# Глава 1 Состояние и тенденции развития пондеромоторного метода контроля, состояние и тенденции развития методов контроля напряжений

## **1.1 Область применения и цели использования никелевых гальванических (и других слабомагнитных) покрытий. Напряжения в гальванических покрытиях.**

Что с технологией гальваники по истории. Технология электроосаждения никеля экстенсивно развивалась, в особенности последние 50 лет, чтобы сделать возможной эффективное производство широкого спектра покрытий как для декоративных, так и функциональных применений.

Особенности гальваники. Характерной чертой гальванизации является возможность изменения состава электролита или условий осаждения, что изменяет свойства и внешний вид покрытия.

Нагрузки разрушают, нужно покрытие с лучшими харками, это никель. Цикличная нагрузка металлических компонентов изделий с постоянными, или плавающими высокими температурами, а также химическое воздействие приводят к развитию комплексных повреждений. Зачастую термические характеристики основного материала слишком слабые, что приводит к необходимости наличия специального покрытия – термического барьера. Обычно в этих целях используются никелевые гальванические покрытия.

Условия коррозийной стойкости. Коррозийная стойкость будет зависеть от толщины покрытия и других факторов, таких как состояние поверхности перед нанесением покрытия.

Толщина покрытия в зависимости от применения. Минимальная толщина покрытия может варьироваться от 5 мкм в случаях где никель используется как подложка для другого покрытия, до 125 мкм и выше в случаях, где требуется долгосрочная защита, или тяжелые условия эксплуатации.

Где применяются никелевые покрытия. Сферы применения включают в себя обрабатывающее оборудование, сушильные барабаны, гидроподъемники, объекты нефтегазодобывающей промышленности, машиностроения и др. [1]

Констатация актуальности ВН. Внутренние напряжения в никелевых покрытиях представляют существенный интерес, поскольку оказывают влияние на характеристики и качество покрытий.

Природа напряжений в ГН. Во время электроосаждения, в покрытии могут возникать напряжение вследствие влияния процесса электрокристаллизации, или нанесения примесей, а именно водорода и серы. Напряжения могут быть как растягивающими, так и сжимающими.

Диапазоны ВН в ГН. Напряжения в гальваническом никеле могут варьироваться в широких диапазонах, в зависимости от состава электролита и условий осаждения. Обычно, с сульфатными электролитами без добавок, в покрытии сформируются напряжения в диапазоне от 125 до 185 МПа. В отдельных случаях, в покрытиях сравнительно тугоплавких металлов могут возникать напряжения от нескольких сотен до тысяч МПа.

Минусы напряжений в ГН. Напряжения в покрытиях на основе железа, никеля, хрома могут вызывать растрескивание, ухудшать коррозионную стойкость, а также адгезию, что в свою очередь приводит к отслаиванию покрытия. В некоторых случаях проблема низкого качества покрытия может проявиться только после нанесения хромового покрытия поверх никелевого в следствие высокого уровня напряжений в хроме.

Польза напряжений в ГН. В то же время определенный уровень напряжений может наделять покрытие и полезными свойствами, повышая твердость и износостойкость.

Констатация актуальности ВН. В связи с этим контроль напряжений в гальванических покрытиях очень важен.

## **1.2 Внутренние напряжения в металлах. Деструктивное и позитивное влияние напряжений на характеристики металла.**

Меры борьбы с минусами ВН. На практике остаточные напряжения неизбежны. Однако их можно контролировать, чтобы избежать нежелательных результатов. Также существует возможность преднамеренно их вводить при помощи подходящих процессов. Такие процессы, как дробеструйная обработка, лазерная обработка, полировка и автофретирование, являются широко используемыми методами для продления усталостного ресурса критических компонентов, таких как лопасти турбины, зубья зубчатых колес или обычные рельсы. Существуют также методы, доступные для снятия существующих вредных напряжений, такие как термическая обработка (отпуск, отжиг), криогенная обработка и снятие напряжений вибрациями.

Актуальность ВН. Измерение остаточных напряжений является одним из важных способов выяснить, может ли изделие выдерживать высокие нагрузки состояние в течение срока его службы. Возможность изменения изделия во время хранения или в течение срока службы также может быть проверена путем измерения остаточных напряжений. Измерение остаточных напряжений также полезно для контроля качества и проверки таких процессов, как поверхностное упрочнение, термообработка, механическая обработка.

Минусы ВН. Влияние Н на усталостное. Остаточные напряжения при растяжении снижают усталостную прочность и вызывают усталостное разрушение.

Природа ВН. Остаточные напряжения при растяжении обычно являются побочными эффектами производства, такими как агрессивное шлифование, которое вызывает рост трещин. Они также могут возникать из-за усадки, изгибов или кручений.

Минусы ВН, Например, литые компоненты без внешней нагрузки при комнатной температуре могут разрушаться из-за остаточных напряжений. Кроме того, коррозионное растрескивание под нагрузкой является явлением, которое возникает при наличии растягивающих остаточных напряжений.

Плюсы ВН. Меры борьбы с минусами ВН. Сжимающие остаточные напряжения увеличивают усталостную прочность и стойкость к коррозионному растрескиванию под нагрузкой. Они преднамеренно формируются различными процессами. Эти процессы представляют собой холодную обработку или деформационное упрочнение материала. Часто реальная цель создания остаточных напряжений сжатия состоит в том, чтобы уравновесить вредные воздействия растягивающих напряжений. Некоторые из процессов термообработки, такие как отжиг и отпуск, также могут быть использованы для уменьшения остаточных растягивающих напряжений.

Классификация ВН. Общие напряжения изделия (главные напряжений) представляют собой сумму всех приложенных эксплуатационных напряжений и остаточных напряжений. Существует три вида остаточных напряжения.

Классификация ВН. Напряжения первого рода: остаточные напряжения, существующие в макрообъёме, уравновешиваются в объеме нескольких зернах, или целого изделия. Любое изменение в равновесии остаточного напряжения первого рода приведет к изменению макроскопических размеров. Любая обработка или процесс, которые вызывают неоднородное распределение деформаций, вызывают остаточные напряжения первого рода.

Классификация ВН. Напряжения второго рода: остаточные напряжения, существующие в микрообъёме. Уравновешиваются в объеме одного зерна. Они могут быть разной величины в различных зернах. Например, мартенситное превращение вызывает остаточные напряжения второго рода. Во время превращения наблюдается неполное превращение аустенита, объем мартенсита больше, чем у аустенита, и эта разница образует остаточные напряжения.

Классификация ВН. Напряжения третьего рода: остаточные напряжения, существующие в суб-микрообъёме. Такие напряжения уравновешиваются в пределах одного порядка с размерами элементарной кристаллической решетки. Их образование обычно вызвано дефектами кристаллической решетки, такими как вакансии, дислокации и т.п.

Классификация ВН. Обычно в изделиях присутствуют одновременно три рода напряжений.

О напряжениях. Остаточные напряжения сказываются на поведении изделия при обработке, эксплуатации и даже при хранении на складе [8\_66\_novikov\_1978]. Остаточные напряжения, алгебраически складываясь с рабочими, извне приложенными напряжениями, могут их усиливать или ослаблять.

Минусы Н. Как правило, наиболее опасны растягивающие остаточные напряжения, так как они, складываясь с растягивающими напряжениями от внешних нагрузок, приводят к разрушению, хотя эти нагрузки могут быть и невелики. Особенно опасны растягивающие напряжения при трехосном растяжении. Как известно, напряженное состояние при трехосном растяжении наиболее «жесткое», так как касательные напряжения, вызывающие пластическое течение, чрезвычайно малы или равны нулю, вследствие чего создаются благоприятные условия для хрупкого разрушения.

Актуальность ВН. Остаточные напряжения особенно опасны также в изделиях из малопластичных сплавов и в таких, которые становятся хрупкими при понижении температуры. При больших остаточных напряжениях разрушение часто происходит от незначительных по величине нагрузок (особенно ударных). Так, например, трещины в стальных отливках могут возникать при очистке их пневматическим молотком и даже от сквозняка зимой (из-за добавления термических напряжений к остаточным). Крупные слитки полунепрерывного литья из малопластичных алюминиевых сплавов через некоторое время после окончания литья могут разрушаться от случайных небольших сотрясений или ударов; освобождающаяся при разрушении упругая энергия так велика, что одна часть слитка весом в сотни килограммов с сильным треском отрывается и отлетает на расстояние в несколько метров.

Актуальность ВН. Остаточные растягивающие напряжения в сварных конструкциях иногда приводят к серьезным авариям. Разрушения сварных мостов и цельносварных судов часто связаны с проявлением больших остаточных напряжений, близких к разрушающим. Известны случаи, когда цельносварные суда из-за остаточных растягивающих напряжений разрушались под воздействием незначительных внешних факторов, например, от удара ломом при очистке палубы ото льда. Растягивающие остаточные напряжения в поверхностных слоях особенно вредны для деталей, работающих при знакопеременной нагрузке, так как такие напряжения способствуют усталостному разрушению.

Минусы ВН. Вредное действие остаточных напряжений сказывается в повышении общей химической активности металла. Особенно вредно усиление межкристаллитной коррозии под действием растягивающих остаточных напряжений (сезонное растрескивание латуней). В металле с остаточными напряжениями существуют области упругих деформаций разного знака. Если разрезать изделие или срезать (а также стравить) с него поверхностный слой, то становится возможным упругое снятие макронапряжений. На измерении возникающих при этом упругих деформаций основаны механические методы определения величины и знака остаточных напряжений (напряжения вычисляются по деформациям).

Минусы ВН. Остаточные напряжения могут вызвать искажение формы (коробление) и изменение размеров изделия во время его обработки, эксплуатации или хранения на складе. Коробление металлоизделий появляется в результате изгибающей и скручивающей деформации, возникающей в металле при нарушении равновесия внутренних сил и моментов. Особенно частые и сильные коробления появляются при обработке резанием, так как удаление слоя металла нарушает равновесие остаточных напряжений.

Релаксация ВН. Актуальность ВН. Самопроизвольные изменения размеров и коробление при хранении деталей происходят из-за постепенного перераспределения остаточных напряжений при их релаксации. Скорость релаксации (уменьшения) напряжений зависит от их исходного уровня: чем он выше, тем быстрее идет релаксация. Так как в разных участках сечения изделия величина остаточных напряжений различна, то из-за неодинаковой скорости их релаксации при комнатной температуре нарушается исходное равновесие внутренних сил и моментов. При этом остаточные напряжения перераспределяются, устанавливается новое состояние равновесия. Величина коробления тем больше, чем больше различие в степени релаксации остаточных напряжений в разных участках сечения и чем меньше жесткость изделия при изгибе. Иногда после сборки станков появляются недопустимые зазоры или натяги в сопряженных деталях, ранее точно пригнанных одна к другой. [1\_2\_burkin\_2015]

Меры борьбы с минусами ВН. Создавая контролируемые остаточные напряжения, которые вычитаются из рабочих напряжений, можно повысить эксплуатационные свойства металла. Чаще всего в поверхностном слое намеренно создают сжимающие остаточные напряжения, которые уменьшают опасные растягивающие рабочие напряжения. С этой целью применяют дробеструйный наклеп, азотирование и другие виды поверхностной обработки металлов.

Плюсы ВН. На основании экспериментальных исследований и практического опыта известно, что сжимающие остаточные напряжения повышают усталостную прочность, тогда как растягивающие остаточные напряжения действуют неблагоприятно.

Плюсы ВН. Влияние остаточных напряжений на выносливость зависит от механических свойств материала и от характера напряженного состояния. При значительных сжимающих напряжениях в поверхностном слое увеличение усталостной прочности проявляется в большей степени для менее пластичных материалов и при концентрации напряжений.

Минусы ВН. При резком изменении величины и знака остаточных напряжений в поверхностных слоях, что свойственно некоторым видам механической обработки, фактором, определяющим обычно усталостную прочность детали, являются остаточные напряжения в поверхностном слое глубиной 10…20 мк. Следует также иметь в виду, что влияние остаточных напряжений на выносливость может не проявиться, если в процессе нагружения имелось хотя бы несколько циклов повышения напряжений, при которых возникают пластические деформации, снимающие остаточные напряжения. [1\_29\_Birger]

Напр в ГН. Как видно, напряжения в металлах могут нести риски разрушения, и для того, чтобы определиться с возможными методами контроля напряжений, необходимо сначала определить механизмы возникновения механических напряжений в гальванических покрытиях. Известно, что в никелевых покрытиях, внутренние напряжения обусловлены точечными дефектами. Превалирующий тип дефектов кристаллической решетки в данном случае являются вакансии, приводящие в свою очередь к образованию внутренних напряжений растяжения, по своей величине доходящих до тысячи МПа. [5]

Напр в ГН. Образование вакансий в электроосажденных металлах приводит к локальным искажениям кристаллической решетки, поскольку атомы, окружающие вакансию, смещаются со своих стабильных положений. Величина сближения атомов в первой координационной сфере для разных металлов колеблется от 2 до 10%. [5]

Напр в ГН. Для вычисления величины внутренних напряжений, вызванных этим точечным дефектом, можно представить вакансию как условный «пустотный атом» того же радиуса, что и у других атомов *R0*. «Пустотный атом» стремится как бы втянуть в себя своих соседей, которые, пытаясь занять стабильное положение, вызывают локальные напряжения растяжения кристаллической решетки. Сравнение работы деформирования решетки, совершаемой «пустотным атомом», с энергией деформации среды приводит к величине напряжения растяжения σ0, как показано в формуле:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1.1) |

Напр в ГН. Зная локальные внутренние напряжения сжатия и растяжения от единичных точечных дефектов и их концентрацию в элекгроосажденных металлах, можно рассчитать итоговые напряжения в покрытии.

Напр в ГН. Другим типом напряжений, действующих в покрытии, являются приложенные напряжения. Такие напряжения формируются в гальваническом покрытии из-за особенностей механизмов формирования кристаллической решетки никеля при электроосаждении. Адгезия покрытия с основанием, в случае, например, никеля на бронзе, формирует в никелевом покрытии дополнительные приложенные напряжения растяжения.

## **1.3 Современные методы оценки напряжений**

Общий обзор методов. На сегодняшний день распространенные методы оценки остаточных упругих напряжений в ферромагнитных материалах либо не подходят для измерения внутренних упругих напряжений в покрытиях, либо не могут быть использованы для оценки внутренних упругих напряжений в труднодоступном месте готового изделия. Такими методами являются: акустический, дифракционный, прогиба, сверлением отверстия, экстензометрический и резистивный электроконтактный.

Общий обзор методов. Разнообразные способы изучения внутренних напряжений основаны главным образом на измерении деформации образца в результате сжатия или растяжения металла при электроосаждении. Для измерения внутренних напряжений на практике наиболее часто применяют методы деформации гибкого катода. При этом прогиб катода (обычно стрелу прогиба) определяют либо в процессе осаждения металла, либо после электролиза.

Метод прогиб при осаждении. Наиболее просто внутренние напряжения в покрытии катода в процессе электролиза определяют следующим образом. В качестве катода берут тонкую (толщиной 0,1—0,2 мм) стальную пластинку длиной несколько сантиметров. Верхний конец катода жестко закрепляют, а сторону, противоположную аноду, изолируют специальным лаком, стойким в данном электролите. Таким образом, металл осаждается только на одной стороне катода. Электролиз ведут в электролизере прямоугольного сечения. С помощью зрительной трубки положение нижнего края катода фиксируют на нуле шкалы, установленной перед электролизером. Изгиб катодной пластинки может происходить в обе стороны: при сжатии покрытия изгиб направлен в сторону анода, при растяжении — в обратную сторону.

Метод прогиб при осаждении. Удобная установка для определения прогиба катода в процессе электролиза состоит из стеклянной электролитической ванны, приспособления для крепления электродов и подведения тока, тубуса микроскопа и универсального штатива, который позволяет перемещать объектив микроскопа во всех направлениях.

Метод прогиб при осаждении. В некоторых случаях прогиб катода можно определить также при помощи оптических приспособлений. Например, поместив ячейку в оптический проектор, можно определить отклонение катода при электролизе по смещению его проекции на экране. Применение оптических приспособлений в несколько раз увеличивает чувствительность прибора.

Метод прогиб при осаждении. Методы второй подгруппы, основанные на измерении деформации гибкого катода, отличаются тем, что стрелу прогиба катода определяют после электролиза. В наиболее простом варианте испытание проводят следующим образом. Испытуемый образец располагают до электролиза на двух опорах и его положение точно фиксируют микрометром. Затем на одну сторону образца наносят электролитическое покрытие; под влиянием внутренних напряжений образец прогибается. Стрелу прогиба определяют при повторном замере образца после электролиза. Обычно в качестве основы берут латунную полированную плоскопараллельную пластинку максимальной толщиной 0,8—1,0 мм.

Метод прогиб при осаждении. Для более точного измерения внутренних напряжений можно использовать вертикальный оптиметр, позволяющий определять стрелу прогиба с точностью до 0,3 мкм. В момент соприкосновения измерительного штифта с поверхностью образца замыкается электрическая цепь, в которую последовательно включают миллиамперметр или электрическую лампочку. Таким образом полностью устраняют возможную ошибку вследствие прогиба образца под действием веса измерительного штифта.

Метод прогиб при осаждении. Расчет внутренних напряжений электролитических покрытий, измеренных методом гибкого катода, впервые выполнен Ж. Стони. Впоследствии уравнение выводили и другие исследователи. Следует отметить, что при расчете внутренних напряжений нужно учитывать природу основного металла, способ измерения прогиба катода, толщину покрытия (по сравнению с толщиной подкладки) и другие факторы.

Метод Сверление отверстия. Метод сверления отверстий представляет собой технологию измерения остаточных напряжений, когда напряженный материал удаляется путем сверления небольшого отверстия в контролируемой детали. После сверления оставшийся материал в окрестностях отверстия спонтанно находит новое равновесное напряженное состояние. Это перераспределение напряжений приводит к искажению поверхности вблизи отверстия. Хотя деформации малы, они измеримы и позволяют рассчитать напряжения, которые присутствовали в детали до сверления. Метод сверления отверстий считается частично разрушающим, поскольку просверленное отверстие может иметь влияние на работоспособность изделия.

Метод Сверление отверстия. Типовое измерение при использовании метода сверления отверстий начинается с определения базовой поверхности, а именно поверхности, относительно которой будет измеряться глубина отверстия. Затем определяется список глубин сверления и начинается сбор данных.

Метод акустический. В основе акустических методов определения напряжений лежат нелинейные акустические эффекты, возникающие в деформированном теле при распространении и взаимодействии в нем звуковых волн. Одной из основных причин возникновения таких эффектов являются нелинейные свойства деформированного твердого тела. В частности, скорость поляризованных звуковых волн, распространяющихся в твердом теле, зависит от уровня напряжений, действующих в нем, направления колебаний частиц (поляризации) и направления распространения волн. Данное явление, называемое акустоупругостью, положено в основу рассматриваемого метода анализа напряжений. [8\_67\_barret\_1984]

Метод акустический. Для возбуждения упругих волн обычно используются ультразвуковые излучатели, так как ультразвуковые волны обладают высокой проникающей способностью, практически независящей от агрегатного состояния исследуемых материалов.

Метод акустический. Существует много методов измерения скорости ультразвуковых волн. При измерениях время распространения ультразвуковой волны в исследуемой среде сравнивается со временем ее распространения в некоторой эталонной среде. При решении практических задач с помощью акустической тензометрии относительная погрешность измерений не превышает 3 10–4. [8\_67\_barret\_1984]

Метод акустический. При изучении ультразвуковым методом неоднородных полей напряжений получают усредненные напряжения на базе, которая определяется размерами измерительных датчиков. Если напряжения изменяются по толщине образцов, получают их усредненные значения.

Метод акустический. Рассматриваемый метод является неразрушающим, позволяет измерять остаточные напряжения как на поверхности, так и внутри тела, обеспечивает оперативность контроля, достаточно высокую разрешающую способность и точность. Однако этот метод имеет и недостатки: сложность проведения эксперимента, использование комплекса сложной аппаратуры, ограниченность реализации метода в условиях производства и эксплуатации.

Метод акустический. При оценке остаточных напряжений с помощью ультразвука, измеряется время прохождения волны между двумя концами заготовки в нагруженном и ненагруженном состоянии. Расчет напряжений делается на основе сравнения углов наклона нагрузочных диаграмм.

Метод рентген. Рентгеновский метод определения остаточных напряжений основан на явлении рассеяния монохроматических рентгеновских лучей при прохождении через регулярную кристаллическую решетку материала. При таком рассеянии происходит интерференция лучей, в результате интенсивность лучей увеличивается только в определенных направлениях, тогда как в других направлениях — ослабляется.

Метод рентген. В основе рентгеновского метода определения остаточных напряжений лежит формула Вульфа — Брэгга, характеризующая условие «отражения» рентгеновских лучей от атомных плоскостей кристалла по следующей формуле:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1.2) |

Метод рентген. Рентгеновские лучи, неудовлетворяющие условию «отражения», взаимно погашаются. Зная угол между падающим и отраженным рентгеновскими лучами, можно вычислить расстояние *d* при напряженном состоянии металла. Если известно расстояние между кристаллографическими плоскостями *d*, то деформация кристаллической решетки, как показано в формуле:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1.3) |

Метод рентген. При определенных упругих постоянных материала деформацию его кристаллической решетки можно отождествить с обычной (макроскопической) деформацией. Значение d0 определяют с помощью образца, изготовленного из того же материала, что и деталь, в которой изучают остаточные напряжения, и подвергнутого термообработке (отжигу) для снятия остаточных напряжений. [1\_2\_burkin\_2015]

Метод рентген. Достоинством рентгеновского метода является то, что он позволяет достоверно оценить остаточные напряжения II и III рода в поверхностном слое детали без ее разрушения. Но при определении остаточных напряжений I рода точность метода невысока. Это объясняется тем, что в отражении рентгеновских лучей участвуют только кристаллы, плоскости которых имеют Брэггов угол с направлением падающих лучей. Лучи, проникая в металл на глубину 3…50 мкм, дают на рентгенограммах или дифрактограммах осредненные по этой глубине значения остаточных напряжений. Для уточнения характера остаточных напряжений на различной глубине необходимо выполнить последовательное травление поверхности детали или образца со снятием рентгенограммы после каждого травления.

Метод рентген. Изменения углов 2*θ* указывают на присутствие только упругих деформаций (но не пластических). Этот факт важен при расчете внутренних напряжений по результатам измерения 2*θ*. Отметим и другие важные характеристики этого метода. С помощью специальных технических приемов могут быть определены деформации на субмикроскопическом уровне путем сравнения межплоскостного расстояния в напряженном и ненапряженном состояниях. Использование других технических приемов позволяет определить деформации из соответствующих измерений напряженного состояния. Следовательно, оказывается возможным изучить внутренние напряжения в объекте без разрезания его на части, с целью нивелировать напряжения (снизить их до нуля). Сильные градиенты напряжений и высоко локализованные напряжения могут быть изучены с помощью рентгеновских лучей, если пучок лучей попадает только на небольшую площадь образца [1\_2\_burkin\_2015].

Метод рентген. Из-за ограниченности глубины проникновения в металл рентгеновских лучей метод обнаруживает только деформации на поверхности и на очень небольшой глубине под ней. Поэтому напряженное состояние в данном случае является, как правило, двухосным, так как напряжения, перпендикулярные поверхности, приняты равными нулю на свободной поверхности. При изучении трехосного напряженного состояния, существующего в объеме объекта, применяются специальные технические приемы, с помощью которых представление о величине этих напряжений может быть получено из серий измерений деформаций на поверхности образца, подвергнутого послойному стравливанию, разрезке или шлифовке.

Метод рентген. Если метод применим к обычным поликристаллическим металлам, то в случае крупнокристаллических образцов встречаются затруднения, связанные с зернистостью дифракционной картины; эта зернистость может быть уменьшена за счет применения приспособления, качающего образец или пленку. Другие трудности возникают, когда дифрагированные лучи являются широкими и слабыми; такие лучи наблюдаются при дифракции от холоднодеформированных металлов или металлов, находящихся в высокопрочном состоянии. Точность порядка 20 МПа может быть легко достигнута в случае отожженного металла, но при широких дифракционных линиях, получаемых на упрочненном материале, достижение такой точности очень сложно.

Метод рентген. Для образцов, в которых имеется градиент напряжений, наблюдаемые 2*θ* величины не являются характеристикой поверхности, но представляют средневзвешенные значения для объема, в который проникает рентгеновский луч. Последний может проникать под поверхность на расстояния порядка нескольких сотых миллиметра для материалов на алюминиевой основе при CоKa -излучении или нескольких тысячных миллиметра для стали при CrKa -излучении. Поверхностное проникновение рентгеновских лучей требует особого рассмотрения с учетом качества подготовки поверхности. На поверхности стального образца после механической обработки, например, могут действовать напряжения, которые отличаются от напряжения во внутренних слоях, причем на величину до ~400 МПа, если не удалены нарушенные механической обработкой слои металла химическим или электролитическим способами. [1\_2\_burkin\_2015]

Метод рентген. Рентгеновским методом измеряют не только усредненные по объему напряжения в области образца, облучаемого рентгеновским пучком. Следует обратить внимание на тот факт, что когда полоска металла пластически деформируется при растяжении, а затем разгружается, наблюдаемый сдвиг дифракционных пиков указывает на наличие макроскопических сжимающих напряжений на поверхности или в небольшой области около нее. Эти напряжения не обнаруживаются при других способах определения напряжений, включающих механические методы. Таким образом, удаление некоторого слоя с поверхности образца не вызывает изгиба оставшейся части.

Метод рентген. Полагают, что различные факторы определяют этот эффект; в различных материалах эти факторы могут отличаться по степени их значимости. Зерна на поверхности могут иметь более низкий предел текучести, чем зерна, расположенные внутри, и таким образом могут быть пластически деформированы при приложении определенной нагрузки, тогда как зерна внутри образца деформированы упруго. Зерна или субзерна, которые в наименьшей степени искажаются в процессе пластической деформации (или имеют более низкую плотность дислокаций), наиболее важны при определении кажущегося положения дифракционного пика; более размытое распределение от других пиков может быть проигнорировано в оцениваемых положениях пиков. Строение областей зерен около границы или субграницы может отличаться от строения внутренних областей.

Метод рентген. Отмеченные выше особенности рентгеновского метода определения напряжений не уменьшают его полезности для практических приложений. Можно, например, рекомендовать применять усредненные данные, полученные при использовании различных длин волн. При этом отмечается большее приближение к значениям истинных макроскопических напряжений, чем в случае измерений по одной длине волны.

## **1.4 Связь напряжений и магнитных свойств. Магнитные методы оценки напряжений**

Магнитные свойства ГН. Магнитные свойства гальванических слабомагнитных покрытий во многом зависят от технологических факторов при их нанесении, основными из которых являются загрязнение и температура электролита, скорость его прокачки [1,7]. Перечисленные факторы можно объединить в один, поскольку все они влияют на внутренние напряжения в покрытии, при этом небольшие изменения в условиях осаждения могут изменять даже знак напряжений [8]. Эти напряжения, в свою очередь оказывают влияние на магнитные свойства материала.

Влияние Н на магн свойства. Из теории ферромагнетизма известно, что наиболее сильное влияние внутренних напряжений на магнитные свойства наблюдается в слабых и средних магнитных полях, значительно уменьшаясь при воздействии сильных магнитных полей.

Пондеромоторный метод. Несмотря на значительный прогресс различных разделов современной измерительной техники особенно электронно-вычислительной, за последние десятилетия магнитный пондеромоторный метод не утратил своей актуальности, а в последнее время начал приобретать исключительно важное значение благодаря достижениям в создании новых методик измерений и конструктивных разработок. Отличительными особенностями приборов магнитного пондеромоторного метода является портативность, высокая точность измерений, незначительная зависимость показаний отряда влияющих факторов. В настоящее время мировой практике довольно широко применяются приборы, использующие этот метод, например, приборы Mikrotest (Германия) или INSPECTOR (Англия), однако, вследствие отсутствия соответствующих методик измерений и конструктивных приборных решений, обеспечивающих возможность применения слабых магнитов и точного измерения отрывного усилия, решить задачу прецизионного измерения уровня напряжений они не могут.

Сравнение методов. Если сопоставлять магнитный пондеромоторный метод с другими магнитными методами, то преимущество рассматриваемого метода заключается в том, что здесь информацию о напряжениях дает в основном участок покрытия, непосредственно прилегающий к точке контакта магнита с изделием. На практике это обуславливает достижение минимального краевого эффекта, т.е. возможности без подстройки контролировать изделия сложной формы и вблизи края изделий.

Заключение. Указанные преимущества пондеромоторного магнитного метода измерения, известная связь магнитных свойств, деформаций и напряжений ферромагнитных материалов и преимущества магнитных методов измерений в целом обусловили рассматриваемый в диссертации метод измерения напряжений в гальванических никелевых покрытиях.

## **Выводы по главе 1**

Наиболее информативным и активно развивающимся в настоящее время неразрушающим методом контроля углеродных материалов является метод динамического индентирования. Преимуществами метода является: возможность проведения безобразцового контроля дорогостоящих углеродных материалов, проведение контроля готовых изделий космической техники без вывода их из эксплуатации, возможность реализации метода в портативных приборах. Кроме того, высокая информативность метода позволяет реализовать гибкие алгоритмы обработки первичной измерительной информации и тем самым решать уникальные задачи контроля материалов сложного состава и конфигурации армирующих элементов.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

**Список использованных источников**

1. Ваграмян, А.Г. Методы исследования электроосаждения металлов/ А.Г. Ваграмян, З.А. Соловьева. – М.: Издательство АН СССР, 1960. – 554 с.;
2. Новиков Н. Н. Теория термической обработки металлов / Н. Н. Новиков. М. : Металлургия, 1978. 392 с.;
3. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. Остаточные напряжения в металлопродукции. Екатеринбург, 2015. 250с.
4. Биргер И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. М. : Машгиз, 1963. 232 с.
5. Моргун, А. И. Возникновение и релаксация внутренних напряжений в гальванических покрытиях [Текст] : автореферат дис. … канд. тех. наук : 05.02.01 / Тюмен. гос. нефте-газ. ун-т. - Тюмень, 2003. - 24 с.
6. Баррет Ч. С. Структура металлов / Ч. С. Баррет, Т. Б. Массальский. М. : Металлургия, 1984. Ч. 2. 344 с.
7. Моисеев В. П., Попова О. С. Изв. АН СССР, сер. физ., 1956, 20, 641.
8. Вассерман Г., Гревен И. Текстура металлических материалов, М., «Металлургия», 1969. – 654 с.
9. Акулов, Н.С. К теории пондеромоторного магнитного контроля металлов / Н.С. Акулов, В.А. Рудницкий // Доклады АН БССР – Минск, 1970. – т. ХIV, №10.
10. Постоянные магниты: Справочник / под ред. Ю. М. Пятина. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
11. Рудницкий, В.А. Магнитный метод контроля толстых никелевых покрытий / В.А. Рудницкий, А.К. Шукевич // Тезисы докладов X Всесоюзной науч.-техн. конф. «Неразрушающие физические методы и средства контроля». –г.Львов, 1984. – С. 113.
12. Аркадьев, В.К. Электромагнитные процессы в металлах. – М.: ОНТИ, 1935. – ч. 1. – 230 с.
13. Вонсовский, С.В. Ферромагнетизм / С.В. Вонсовский, Я.С. Шур. – М.: ОГИЗ, 1948. – 816 с.
14. Вонсовский, С.В. Магнетизм. – М.: «Наука», 1971. – 1032 с.
15. Рудницкий, В. А. Особенности измерения толщины никелевых покрытий магнитным методом / В. А. Рудницкий, В. И. Антипенко // Докл. Академии наук БССР. – 1977. – No 3. – С. 202–204.
16. Козлов А. Г. К оценке влияния напряженного состояния гальванических никелевых покрытий на показания магнитных толщиномеров / А.Г. Козлов, В.А. Рудницкий, А.К. Шукевич // Дефектоскопия. – 1977. – №5. – С. 61-65.
17. Проволока стальная углеродистая пружинная. Технические условия: ГОСТ 9389-75; введ. 01.01.1977. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 16 с.
18. Приборы полупроводниковые. Часть 10. Общие технические условия на дискретные приборы и интегральные микросхемы: ГОСТ 28623-90 (МЭК 747-10-84); введ. 01.01.1991. – М.: Стандартинформ, 2005. – 40 с.
19. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов. Общие положения: ГОСТ 30630.3.0-2001; введ. 01.01.2012. – М.: Стандартинформ, 2012. – 64 с.
20. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Общие принципы и определения: СТБ ИСО 5725-1-2002; введ. 01.07.2003. – Минск: Госстандарт, 2003. – 28 с.
21. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений; введ. 01.07.2003. – Минск: Госстандарт, 2003. – 56 с.
22. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике: СТБ ИСО 5725-6-2002); введ. 01.07.2003. – Минск: Госстандарт, 2003. – 48 с.