

*Л. А. Мальцева, В. А. Шарапова, Н. Н. Озерец,  
Т. В. Мальцева, А. В. Левина, Д. И. Степанов*  
УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург  
*m1a44@mail.ru*

## **СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ ПРИ НАГРЕВЕ И ОХЛАЖДЕНИИ**

Изучены особенности формирования структуры и физико-механических свойств сложнолегированных метастабильных аустенитных сталей, различающихся содержанием кобальта, происходящие при нагревах и охлаждении.

*Ключевые слова:* аустенит,  $\delta$ -феррит, двойникование, скольжение, мартенситные превращения, твердость, прочность, фазовый состав.

Peculiarities of structure and physic-mechanical properties of metastable austenitic steels complexly, different cobalt content occurring during heating and cooling are studied in their work.

*Keywords:* austenite,  $\delta$ -ferrite, twinning, sliding, martensitic transformations, hardness, strength, phase composition.

В связи с современной тенденцией промышленности на миниатюризацию изделий возникает необходимость создания новых инструментов, в том числе микрохирургических, а также упругих элементов и пружин для точного машиностроения и приборостроения, изготовленных из тонкой или тончайшей проволоки. Наиболее важным в их создании является выбор материалов, которые бы значительно повышали качество, надежность, срок службы и функциональные свойства. Применяемые в настоящее время в промышленности коррозионностойкие стали мартенситного класса 30X13, 40X13 и аустенитного класса 12X18H10T не всегда удовлетворяют требованиям по обеспечению необходимых прочностных свойств, а также не обладают достаточной технологичностью для получения проволоки тонких и тончайших сечений. Для упругих элементов, пружин и других изделий машиностроения была разработана практически безуглеродистая аустенитная сталь на Fe-Cr-Ni-основе, дополнительно легированная молибденом, титаном, алюминием и кобальтом – 03X14H11K5M2ЮТ [1–3]. Низкое содержание углерода, наличие деформационно-метастабильного аустенита и явно выраженный трип-эффект, который имеет место в этой стали [2, 3], являются одними из факторов, определяющих ее высокую технологичность, что позволяет проводить холодную пластическую деформацию с чрезвычайно высокими степенями обжатия и существенно

уменьшить число промежуточных смягчающих обработок при производстве изделий или полуфабрикатов. Следует отметить, что в случае низкой металлоемкости изделий усложнение химического состава не приводит к повышению его себестоимости, в то время как уменьшение числа промежуточных смягчающих обработок существенно снижает себестоимость изделия.

Данная работа является продолжением цикла работ, связанных с разработкой составов аустенитных сталей с заданными функциональными и прочностными свойствами и исследованием их поведения в условиях, приближенных к эксплуатационным. Известно, что формирование высокопрочного состояния в аустенитных сталях с метастабильной структурой обеспечивается проведением термопластических обработок, включающих закалку на пересыщенный  $\gamma$ -твердый раствор, последующую холодную пластическую деформацию и заключительное последеформационное старение.

Предварительные исследования, проведенные на сталях (Fe-Cr-Ni-Co-Mo-Al-Ti) системы легирования показали, что оптимальной, с точки зрения формирования лучшего комплекса физико-механических свойств для проведения последующей холодной пластической деформации, является закалка от температуры 1000 °С в воду. Показано [4], что кобальт в этих сталях в количестве 4,5...5,0 % приводит к практически полному подавлению образования  $\delta$ -феррита. Определены температурные интервалы существования нежелательной с точки зрения выбранной технологии  $\chi$ -фазы – 700...1000 °С. Для указанных сталей холодное волочение не только обеспечивает получение проволочной заготовки заданного размера, но и является эффективным способом структурного упрочнения и формирования служебных свойств будущего изделия. Однако роль кобальта в формировании структуры и комплекса свойств в исследуемой стали изучена недостаточно. Поэтому с целью выявления роли кобальта в формировании структуры и физико-механических свойств коррозионностойких аустенитных сталей (Fe-Cr-Ni-Co-Mo-Al-Ti) системы легирования при различных видах и степенях упругопластической деформации, в данной работе было проведено сравнительное исследование фазовых превращений, структурных изменений и физико-механических свойств сталей с содержанием кобальта 5 % (03X14H11K5M2ЮТ) и 1 % (03X14H11KM2ЮТ).

По данным рентгеноструктурного анализа в структуре закаленной стали 03X14H11K5M2ЮТ содержится не более 2 % ОЦК-фазы ( $\delta$ -феррита), в то время как в стали 03X14H11KM2ЮТ – около 10 %. Механические свойства исследуемых сталей в закаленном состоянии 03X14H11K5M2ЮТ и 03X14H11KM2ЮТ обладают также повышенным запасом пластичности вследствие высокой плотности легкоподвижных дислокаций и низкого содержания примесей внедрения, что позволяет осуществлять на них холодную пластическую деформацию с высокими

степенями обжатия. Повышение прочностных и снижение пластических свойств при волочении главным образом определяется увеличением плотности дислокаций, т. е. деформационным наклепом. Однако немаловажный вклад в изменение свойств исследуемых сталей вносит образование мартенсита деформации. Отличие в величине упрочнения двух исследуемых сталей при невысоких степенях деформации обусловлено особенностями их легирования. В сталях с пониженным содержанием кобальта при небольших степенях деформации наблюдается бóльшая интенсивность мартенситообразования, приводящая к более значительному упрочнению. Сталь с повышенным содержанием кобальта (5,0 %) обладает большим запасом пластичности и повышенной технологичности и ее удалось протянуть до более высоких степеней деформации без потери пластичности. По-видимому, при легировании кобальтом ~ 5,0 % область начала образования  $\alpha$ -мартенсита сдвигается в сторону больших деформаций, способствуя сохранению пластичности до более высоких степеней обжатия за счет протекания  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения.

С целью изучения температурных интервалов выделения упрочняющих и высокотемпературных фаз в холоднодеформированных сталях были проведены исследования дифференциальной сканирующей калориметрией. Анализ кривых ДСК нагрева закаленных и холоднодеформированных образцов, позволяет отметить появление значительных экзо- и эндоэффектов в области низких температур 350–650 °С, которые связаны с выделением интерметаллидной фазы из ОЦК-твердого раствора мартенсита деформации с последующим ее растворением ( $\alpha \rightarrow \text{NiAl}$ ) и распадом  $\gamma$ -твердого раствора ( $\gamma \rightarrow \text{NiAl}$ ).

Традиционно распад пересыщенных твердых растворов на основе ГЦК фазы протекает при более высоких температурах, чем распад пересыщенных твердых растворов на основе ОЦК- фаз. Это достаточно четко проявляется при сопоставлении кривых ДСК закаленных и холоднодеформированных образцов.

Тепловой эффект при температурах выше 500 °С, а также данные по изменению кристаллической решетки  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз, свидетельствуют об интенсивном протекании перераспределения легирующих элементов в сторону взаимного обмена аустенито- и ферритообразующими элементами между ОЦК и ГЦК фазами. Этот процесс должен привести к появлению свежего ревертированного аустенита.

Размытый в интервале температур 700–1000 °С экзотермический эффект максимальной площади связан с наложением протекания  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения и, по-видимому, как отмечалось для закаленной стали, выделением  $\chi$ -фазы в результате распада  $\delta$ -феррита ( $\delta \rightarrow \chi + \gamma$ ) и из  $\gamma$ -твердого раствора, с дальнейшим растворением выделившейся интерметаллидной фазы, очевидно, по реакции:  $\chi \rightarrow \delta + \gamma$ .

Обнаружено также наличие высокотемпературного пика в деформированной стали с пониженным содержанием кобальта, свидетельствующего о процессах образования высокотемпературного  $\delta$ -феррита. Увеличение площади низкотемпературного экзоэффекта, по сравнению с закаленным состоянием, очевидно, связано с увеличением объемной доли выделяющихся интерметаллидных фаз в результате распада ОЦК-твердого раствора, появление которого обусловлено действием пластической деформации.

С целью уточнения температурных интервалов и выяснения морфологии выделяющихся фаз была проведена высокотемпературная рентгенография холоднодеформированных образцов. Терморентгенография деформированных образцов при нагреве в интервале температур 30–950 °С показала наличие в структуре, кроме аустенита, ОЦК-мартенсита деформации и высокотемпературной (выше 600 °С) интерметаллидной  $\chi$ -фазы. Следует отметить существование ОЦК-фазы (мартенсита деформации) лишь до температуры 600 °С. Так как изначально в стали плавки 5 отмечалось существенное (по сравнению с плавкой 4) количество  $\delta$ -феррита, следовательно, при температурах выше 600 °С в плавке с пониженным содержанием кобальта происходит распад  $\delta$ -феррита на  $\gamma$ - и  $\chi$ -фазы.  $\chi$ -фаза может выделяться и из аустенита, температурным интервалом ее существования для сталей обеих групп легирования является интервал температур 700–1000 °С.

Нагрев в температурный интервал выделения  $\chi$ -фазы является нежелательным. Учитывая технологические параметры получения высокопрочного состояния в метастабильных аустенитных сталях, попадание в этот температурный интервал 800–900 °С является маловероятным. Выделение упрочняющей интерметаллидной фазы в результате низкотемпературного старения холоднодеформированной проволоки напротив, является желательным.

*Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № Н977.42Г.024/14)*

### **Список литературы**

1. Мальцева Л. А., Озерец Н. Н., Шарпова В. А., Мальцева Т. В., Левина А. В., Цаплина Е. М. Коррозионно-стойкая аустенитная сталь. Патент РФ № 2430187 от 27.09.2011.
2. Мальцева Л. А. Закономерности фазовых и структурных превращений в безуглеродистых высокопрочных сталях на Fe-Cr-Ni-Co-Mo-Ni основе / Л. А. Мальцева // Журнал функциональных материалов. 2007. № 2. С. 75–79.
3. Corrosion-resistant austenitic steels for elastic elements / L. A. Maltseva, T. V. Maltseva, V. A. Sharapova, N. N. Ozerets, K. D. Khramtsova, M. P. Tretnikova // Emerging Materials Research. Vol. 2. Is. 4. June 2013. P. 207–215.

4. Роль кобальта в формировании структуры и физико-механических свойств аустенитных сталей после различных упругопластических деформаций / Л. А. Мальцева, С. М. Задворкин, В. А. Шарапова, Н. Н. Озерец, Т. В. Мальцева, Л. М. Горулева // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 5 (684). С. 23–31.