

ОТЗЫВ

официального оппонента 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

Остаточные напряжения играют важную роль в практическом материаловедении, поскольку оказывают существенное влияние на механические свойства, прежде всего усталостные, а тем самым на работоспособность изделий в машиностроении. Кроме того, остаточные напряжения могут приводить к недопустимым деформациям готовых тонкостенных изделий, разрушению сварных соединений и слитков. В этой связи разработано множество методов измерения остаточных напряжений, основанных в большинстве своем на удалении напряженного слоя (разрезкой, сверлением или травлением) и измерении возникших в результате этого деформаций.

На этом эффекте основаны многие методы определения остаточных напряжений в деталях конструкций, наиболее известным из которых является метод Давиденкова. Недостатком метода является прежде всего тот факт, что он разрушающий и требует вырезки специальных образцов, при этом измеряется деформация прогиба, которая пропорциональна сумме главных напряжений в плоскости образца. Последнее обстоятельство делает его малоэффективным для случаев двухосного напряженного состояния, особенно в случае напряжений разного знака. Кроме того, при реализации этого метода удаление напряженного слоя производится непосредственно в процессе измерения, что может осуществляться только травлением, при котором невозможно избежать неравномерности удаления слоев, что ограничивает максимальную глубину измерения напряжений.

В этом плане более эффективными представляется использование дифракционных методов, прежде всего рентгеновского, поскольку метод нейтронографии при всех преимуществах (позволяет определять напряжения в глубинных слоях) требует уникального оборудования и не применим для решения большинства практически важных задач. Рентгеновский метод является неразрушающим и кроме того позволяют определять все компоненты тензора напряжений. При этом важно, что базой измерения является параметр кристаллической решетки, а не величина прогиба, как в

случае метода Давиденкова, и поэтому допускает использование любых способов удаления поверхностных слоев, например шлифованием с последующим удалением тонкого наклепанного слоя травлением.

Тем не менее, главной проблемой рентгеновского метода является тот факт, что из-за высоких модулей Юнга металлов (от 40 до 400 ГПа) величины деформации решетки малы и точность определения упругих остаточных напряжений невысока. При этом вариации состава твердого раствора могут приводить к значительно более существенным изменениям периодов решетки твердого раствора, которые в ряде случаев сложно отделить от упругих напряжений. В этом плане наибольшие трудности возникают при измерении остаточных напряжений в материалах, которые характеризуются градиентом химического состава и соответственно периодов решетки по глубине исследуемого материала. Связано это с тем, что стандартный рентгеновский метод измерения напряжений, метод $\sin^2\Psi$ для этих случаев не применим. Это объясняет тот факт, почему для ТРИП сталей, которые характеризуются выраженным градиентом химического и фазового состава по толщине листа, до сих пор отсутствуют данные об остаточных напряжениях, хотя эти данные являются важными для реализации функциональных свойств этих материалов, которые занимают все большее место в современном материаловедении.

Текстура также как остаточные напряжения оказывает влияние на механические свойства металлических материалов, прежде всего на их анизотропию. Однако возможно более важную роль текстурные исследования играют в плане выявления механизма процессов, происходящих в материале в результате различных термомеханических воздействий.

В этой связи актуальной является тема диссертационной работы Лебедева М.А., посвященная развитию методических подходов и изучению закономерностей формирования текстуры и остаточных напряжений в гетерогенных материалах, таких как ТРИП стали, покрытия и сварные соединения.

Общая характеристика работы

В диссертации рассмотрены особенности дифракционных методов измерения остаточных напряжений в материалах, которым свойственна гетерогенность химического и фазового состава в поверхностных слоях, прежде всего это трип-стали, сварные соединения и покрытия. Кроме того, изучены закономерности влияния энергетических параметров ионно-плазменного процесса на текстуру TiN и ZrN покрытий. Следует отметить,

что остаточные напряжения и текстура помимо фазового анализа являются наиболее востребованными в материаловедении и поэтому хорошо разработанными методами рентгеноструктурного анализа. При этом современные материалы характеризуются все более сложным химическим и фазовым составом, а также их контролируемой неоднородностью и анизотропией, что требует постоянного совершенствования даже таких развитых методов анализа как текстурный и рентгеновская тензометрия.

По нашему мнению одним из главных достоинств рассматриваемой диссертации является критический анализ существующих методов оценки остаточных напряжений применительно к материалам с градиентом состава и соответственно периодов решетки по глубине. Автор справедливо отмечает, что такой градиент свойственен практически всем конструкционным материалам с той лишь разницей, что в случае модифицирования поверхности он создается искусственно, а в случае деформированных, термообработанных или сварных изделий этот градиент образуется в результате естественных технологических условий. При этом градиент периодов решетки для алюминиевых сплавов определяется градиентом состава по элементам замещения, в титановых сплавах доминируют элементы внедрения, а в сталях и те и другие. В диссертации показано, что для некоторых объектов предпочтительно использовать стандартный метод измерения напряжений « $\sin^2\Psi$ », а в ТРИП сталях с высоким градиентом химического и фазового состава в тонком поверхностном слое необходимо использовать специальный метод, который позволяет учитывать градиент состава.

Научная новизна

Наиболее важные в научном плане результаты получены при исследовании ТРИП сталей. Диссертант использовал разработанный ранее его руководителем метод измерения остаточных напряжений, который позволил впервые определить величину остаточных напряжений в γ и α -фазах в поверхностных и подповерхностных слоях, определить количественное соотношение этих фаз и текстурных компонент в этих слоях после прокатки и в результате отжигов при 300-600⁰С. Эти данные позволили уточнить механизм реализации ТРИП эффекта, что дает новые возможности для его оптимизации уникального комплекса механических свойств, которые свойственны этим материалам.

Было показано, что холодная прокатка ТРИП стали приводит к формированию гетерогенной структуры, состоящей из 80-85 % метастабильной γ -фазы в объеме листа, при этом в тонком поверхностном

слое толщиной 5-10 мкм под действием поверхностных сил трения листа с валками происходит $\gamma \rightarrow \alpha'$ мартенситное превращение, при котором 40-45% аустенита превращается в мартенсит, что сопровождается положительным объемным эффектом, который приводит к сжимающим напряжениям в мартенсите выше 800 МПа. При этом в подповерхностных слоях метастабильная γ -фаза характеризуется высокими растягивающими напряжениями. Показано, что с помощью отжига можно изменять фазовый состав в различных слоях листа, при этом максимальное количество метастабильного аустенита в подповерхностных слоях обеспечивает максимальную прочность на растяжение, поскольку в этом случае под действием нагружения происходит максимальная интенсивность распада аустенита, что увеличивает прочность и одновременно пластичность за счет торможения роста трещины сжимающими напряжениями в результате $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращения. В противоположность этому максимальный предел усталости соответствует максимальному количеству мартенсита на поверхности листа, поскольку от этого зависит величина сжимающих напряжений на поверхности, которые препятствуют образованию начальной трещины. Полученные результаты указывают способы управления служебными свойствами изделий.

Следует отметить, что впервые для ТРИП сталей в диссертации оценен параметр Md_{30} , который используют для оценки стабильности аустенита к распаду под нагрузкой, при этом указано, что для ТРИП сталей этот параметр может играть важную роль, но должен быть скорректирован с учетом особенностей условий работы ТРИП сталей. При исследовании изменения соотношения интенсивностей различных текстурных компонентов α - и γ -фаз обнаружена ориентационная зависимость распада аустенита при мартенситном превращении, которую можно использовать для оптимизации свойств ТРИП стали.

При исследовании влияния энергетических условий нанесения ионно-плазменных нитридных покрытий на формирование в них текстуры выявлен кристаллохимический критерий отбора текстурных компонентов в условиях неравновесного формирования покрытия, основанный на предпочтительности в этих условиях кристаллитов с ориентацией (111), которая является единственной атомной плоскостью, характеризующейся изотропией модуля Юнга в плоскости этого текстурного компонента.

Практическая значимость

Исследования формирования остаточных напряжений в сварном соединении и износостойкой наплавке на рельсовой стали показали наличие

остаточных сжимающих напряжений в нормальном сварному шву направлении, образование которых связано с 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 остаточных в рельсах.

Обнаружена корреляция между количеством метастабильного аустенита в подповерхностных слоях листа и механическими свойствами ТРИП стали. Максимальная величина предела прочности после старения при 500°C составляет 1850 МПа и соответствует максимальному количеству остаточного аустенита (84%). Уменьшение количества аустенита до 55% после старения при 600°C приводит к снижению предела прочности до 1570 МПа. При этом максимальный предел усталости соответствует минимальной величине остаточного аустенита на поверхности листа. Полученный результат дает эффективный способ реализации в трип-сталях контролируемого комплекса механических свойств за счет управления процессом термообработки стали.

Установлены закономерности влияния напряжений смещения на кристаллографическую текстуру и микротвердость вакуумных ионно-плазменных TiN и ZrN покрытий. Показано, что напряжения смещения -100 В формируются интенсивная текстура (111) типичная для ионно-плазменных покрытий. Снижение напряжений смещения до -10 В приводит к двукратному увеличению твердости покрытий, и практически бестекстурному состоянию нитридных покрытий. Эти результаты дают 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 уровне 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. Для измерения остаточных напряжений в сварном соединении рельсовой стали использовали стандартный « $\sin^2\psi$ » метод, а для наплавки из стеллита специальный метод, учитывающий градиент химического состава по глубине наплавки, при этом никак не объясняется, почему в сварном соединении такой градиент отсутствует и можно применять стандартную процедуру измерения.
2. В работе показано (рис.3.14), что максимальная прочность соответствует максимальному количеству метастабильного аустенита в подповерхностных слоях, а максимальные усталостные свойства соответствуют минимальному количеству аустенита на поверхности. Однако в работе эта важная закономерность не реализована для получения оптимального сочетания статических и усталостных свойств.
3. В работе наряду с методом « $\sin^2\psi$ » эффективно используется метод измерения остаточных напряжений, основанный на симметричной съемке рефлексов, соответствующих отражениям от атомных плоскостей, отличающихся значениями упругих модулей. К сожалению, в диссертации отсутствует сравнительный анализ точности, которую обеспечивают эти два метода в ситуациях, когда оба метода допустимы.
4. Литературный обзор включает ценный подбор литературы по формированию остаточных напряжений при различных технологических воздействиях на материал, из которых наибольшее внимание уделено сварочным напряжениям. Однако восприятию этих важных данных мешает использование одновременно в тексте, как русских, так и английских сокращений одних и тех же терминов, например остаточные напряжения – ОН или RS (residual stress) или только английских сокращений, например сварочные остаточные напряжения (welding residual stress) – WRS.

Сделанные замечания носят дискуссионный или уточняющий характер, не снижают научной и практической ценности и общей высокой оценки диссертационной работы.

Заключение

В целом представленная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные

технические и технологические решения в области совершенствования методов определения остаточных напряжений и текстуры применительно к гетерогенным материалам, таким как ТРИП стали, сварные соединения и ионно-плазменные покрытия. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 6 научно-технических конференциях, опубликованы в 8 печатных работах, входящих в международную систему цитирования Scopus, в том числе 4 статья в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в различных отраслях машиностроения. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают основное 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.

Официальный оппонент Овчинников Виктор Васильевич
Заведующий кафедрой «Материаловедение»,
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»
Д.т.н., профессор

Овчинников Виктор Васильевич

Подпись Овчинникова В.В. удостоверяю

Ведущий документовед
Е. В. Алексеева



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский политехнический университет»

Дата 12.11.2021

Телефон 8 (916) 512-43-82

Адрес электронной почты vikov1956@mail.ru