

О Т З Ы В
официального оппонента
на диссертацию Воркачева Константина Григорьевича
«Микроструктура низколегированных сталей и особенности их разрушения
в интервале вязко-хрупкого перехода»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов

Строительство систем магистральных трубопроводов в России является одной из приоритетных задач, обеспечивающих развитие экономики страны в целом. При этом, с одной стороны, большая протяженность магистральных систем в высокоширотных удаленных территориях предъявляет высокие требования к надежности стали и ее сварных соединений, с другой стороны, товарная экспансия со стороны европейского и азиатского регионов ставит задачу обеспечения высокой экономической эффективности и технологичности в производстве, использовании материалов.

Конечно, за последние 10 лет в России был опубликован ряд научных работ, посвященных анализу взаимосвязи структуры и свойств высокопрочных трубных сталей и их сварных соединений, но вопросы, связанные с изучением взаимосвязи вязко-хрупкого перехода и структурного состояния стали носили зачастую поверхностный характер и анализировались только статистическими методами. Отдельное изучение уровня разброса получаемых значений при различных температурах испытаний и установление взаимосвязей с микроструктурой на основе количественных оценок является актуальной задачей, позволяющей развить методы прогнозирования работоспособности низколегированных конструкционных сталей.

В первой главе обстоятельно и логично показано современное развитие низколегированных конструкционных сталей, технологии изготовления и уровень требований к ним. Литературный обзор написан предельно конкретно и позволяет разобраться в имеющихся данных о взаимосвязи механических свойств, в частности ударной вязкости, и особенностей микроструктуры

низколегированной стали. Детально отражены возможности применения EBSD-метода для изучения микроструктуры стали.

Диссертантом *обоснована необходимость* проведения большого объема испытаний на ударный изгиб для оценки эксплуатационной надежности конструкционной стали, эксплуатируемой в интервале температур вязко-хрупкого перехода и проведения исследований с использованием метода дифракции отраженных электронов для оценки микроструктуры. Выводы по главе структурированы и четко обозначают задачи, которые необходимо решить в работе. В целом логичность и последовательная связанность материала в диссертации, с первой главы до последней, оставляет самое приятное впечатление о работе.

Вторая глава посвящена выбору исследуемых сталей и описанию методов лабораторных и промышленных исследований, проведенных автором при выполнении настоящей диссертационной работы. Выбранные химические составы позволяют провести анализ варьирования применяемых технологических процессов изготовления стали различной толщины. Одним из основных инструментов проведения исследований являются фрактографические исследования разрушенных образцов с количественной оценкой зон хрупкого и вязкого разрушения. Используемая приборная база и применяемые методики исследования дополняют друг друга и позволяют получить достоверные результаты.

В третьей главе автор провел комплекс исследований, необходимый для изучения особенностей разброса значений ударной вязкости. Экспериментально построены и проанализированы сериальные кривые вязко-хрупкого перехода, где было показано, что в переходной зоне наблюдается не только уменьшение ударной вязкости, что очевидно, но и оценена величина рассеяния значений. Предложена методика раздельного анализа рассеяния разброса значений в интервале высокой вязкости стали и в переходном интервале. Интересным является появление дополнительной моды распределения с меньшими значениями ударной вязкости и повышенной долей хрупкой составляющей.

Новационным является метод, предложенный соискателем и основанный на результатах EBSD-анализа, позволяющий отличить деформацию, сопровождающую разрушение, от деформации, предшествующей разрушению ударным изгибом. С использованием указанного метода для оценки вклада микротрещин в работу разрушения предлагается проводить сравнение оценки суммарной длины всех микротрещин сечения образца.

Предложенная методика обладает *научной новизной* и позволяет рассмотреть впервые выявленную корреляционную связь между соотношением суммарной длины хрупких и вязких микротрещин и вязкостью разрушения. Также к *научной новизне* можно отнести предложенный визуализационный метод отделения деформации, сопровождающей разрушение, от деформации, предшествующей разрушению. *Для практического применения* важным является анализ зависимости вязкости от образования аномально крупных блинообразных зерен бывшего аустенита, разнотрещистой структуры и смеси остаточного аустенита и мартенсита.

Четвертая глава посвящена изучению особенностей гамма-альфа-превращения в низколегированных сталях при непрерывном охлаждении. Изучены особенности микроструктуры стали 09Г2С в горячекатаном и нормализованном состоянии. Интересной является установленная связь между дефектами строения перлита и возникновением фрагментации в перлитном феррите, показывающая, что источником фрагментации является нарушение кооперации, которое приводит к отклонениям совместного роста пластин цементита и матрицы ферритного перлита.

Интересным является предположение, что если перед началом гамма-альфа-превращения содержание углерода в области межфазной границы не достигнет достаточной для образования перлита концентрации, то в этом случае происходит выделение доэвтектоидного феррита. При достижении достаточной для осуществления перлитного превращения концентрации углерода происходит эпитаксиальное зарождение феррита и последующий кооперационный рост феррита и цементита на мигрирующей границе фазового превращения.

Предложена связь особенностей фазового превращения и степенью рассеянности величин ударной вязкости в интервале вязко-хрупкого перехода.

В пятой главе предложен новый подход к количественной оценке составляющих структуры. Проведен анализ локальных разориентаций границ α -фазы в различных структурных составляющих и предложено применить подход кернеловских средних разориентаций с использованием критериев, позволяющих идентифицировать составляющие микроструктуры. В результате использования предложенного метода проведен количественный анализ ферритной и бейнитной составляющих. Полученные результаты соответствуют известным данным о том, что повышению вязкости стали способствуют не только измельчение зерна и дисперсное выделение карбидов, но и фрагментация феррита.

Необходимо отметить методически выверенный подход к количественной оценке структурных составляющих в стали, что позволило корректно установить взаимосвязи с изменением вязкости стали. Подтверждена определяющая роль различных условий охлаждения при закалке на формирование микроструктуры стали после термического улучшения.

В целом результаты этого раздела носят скорее подтверждающий известные принципы характер. Не ясно, почему автор не использовал более точные методы исследования микроструктуры в виде просвечивающей электронной микроскопии. По различным литературным источникам выделяется более 20 морфологий бейнита, в том числе высокотемпературные. И без измерения плотности дислокаций α -фазы, только на основании результатов EBSD-анализа и вида границы, делать заключение о морфологии структурных составляющих несколько оптимистично.

В шестой главе опробовано применение предложенного подхода к изучению вязкости стали промышленного производства ферритно-бейнитного класса с уровнем прочности класса X80. Интересным является проведение анализа влияния объемной доли расщеплений на поверхности образцов и вязкости разрушения. Установлено, что размах вариации ударной вязкости характеризуется двумя интервалами – при температурах испытания ниже минус 80°C, что естественно, и при температурах испытания выше минус 20°C. К сожалению,

автор не проводил анализ нестабильности показателей ударной вязкости при высоких температурах испытания и ограничился констатацией указанного факта.

По итогам проведенного анализа структурных составляющих и микротрещин после разрушения сделан вывод о влиянии на ударную вязкость границ бывших аустенитных зерен, структурной неоднородности в целом и содержания мартенситно-аустенитной фазы, для контроля содержания которой предложен метод количественной оценки.

По работе можно сделать *следующие замечания*:

1. В диссертации постоянно используется термин “оценка совершенства составляющих микроструктуры”. Для низколегированных конструкционных сталей различного назначения существуют требования по максимальному размеру зерна, баллу разноструктурности и т.д. Какие критерии совершенства автор предлагает?
2. Анализ влияния структурных составляющих на вязкость разрушения проводился на образцах с U-образным надрезом. Современные технологии выплавки с применением вакуумирования и последующей внепечной обработки обеспечивают высокую чистоту стали по неметаллическим включениям. А низкое содержание углерода обуславливает достаточно высокую вязкость матрицы и отсутствие крупных частиц цементита и карбидных включений. И анализируемые расщепления, и микротрещины являются не причиной, а следствием объемной пластической деформации перед разрушением. Более корректно было бы исследование образцов с V-образным надрезом, что позволило бы избежать формирования объемной области пластической деформации перед разрушением и выявило бы критические структурные составляющие, являющиеся инициаторами разрушения.
3. Некорректен тезис об “обеспечении пониженных температур прокатки за счет торможения процессов рекристаллизации посредством введения микролегирующих добавок сильных карбидообразующих элементов” в 6-й главе. При термомеханической обработке чистовая стадия прокатки проводится ниже температур рекристаллизации в принципе и

заканчивается около точки Ag_3 с целью формирования высокодислокационной фрагментированной структуры аустенита перед полиморфным превращением. Карбидообразующие элементы тормозят рост аустенитного зерна при нагреве под прокатку, регулируют размер зерна при динамической и метадинамической рекристаллизации на черновой (высокотемпературной) стадии прокатки и обеспечивают дисперсионное упрочнение при последующем регламентированном охлаждении.

4. В главах 4, 5 и 6 автор исследует влияние феррита, квазиполигонального феррита и бейнита на вязкость разрушения. В низколегированных сталях, в зависимости от технологии изготовления, может формироваться бейнит различных морфологий. Без оценки плотности дислокаций однозначно разделить квазиполигональный феррит и, например, гранулярный бейнит – невозможно. На основании каких признаков, кроме вида границ, были классифицированы бейнит и квазиполигональный феррит? И почему не выделялись различные морфологии бейнита, если на фотографиях микроструктуры явно присутствует как речная морфология, так и гранулярная?
5. Анализ взаимосвязи структуры и характера хрупко-вязкого перехода проводится без получения нижнего плато кривой хладноломкости. Таким образом, неясно, какие именно структурные составляющие будут обуславливать полностью хрупкое разрушение стали.
6. Проводится анализ качества стали при работе удара в области хрупко-вязкого перехода. С точки зрения ресурса ответственных конструкций эксплуатация материала должна проводиться в области гарантированного вязкого разрушения, т.е. в области верхнего плато кривой хрупко-вязкого разрушения. Это необходимо учесть при использовании результатов работы в промышленном производстве.

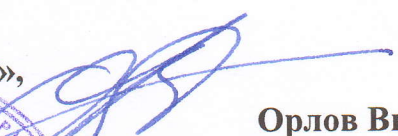
Указанные замечания не влияют на положительную оценку работы. Автор установил количественные взаимосвязи структуры и свойств, позволяющие обеспечить производство листового проката конструкционных сталей с высокой

вязкостью. Полученные результаты обладают научной новизной и имеют прямое практической применение. В целом считаю, что диссертационная работа Воркачева К.Г. выполнена на высоком научном уровне, полностью соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней требованиям ВАК, и ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Генеральный директор
ГНЦ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»,
доктор технических наук

13.10.2020




Орлов Виктор
Валерьевич

Подпись Орлова В.В. удостоверяю
Заместитель генерального директора
по управлению персоналом



Захаров Антон Борисович