



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «УГАТУ»)

К. Маркса ул., д. 12, г.Уфа, 450008. Тел.: 7 (347) 294-38-29; 8-908-350-35-82, e-mail: [office@ugatu.su](mailto:office@ugatu.su); <http://www.ugatu.su>  
ОКПО 02069438, ОГРН 1030203899527, ИНН/КПП 0274023747/027401001

23.11.2021 № 1479/0341-13

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор по науке  
ФГБОУ ВО «УГАТУ»

д.т.н., профессор

Р.Д. Еникеев

2021г.



### ОТЗЫВ

ведущей организации ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на диссертационную работу Лебедева Михаила Алексеевича «Исследование формирования остаточных напряжений и текстуры в гетерогенных поверхностных слоях и покрытиях», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

#### Актуальность работы

Диссертационная работа Лебедева М.А., посвященная совершенствованию рентгеновских методик и выявлению закономерностей формирования остаточных напряжений и текстуры в сталях с гетерогенной структурой поверхностных слоев для повышения надежности их применения в машиностроении. Остаточные напряжения (ОН) играют важную роль в работоспособности изделий машиностроения. ОН формируются в результате непосредственно термических или деформационных воздействий, а также в результате вызванных этими воздействиями фазовых превращений, сопровождающихся объемными эффектами. Последние, часто называют структурными ОН. Существует много различных методик определения ОН, но основными являются дифракционные методы, которые являются единственными неразрушающими методами оценки ОН. Все варианты дифракционных

методов используют методику « $\sin^2\psi$ ». Однако метод « $\sin^2\psi$ » включает измерение периодов решетки при несимметричных условиях съемки, которые характеризуются различной информационной глубиной, что приводит к ошибкам при измерении ОН в образцах с градиентом периодов решетки по глубине. Это характерно не только для материалов, подвергнутых модифицированию поверхности, но и для поверхностных слоев практически всех промышленных полуфабрикатов в результате газонасыщения или преимущественного испарения отдельных легирующих элементов. В результате для трип-сталей с супервысокой неоднородностью по глубине величина ОН до сих не была определена, несмотря на важность этой характеристики для этих сталей. В связи с этим, диссертационная работа Лебедева М.А. несомненно является актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

### **Общая характеристика работы**

В диссертации рассмотрены особенности дифракционных методов измерения остаточных напряжений в конструкционных материалах и покрытиях, особое место уделено влиянию гетерогенности химического и фазового состава в поверхностных слоях трип-сталей, а также в сварных соединениях и защитных покрытиях, которые выбраны в качестве объектов исследования.

В работе проведены исследования ОН в сварном соединении и износостойкой наплавке на рельсовой стали. Показано наличие остаточных сжимающих напряжений в нормальном сварному шву направлении, образование которых обусловлено положительным объемным эффектом  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения в стали при охлаждении сварного шва. В износостойкой наплавке на поверхности обнаружены высокие растягивающие напряжения, которые переходят в сжимающие в подповерхностных слоях. Полученные результаты дают важную информацию, необходимую для контроля ОН в рельсах.

Большое внимание автором уделено исследованию фазового состава, текстуры и ОН в поверхностных слоях трип стали ВНС9-Ш после прокатки и отпусков при 300-600 °С. Эти исследования показали, что в поверхностном слое после холодной прокатки происходит  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение, приводящее к почти двукратному снижению количества аустенитной фазы, при этом распад аустенита осуществляется в основном за счет главного компонента текстуры прокатки аустенита. Выявлен механизм реализации функциональных характеристик трип стали, который

включает формирование сжимающих напряжений за счет контролируемого распада метастабильного аустенита в поверхностных и подповерхностных слоях трип стали.

Количественные исследования формирования текстуры в вакуумных, ионно-плазменных TiN и ZrN покрытиях в зависимости от напряжения на подложке позволили выявить кристаллохимические закономерности формирования текстуры в покрытиях и установить корреляции энергетических параметров технологического процесса и микротвердостью покрытий.

### **Научная новизна.**

Важным методическим результатом диссертации является использование оригинальной методики оценки ОН, которая позволила оценить их величину в гетерогенных материалах, для которых стандартный метод « $\sin^2\psi$ » не пригоден. Благодаря этому удалось оценить ОН в наплавке из стеллита на рельсовой стали и впервые измерить ОН в трип сталях.

Наиболее важными в научном и практическом плане представляются результаты исследования трип сталей. В работе установлен конкретный структурно-фазовый механизм трип эффекта. Показано, что при холодной прокатке стали ВНС-9Ш в подповерхностных слоях листа формируется двухфазная структура с преобладанием аустенитной фазы, при этом в тонком поверхностном слое толщиной 5-10 мкм происходит  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение, сопровождающееся положительным объемным эффектом, который приводит к сжимающим напряжениям ( $-850$  МПа) в аустените и к полной релаксации высоких растягивающих напряжений в  $\alpha$ -фазе. В результате сжимающие напряжения в поверхностном слое препятствуют зарождению трещины, а наличие не распавшегося метастабильного аустенита в подповерхностных слоях обеспечивают торможение трещины, продвижение которой вглубь материала стимулирует распад аустенита, сопровождающийся сжимающими напряжениями.

Впервые для трип сталей оценены характеристики деформационной стабильности аустенита на основе параметра  $Md_{30}$  (температура, при которой распадается 50 % аустенита под действием 30 % деформации растяжением). Оценена величина этого параметра для исследуемой стали ВНС9-Ш, а также для других трип сталей с содержанием аустенита 10-50%.

В диссертации установлены важные для понимания механизма трип эффекта закономерности текстурообразования при деформации и фазовых

превращениях в  $\gamma$ -и  $\alpha$ -фазах. Показано, что холодная прокатка трип стали приводит к формированию выраженной однокомпонентной текстуры  $\gamma$ -фазы и двухкомпонентной текстуры  $\alpha$ -фазы. Распад аустенита в поверхностном слое происходит за счет основного текстурного компонента  $\gamma$ -фазы, что свидетельствует о том, что текстурный фактор играет важную роль в формировании структурно-фазового и напряженного состояния, обеспечивающего уникальный комплекс механических свойств трип сталей.

Исследования влияния напряжения на подложке на формирование текстуры и свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий TiN и ZrN позволил выявить важные закономерности процесса текстурообразования, которые могут быть эффективно применены для интерпретации текстурообразования других покрытий. Предложен критерий отбора текстурных компонентов в условиях неравновесного формирования покрытия, основанный на предпочтительности в этих условиях кристаллитов с ориентацией (111), которая является единственной атомной плоскостью, в которой модуль Юнга изотропен.

#### **Практическая значимость.**

Показано, что в сварном соединении рельса в результате положительного объемного эффекта  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения формируются сжимающие ОН, что является основой для разработки рекомендаций для управления процессом формирования остаточных напряжений и повышения надежности эксплуатации сварных соединений рельсов за счет контролируемого фазового превращения.

Обнаружена корреляция между количеством метастабильного остаточного аустенита и пределом прочности трип-стали, так его максимальное количество после старения при 500<sup>0</sup>С (84 %) обеспечивает максимальный предел прочности в 1850 МПа, а после старения при 600<sup>0</sup>С предел прочности снижается до 1570 МПа вследствие уменьшения количества аустенита до 55 %. Полученный результат дает эффективный способ реализации в трип-сталях контролируемого комплекса механических свойств за счет управления процессом термообработки стали.

Выявлены закономерности влияния напряжений смещения на формирование текстуры и микротвердость вакуумных ионно-плазменных TiN и ZrN покрытий. Показано, что высокие значения напряжений (-100

В) приводят к интенсификации процессов на поверхности подложки, что сопровождается формированием выраженной текстуры (111) в TiN покрытиях и двойной текстуры (111)+(113) в ZrN покрытии. Уменьшение напряжения смещения до  $-10$  В приводит к двукратному увеличению твердости покрытий, бестекстурному состоянию TiN и ослаблению текстуры ZrN покрытий. Эти результаты дают новое эффективное направление повышения служебных свойств покрытий на основе поиска оптимального сочетания энергетических параметров технологического процесса и структурных характеристик покрытия.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается тем, что все основные научные выводы и рекомендации получены с использованием современных научных представлений о текстуробразовании при деформации и фазовых превращениях, анизотропии упругих и механических свойств сталей и защитных покрытий. Обоснованность установленных в работе закономерностей не вызывает сомнения, поскольку автором тщательно и на современном методическом и научном уровнях проводится количественный анализ текстуры, фазового состава и остаточных напряжений, при этом применительно к исследуемым градиентным материалам оценка остаточных напряжений реализована с использованием усовершенствованного методического решения, дающего более достоверные результаты по сравнению со стандартными подходами дифракционной тензометрии.

### **Замечания**

1. В диссертации значительное место уделяется проблемам измерения остаточных напряжений в трип сталях, однако в формировании комплекса механических свойств роль остаточных напряжений автором игнорируется и основной упор при интерпретации статических и усталостных свойств делается на корреляции этих характеристик с количеством остаточного аустенита.
2. Практическая значимость работы была бы значительно выше, если бы в ней содержались конкретные технологические рекомендации по реализации установленных в работе результатов в условиях производства.

3. В диссертации при исследовании влияния напряжения на подложке на формирование TiN и ZrN покрытий ограничили рассмотрением только текстурного фактора и полностью проигнорированы остаточные напряжения, величина которых для этих покрытий может достигать нескольких ГПа и существенно влиять на их свойства.
4. В работе обнаружен очень важный в практическом плане эффект формирования сжимающих напряжений в сварном шве рельсовой стали, который справедливо связывают с положительным объемным эффектом  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения. В этой связи возникает вопрос, как этот эффект будет реализовываться в случае двухфазных или аустенитных сталей, где он возможно вообще отсутствует.

Сделанные замечания имеют дискуссионный характер и не снижают общей высокой оценки диссертации. Диссертационная работа Лебедева М.А. выполнена на высоком научно-техническом уровне. Она представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно-обоснованные технические и технологические решения, связанные с выявлением закономерностей влияния параметров ионно-плазменного нанесения нитридных покрытий на их текстуру и свойства, использованием методики оценки остаточных напряжений гетерогенных материалов применительно к трип-сталлям, сварному соединению и наплавке на рельсовой стали.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 6 научно-технических конференциях, опубликованы в 8 печатных работах, входящих в международные системы цитирования, в том числе 4 статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в авиакосмической и машиностроительной технике, а также в других отраслях промышленности.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По научному уровню полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Лебедев Михаил Алексеевич заслуживает присуждения

ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 –  
Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Отзыв на диссертацию и автореферат рассмотрен на заседании  
кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО УГАТУ, протокол  
№ 7 от 21 октября 2021 года. На заседании присутствовало 28 членов из  
34. Результаты голосования: «за» - 28, против – нет, воздержавшихся - нет.

Профессор кафедры  
«Технология машиностроения»,  
д.т.н., профессор



Смыслов Анатолий Михайлович

Докторская диссертация защищена 20.01.1994 г. по специальности 05.07.05  
– «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных  
аппаратов»

450008, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический  
университет»

Электронный адрес: <https://www.ugatu.su/>

Телефон: + 7 (987) 254-38-29



Подпись Смыслова А.М.  
достоверяю « 24 » 11 2021 г.  
начальник отдела документационного обеспечения  
и архива Вашилова Д.Ф.