторов на стабильность размеров (Effects of Some Processing Variables on Dimensional Stability) // Проблемы трения и смазки: Пер. с англ. – М.: 1968. – № 4. – С. 212–215.
3. Молотилов Б.В. Прецизионные сплавы. – М.: Металлургия, 1983. – 439 с.
4. Raghavan V. Aluminum – Chromium – Nickel // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2006. – V. 27. – № 4. – P. 381–388.
5. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов: Пер. с англ. – М., 1972. – 408 с.
6. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 392 с.
7. Хенкин М.Л., Локшин И.Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. – М.: Машиностроение, 1974. – 255 с.

Яковлева Светлана Анатольевна – ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», аспирант, yorkunoi@gmail.com
Щербак Александр Григорьевич – ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, a_sch@gtn.ru