

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента**

**доктора технических наук, профессора Гузанова Бориса Николаевича на диссертацию Вахониной Ксении Дмитриевны «Влияние деформационных обработок на структуру, механические и служебные свойства метастабильных аустенитных сталей на Fe-Cr-Ni-основе», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов**

Эксплуатация пружин и других упругих элементов весьма часто сопряжена с работой в экстремальных условиях при повышенных или отрицательных температурах, что вызывает необходимость обеспечения определенных физико-механических и химических свойств материалов. Все это требует в материаловедении новых технических решений при разработке сталей и сплавов специального назначения, где весьма успешно зарекомендовали себя в качестве коррозионностойких пружинных материалов аустенитные метастабильные стали, упрочняемые пластической деформацией и старением с выделением избыточных карбидных или интерметаллидных фаз.

Поскольку упругие элементы изготавливают путем навивки, резки, вырубки проволоки или ленты, обязательным этапом технологического процесса становится деформационная обработка материала для получения заготовок нужных размеров. При производстве проволоки тонких диаметров не возникает технологических проблем, поскольку волочение обеспечивает и деформационное упрочнение стали, и получение требуемого диаметра. Для изготовления проволочных заготовок средних и больших диаметров (4,0-6,0 мм) из метастабильных аустенитных сталей необходим иной подход, заключающийся в упрочнении заготовки без существенного изменения размеров поперечного сечения.

В этом смысле диссертационную работу Вахониной Ксении Дмитриевны «Влияние деформационных обработок на структуру, механические и служебные свойства метастабильных аустенитных сталей на Fe-Cr-Ni-основе», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, можно считать весьма своевременной и отвечающей современным представлениям теории и практики материаловедения. Остановлюсь более подробно на основных оценочных показателях, рекомендуемых ВАК России при анализе диссертационного исследования.

## **1. Актуальность выбранной темы**

Поскольку при производстве высокопрочной проволоки для пружин и других упругих элементов ответственного назначения холодная пластическая деформация волочением неизбежно приводит к уменьшению диаметра проволочной заготовки, важной задачей становится разработка технологии получения высокопрочной проволоки больших и средних диаметров с требуемым уровнем механических и эксплуатационных свойств. Диссертационное исследование Вахоиной К.Д., направленное на решение этой научно-практической задачи путем применения комбинированной деформационной обработки, сочетающей равноканальное угловое прессование (РКУП) и последующее волочение, основанное на комплексном исследовании структуры и физико-механических свойств, является, несомненно, актуальным и весьма важным с точки зрения отечественного приборостроения и машиностроения. Следует отметить, что актуальность диссертационной работы обоснована автором с учетом анализа характеристик промышленных пружинных сталей и сплавов, а также практических исследований в области применения интенсивных пластических деформаций (ИПД) в современном материаловедении, что полностью раскрывает ее суть и не вызывает сомнений.

## **2. Краткое содержание диссертационного исследования**

Проведенный автором анализ научно-технической, нормативной и патентной литературы позволил выявить преимущества современных методов достижения высокопрочного состояния в сталях аустенитного класса и на этой основе сформулировать цель диссертационной работы, которая заключается в исследовании возможных механизмов структурообразования, фазового состава, физико-механических и служебных свойств сталей 03X14N11K5M2ЮТ и 03X14N11KM2ЮТ на разных этапах термической и деформационных обработок методами ИПД.

Для достижения поставленной цели исследования автор достаточно корректно определил следующие задачи:

1. Установление температурных интервалов и последовательности процессов образования и растворения интерметаллидных фаз для обоснованного выбора режимов горячей пластической деформации.

2. Определение деформационных режимов формирования субмикроструктурной (СМК) структуры в ходе РКУП и исследование структурно-фазовых превращений в процессе РКУП и последующего нагрева.

3. Исследование механических свойств и эволюции СМК структуры аустенитных сталей, сформированной в ходе РКУП с последующим волочением.

4. Изучение релаксационной стойкости исследуемых аустенитных сталей после оптимальной температурно-деформационной обработки при температурах возможной эксплуатации от криогенных до повышенных (400°C).

В соответствии с целью и поставленными задачами автор последовательно выполнил все запланированные исследования. При этом диссертация имеет четкую логику построения от общего к частному, от теоретического обоснования экспериментов к особенностям их практической реализации и анализу полученных результатов.

Структурно работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 138 страницах машинописного текста и проиллюстрирована 11 таблицами и 55 рисунками. Библиография содержит 111 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, показана степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе рассмотрены современные отечественные и зарубежные марки аустенитных сталей, описаны принципы легирования данного класса материалов. Проведен сравнительный анализ свойств и применения стабильных и метастабильных аустенитных сталей, классифицированы существующие критерии оценки степени стабильности аустенитной структуры. Проанализировано влияние термической и термомеханической обработки на возможность достижения высокопрочного состояния в метастабильных сталях и приведены особенности ведущих методов ИПД: кручение под давлением и РКУП.

Во второй главе представлены исследуемые материалы, режимы термической обработки и пластической деформации, методы исследования физико-механических свойств. Объектами диссертационного исследования выбраны две новые высоколегированные коррозионностойкие аустенитные метастабильные стали 03X14N11K5M2ЮТ и 03X14N11KM2ЮТ, отличающиеся по содержанию кобальта и алюминия. В работе используются традиционные методы исследования, такие как оптическая металлография, просвечивающая электронная микроскопия и рентгеноструктурный анализ, а также более современные – метод дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD-анализ) и терморентгенография, характеризующиеся высокой информативностью и наглядностью представления результатов.

В третьей главе изучены процессы, протекающие в закаленной стали 03X14N11K5M2ЮТ при повторном нагреве. Автором описан эксперимент с изотермической выдержкой при 900 °С и 750 °С предварительно перегретой при 1050 °С стали, который моделирует температурные условия проведения горячей пластической деформации. Следует отметить, что протекание фазовых превращений при нагреве с выделением низкотемпературных упрочняющих интерметаллидных фаз и высокотемпературных фаз Лавеса и  $\chi$ , отрицательно влияющих на пластичность стали, а также выделение  $\delta$ -феррита при изотермической выдержке, подтверждено использованием нескольких методов анализа и подробным изучением микроструктуры стали. Таким образом, рекомендации автора по температурным условиям горячей деформации исследуемой стали являются достаточно обоснованными.

В четвертой главе изучено влияние различных видов ИПД на фазовый состав, структуру и свойства объектов исследования. Показано, что при деформации волочением в обеих исследуемых сталях протекает  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение и растут прочностные показатели, но применение степеней обжатия более  $e = 4$  приводит к потере пластичности для стали с 1% кобальта. Деформация сдвигом под давлением также сопровождается полиморфным превращением, измельчением структуры и ростом микротвердости. Особый интерес представляют результаты после теплового РКУП, которые продемонстрировали частичное протекание динамической рекристаллизации в ходе деформации, сохранение однофазного аустенитного состояния структуры, ее существенное измельчение, повышение прочности. Важным обстоятельством является факт неизменности величины диаметра образца после РКУП и возможность применения холодной пластической деформации волочением, которая способствовала развитию рекристаллизационных процессов, частичному формированию мартенсита деформации, достижению высокопрочного состояния с сохранением пластичности. Последеформационное старение показало стабильность структуры, дополнительный рост предела текучести и временного сопротивления. Таким образом, на основе выполненных исследований предложена комбинированная обработка исследуемых метастабильных сталей с целью получения высокопрочной проволоки средних и больших сечений.

В пятой главе рассмотрено влияние отрицательных температур на характеристики сталей и изучены основные специфические свойства пружинных материалов: сопротивлением малым пластическим деформациям и релаксационная стойкость. Установлено, что стали являются

теплостойкими до 400 °С, релаксация напряжений при комнатной температуре и в жидком азоте не превышает 5%.

Диссертация Вахониной К.Д. представляет собой целенаправленное, развернутое описание содержания и результатов исследования влияния деформационных обработок на структуру и комплекс свойств метастабильных аустенитных сталей, предназначенных для изготовления проволочных заготовок упругих элементов. Проведенный анализ диссертации позволяет говорить о достаточной значимости и научной ценности представленных к защите результатов теоретических и экспериментальных работ.

### **3. Научная новизна и теоретическая значимость работы**

Диссертационная работа Вахониной К.Д. обладает новизной и представляет собой интересное, самостоятельное и достаточно ценное по своей научной и теоретической значимости исследование. Автором в результате комплекса экспериментальных исследований впервые было показано, что в при изотермической выдержке при 750 °С предварительно перегретой аустенитной стали снижается горячая деформируемость, что связано с выделением  $\delta$ -феррита. Установлено отсутствие фазовых превращений при РКУП и упрочнение стали за счет измельчения аустенитной структуры. Большой интерес представляет доказанное автором повышение прочности после РКУП и волочения, связанное с измельчением субструктуры и формированием до 35% мартенсита деформации, а также рост пластичности в результате протекания частичных процессов динамической рекристаллизации. Важными представляются определенные значения релаксационной стойкости сталей при 400 °С, 20 °С и -196 °С в течение 20 суток.

### **4. Практическая значимость и рекомендации по использованию**

Практическая ценность заключается в разработке нового способа комбинированной деформационной обработки (РКУП + волочение) для аустенитных метастабильных сталей 03X14H11K5M2ЮТ и 03X14H11KM2ЮТ, который в сочетании с последующим старением приводит к существенному повышению прочностных свойств и позволяет получать проволочные заготовки диаметром 4,0-6,0 мм. Показано, что после закалки, деформации и старения исследуемые стали характеризуются высокой стабильностью свойств и могут применяться для изготовления пружин, эксплуатируемых в широком интервале температур.

## **5. Степень достоверности и конкретное участие автора в получении результатов**

Для обоснования научных положений, рекомендаций и выводов исследования автор применил современную методологию научного поиска, соответствующего природе изучаемого объекта. Следует отметить, что достоверность полученных в работе результатов по изучению влияния деформационных обработок на структуру, механические и служебные свойства метастабильных аустенитных сталей обусловлена согласованностью с известными литературными данными, применением в совокупности широкого спектра современных металлографических методов исследования и планирования эксперимента.

Личный вклад диссертанта в представленной работе очевиден и сомнения не вызывает. При непосредственном участии автора разработана технология комплексной деформационной обработки метастабильных аустенитных сталей. Вахонина К.Д. выносит на защиту логически завершенное описание собственных теоретических исследований и обобщенные результаты экспериментальных работ, выполненных в рамках рассматриваемой проблемы.

## **6. Полнота изложения материалов в печати**

Автореферат диссертации с необходимой полнотой раскрывает ее содержание, публикации полностью соответствуют выбранной теме исследования и отражают направленность научных интересов автора и основное содержание работы. Положения и выводы диссертации прошли апробацию на международных и российских конференциях, опубликовано 30 печатных работ, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

## **7. Оценка содержания диссертации, замечания**

В целом диссертационная работа Вахониной К.Д. представляет собой интересное, самостоятельное и весьма ценное по своей научной и практической значимости исследование. Работа подчинена единой цели, выполнена последовательно и в большей части носит оригинальный характер. Диссертация изложена логично, грамотно и аргументировано.

Вместе с тем нельзя не отметить, что в данном достаточно интересном исследовании есть спорные моменты и недостатки. В качестве основных замечаний и возражений по работе можно выделить следующие:

1. В связи с чем установлен наилучший температурный интервал 1200-800 °С для проведения горячей пластической деформации исследуемой стали, если все испытания проведены в интервалах температур 1050-750 °С и 1050-900 °С?
2. С чем связано для стали с пониженным содержанием кобальта 03X14N11KM2ЮТ столь резкое повышение предела текучести  $\sigma_{0,2}$  при волочении по указанным режимам, что сопровождается для нее потерей пластичности?
3. Насколько возможна динамическая рекристаллизация в исследованных сталях при  $T = 400$  °С? Вероятнее образование субструктуры обусловлено полигонизацией.
4. В связи с чем для исследованных сталей дополнительное старение значительно увеличивает сопротивление стали релаксации, в то время как отмечается, что выделение вторичных фаз, в частности двойных карбидов типа  $(Me,Me)C$ , неоднозначно влияет на сопротивление релаксации, причем в зависимости от степени дисперсности частиц их влияние может носить и негативный характер, снижая релаксационную стойкость при достаточно крупных размерах частиц?

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки, в целом, весьма интересного исследования и носят в большей степени дискуссионный характер.

## **8. Научный уровень диссертации**

Диссертант владеет достаточным уровнем научной культуры, обладает весьма широким научно-техническим кругозором, демонстрирует самостоятельность суждений и умозаключений. Отмеченные замечания и возражения носят дискуссионный характер и не снижают в целом положительную оценку представленной Вахониной К.Д. диссертационной работы. Диссертация представляется мне целостной и завершенной, носит комплексный характер, а полученные научные и практические результаты имеют существенное значение для материаловедения.

## **9. Соответствие специальности**

Оценивая результаты проведенного Вахониной К.Д. исследования, следует отметить, что оно полностью соответствует специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов в области теоретических и экспериментальных исследований фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних

воздействиях, а также исследований влияния структуры на физические, механические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов, т.к. направлено на изучение влияния деформационных обработок на структуру, механические и служебные свойства метастабильных аустенитных сталей.

#### 10. Соответствие диссертации требованиям «Положения ВАК РФ»

Рецензируемая диссертация Вахоиной Ксении Дмитриевны «Влияние деформационных обработок на структуру, механические и служебные свойства метастабильных аустенитных сталей на Fe-Cr-Ni-основе» является законченной научно-исследовательской работой, имеющей несомненное значение как для теории, так и для практики материаловедения. Диссертация соответствует требованиям п.п. 9, 10, 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Вахоина Ксения Дмитриевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой металлургии, сварочного производства и методики профессионального обучения  
Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования  
«Российский государственный профессионально-педагогический университет»,

доктор технических наук, профессор

Борис Николаевич Гузанов

620012, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11

ФГАОУ ВО «РГППУ»

Телефон: 8 (343) 327-19-64

E-mail: [guzanov\\_bn@mail.ru](mailto:guzanov_bn@mail.ru)

Подпись Б.Н. Гузанова ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь Ученого совета  
университета

21.11.2016 г.

Марина Михайловна Кириллова