

ОТЗЫВ

официального оппонента Филиппова Михаила Александровича, профессора, доктора технических наук, профессора кафедры «Металловедение» УрФУ на диссертационную работу Хотинова Владислава Альфредовича «Закономерности формирования пластичности и вязкости низко- и среднеуглеродистых сталей и разработка методов их оценки», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 – Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallorv

Конструкционная прочность материала деталей, в том числе труб магистральных трубопроводов и буровых, – комплексная характеристика механических свойств материала, которые обеспечивают надёжную и длительную работу материала в сложно напряжённом состоянии, включающая сочетание критериев прочности (временное сопротивление σ_B и предел текучести $\sigma_{0,2}$ (σ_T), характеризующие сопротивление, пластической деформации, по которым рассчитывают допустимые рабочие напряжения, пластичности, вязкости. При этом, чем больше прочность материала, тем выше допустимые рабочие напряжения и меньше размеры и масса детали. Надёжность — свойство материала противостоять хрупкому разрушению. Хрупкое разрушение вызывает внезапный отказ деталей в условиях эксплуатации. Оно считается наиболее опасным, т. к. происходит при напряжениях ниже расчетных и протекает с большой скоростью.

Для предупреждения хрупкого разрушения конструкционные материалы должны обладать достаточной пластичностью (δ , ψ) и ударной вязкостью (KCV). Однако эти критерии надёжности определяются обычно на небольших лабораторных образцах (без учёта условий эксплуатации конкретных, зачастую массивных деталей) и являются достаточными лишь для мягких малопрочных материалов. Для менее пластичных материалов с повышенной склонностью к хрупкому разрушению необходимо учитывать дополнительные факторы, влияющие на пластичность и вязкость и увеличивающие вероятность хрупкого разрушения. Это наличие

концентраторов напряжений (надрезов), низкие температуры, динамические нагрузки и большие размеры деталей (масштабный фактор).

Актуальной становится необходимость разработки новых подходов в оценке и трактовке пластичности и вязкости металла при заданном уровне прочностных свойств, что особенно важно при все более широком использовании высокопрочных строительных сталей нового поколения, обладающих высоким комплексом механических свойств: удовлетворительной пластичностью ($\delta_p \sim 7-10 \%$, $\delta \sim 24-26 \%$), опасным по традиционным меркам отношением $\sigma_{0,2}/\sigma_b \sim 0,97$ и рекордно высокой вязкостью как при комнатной ($KCV > 3,5$ МДж/м²), так и при отрицательных температурах вплоть до $t_{исп} = \text{минус } 60 \dots \text{минус } 80^\circ\text{C}$. Изучение закономерностей влияния структурно-фазовых параметров (дисперсности и количества феррита и упрочняющих структурных составляющих – перлита, бейнита и мартенсита, специальных карбидов) на вязкость и пластичность высокопрочных строительных сталей и отыскание на этой основе способов адекватной оценки пластичности и путей повышения конструкционной прочности, что и является целью данной работы, определяет её **несомненную актуальность** для теории и практического использования высокопрочных строительных сталей нового поколения.

Диссертационная работа изложена на 299 страницах машинописного текста, состоит из введения, основного текста, разбитого на 5 глав и включающего 107 рисунков и 28 таблиц, заключения и общих выводов по работе, списка использованных источников, насчитывающего 152 наименования, и 1 приложения.

Во введении автором обоснованы актуальность, цель и задачи работы, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость, достоверность результатов работы. Приведено обоснование личного вклада автора, основные положения, выносимые им на защиту, апробация работы и основные публикации результатов работы.

Первая глава, значительная по объёму и по важности полученных в ней результатов по изучению пластичности и вязкости ферритно-перлитной структуры, проведена на модельном армко-железе и распространённой промышленной стали 09Г2С. В результате трудоёмких направленных экспериментов с использованием горячей (тёплой) деформации в широком диапазоне температур и термической (термомеханической) обработки, РКУП выявлена роль вкладов доминирующих механизмов упрочнения и снижения пластичности при их использовании с целью выбора наиболее рациональных механизмов упрочнения в смысле достижения требуемой прочности при сохранении достаточного запаса вязко-пластических свойств.

Во второй главе, также существенной по результатам в аспекте цели работы, приведены результаты изучения влияния перлита на комплекс механических свойств широкого круга низко- и среднеуглеродистых промышленных трубных сталей в широком диапазоне составов по углероду, от 09Г2С до 48Г2БМ, легированных кремнием, марганцем и карбидообразующими элементами – хромом, молибденом, ванадием, ниобием. К новым, достаточно неожиданным результатам можно отнести показанный и обоснованный вывод об относительной неэффективности перлитного варианта упрочнения среднеуглеродистых трубных сталей, выигрыш от которого перекрывается падением пластичности и вязкости. Важно при этом, что экспериментально обоснованы пути нивелирования отрицательного влияния перлита при выборе режимов ВТМО, формирующих благоприятную морфологию цементитных пластин.

В третьей главе описаны результаты комплексных исследований, направленных на разработку оптимальных режимов упрочнения строительных трубных сталей нового поколения класса прочности Х80 с ферритно-бейнитно/мартенситной структурой типа 05Г2Б. Показаны и обоснованы структурные механизмы обеспечения уникально высоких вязко-пластических характеристик и повышенной энергоёмкостью разрушения таких сталей вплоть до низких температур. Предложен оригинальный фрактографический критерий замедленного вязкого разрушения сталей Х80,

L/V , дающий возможность оценки трещиностойкости на образцах после испытаний ударной вязкости. Показаны и недостатки подобных сталей, в том числе склонность к деформационному старению, и предложен режим термообработки, направленный на устранение эффекта деформационного старения.

Четвертая глава содержит результаты исследований деформационного поведения и изменения механических свойств под действием эффекта деформационного старения низко- и среднеуглеродистых конструкционных сталей. Эти результаты имеют значение для оценки величины деформационного старения как на этапе изготовления труб, так и в процессе их эксплуатации. Предложена методика оценки величины эффекта деформационного старения по относительному изменению различных механических характеристик при растяжении. Обосновано применение ВН-обработки (предварительной небольшой холодной деформации последующим невысоким нагревом) с целью повышения предела текучести стали 48Г2БМ, что переводит эту сталь в более высокую категорию прочности P110 вместо X80.

Важное значение для научного обеспечения режимов термической обработки с целью получения структурно-фазового состояния, обеспечивающего заданный комплекс служебных свойств – сочетание пластических, прочностных и градиентных характеристик имеют результаты, описанные **в пятой главе** по детальному анализу кривых растяжения арможелеза и сталей 09Г2С и 37Г2С. На основе анализа хода кривых растяжения, а также с использованием метода корреляции цифровых изображений (КЦИ) и видеосъемки растягиваемого образца экспериментально выделены периоды на кривых растяжения: линейный и степенной на равномерной стадии деформации, I, II, III на сосредоточенной стадии деформации, в пределах которых экспериментально обоснованы и предложены параметры текучести – пластические (δ , δ_p , δ_c , δ/δ), прочностные ($\sigma_{0,2}$, σ_b , σ_k , σ_k/σ_b) и градиентные ($\Delta\sigma/\Delta\delta$, $\Delta\sigma/\Delta t$). Установлены детальные взаимосвязи между указанными

пластическими, прочностными и градиентными параметрами текучести, и результатами анализа хода кривых растяжения.

Научную новизну рассматриваемой работе обеспечивают результаты по созданию теоретических основ оценки снижения пластичности при основных микроструктурных видах упрочнения – зернограницном (субзеренном), дислокационном, перлитном, дисперсионном низко- и среднеуглеродистых сталей трубного назначения и предложение на этой основе путей повышения их конструкционной прочности. Впервые экспериментально выделены периоды на кривых растяжения: линейный и степенной на равномерной стадии деформации, I, II, III на сосредоточенной стадии деформации, в пределах которых экспериментально обоснованы и предложены параметры текучести – пластические (δ , δ_p , δ_c , δ_c/δ), прочностные ($\sigma_{0,2}$, σ_B , σ_K , σ_K/σ_B) и градиентные ($\Delta\sigma/\Delta\delta$, $\Delta\sigma/\Delta\tau$). Эти результаты обладают научной новизной и могут использоваться для оценки способности металла к пластической деформации и разрушению.

Новизна предложенных автором технических решений подтверждена 6 патентами на изобретения.

Достоверность установленных научных положений обеспечивается использованием современного оборудования для механических испытаний на растяжение и ударный изгиб, применением современных методов исследования структуры и поверхности разрушения (металлографии с компьютерным анализом изображения, электронной сканирующей микроскопии, EBSD-ориентационной микроскопии и микроспектрального анализа, согласованностью результатов экспериментов в лабораторных и промышленных условиях; большим объемом экспериментальных данных на широком круге конструкционных сталей с их статистической обработкой и удовлетворительное соответствие результатов оценки трещиностойкости, полученных расчетным и экспериментальным методом, убеждает в достаточной достоверности расчетов по предлагаемым методикам.

Практическое значение диссертации заключается в разработанных и предложенных методиках определения величины опасного для эксплуатационной надёжности эффекта деформационного старения (параметра D) по изменению механических характеристик на кривых растяжения (пределу текучести σ_T , отношению σ_T/σ_B , протяженности равномерной стадии деформации δ_p , статической вязкости a), которая позволяет проводить оценку ресурса работы изделий (конструкций). Приведены рекомендации по режимам термообработки, обеспечивающие минимизацию эффекта деформационного старения или его устранение. К значимым результатам относятся предложенные способы определения вязкости сталей при испытаниях на ударный изгиб с записью диаграмм нагружения (патенты № 2646548, № 2570237), позволяющие проводить аттестацию как конструкционных сталей обычной вязкости, так и высоковязких сталей, и методика фрактографической оценки трещиностойкости низкоуглеродистых сталей типа 05Г2Б для газопроводных труб класса прочности X80 при приемно-сдаточных испытаниях и после определенных периодов эксплуатации, в основе которой лежит критерий $L_c/V \geq 0,22$, где V – высота образца Шарпи в месте надреза, гарантирующий замедленное вязкое разрушение сталей X80 ($KCV^{-40} = 250$ Дж/см²). Использование критерия L_c/V дает возможность оценки трещиностойкости на недоломанных образцах, часто встречающихся при ударных испытаниях высоковязких сталей.

Важно, что предложенные методики для оценки механических свойств конструкционных сталей закреплены в ряде учебных пособий для студентов-материаловедов. Кроме того, разработанные в работе методы оценки вязкости и трещиностойкости введены в практику лабораторных испытаний Российского научно-исследовательского института трубной промышленности для образцов конструкционных сталей обычной и высокой вязкости (см. акт использования в приложении 1).

Автореферат и публикации достаточно полно отражают содержание диссертации.

Материалы диссертации соответствуют паспорту **специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов.**

Вместе с тем, по работе имеются следующие **замечания.**

Сложность и взаимозависимость многих факторов, влияющих на формирование таких важных характеристик строительных сталей для ответственных труб, как пластичность и вязкость, без потери допустимых показателей прочности делают уязвимыми концепции оценки пластичности и вязкости конструкционных сталей на количественное прогнозирование структурного и напряженного состояния деталей.

1. В работе не приведены результаты аттестации по чистоте от примесей (C, P, S, N и др.) использованного модельного материала – армко-железа, однако приведена информация о наличии в нём 2 % перлита и именно на этом феррите впервые экспериментально выделены периоды на кривых растяжения: линейный и степенной на равномерной стадии деформации, I, II, III на сосредоточенной стадии деформации, в пределах которых предложены и экспериментально обоснованы параметры текучести – пластические, прочностные и градиентные и др. для оценки способности металла к пластической деформации и разрушению. Таким образом, чистота эксперимента по этому параметру может быть подвергнута сомнению, ибо даже сотые доли примесных атомов могут вызывать падение пластичности при зернограничном (субзеренном), дислокационном, дисперсионном упрочнении. Кроме того, отдельные опыты следовало выполнить на монокристаллах, что позволило бы исключить зернограничное (субзеренное), падение пластичности вследствие суперпозиции вкладов механизмов упрочнения.

2. Несмотря на то, что автор оговаривается в первой главе, что выделить вклад отдельных механизмов упрочнения в уменьшение пластичности сложно, так как в конструкционных сталях они всегда используются совместно, однако для конкретных структурно-фазовых

состояний сталей удастся выделить один доминирующий механизм, Считаем, что при выделении доминирующего механизма упрочнения путём тёплой прокатки с последующим отжигом и испытанием на растяжение надо хотя бы приблизительно количественно оценивать величину ошибки этого выделения, поскольку при деформировании кристалла плотность дислокаций быстро возрастает благодаря генерированию их источниками Франка-Рида. Размноженные дислокации вносят значительный вклад в упрочнение стали в результате взаимодействия с существующими дислокациями и между собой.

3. Для получения сверхмелкозернистой структуры феррита ($d_3 = 0,2-0,5$ мкм) образцы армко-Fe подвергали равноканальному угловому прессованию (РКУП) при температуре 500°C , а для диапазона зерен $d_3 = 0,5-5$ мкм – последующему отжигу разной продолжительности в интервале температур $t_{\text{отж}} = 150-700$ °C. Этот метод нельзя признать удачным, т.к. приводит к получению избыточно неравновесной системы, пограничных сегрегаций, пор и межзёренных несплошностей, избыточных концентраций вакансий и дислокаций.

4. Результаты электронно-микроскопических исследований не несут полной информации, т.к. некоторые микрофотографии структур на просвет (например, рис. 1.4, 5.11) не сопровождаются микродифракцией с описываемых участков, что снижает ценность этих исследований.

Рассмотренные замечания имеют детализирующий частный характер и не снижают общей высокой оценки этой методически изобретательно поставленной, значительной по научным результатам, получившим современную трактовку, и грамотно написанной работы, являющейся вполне законченным исследованием, о чем с очевидностью свидетельствуют разработанные автором и рекомендованные к использованию в трубной промышленности методики оценки и технологические режимы термической обработки для повышения пластичности, вязкости и конструктивной прочности мало- и среднеуглеродистых сталей, в том числе трубных сталей нового поколения. Диссертация содержит новые решения определения

научного обоснованного вклада различных механизмов упрочнения сталей при сохранении необходимого запаса пластичности, вязкости и надёжности труб.

Научные результаты работы по своей значимости выходят за рамки изученных составов сталей и режимов термической обработки, вносят вклад в теорию и технологию термической обработки сталей, расширяя представления о возможностях направленного регулирования структурного состояния конструкционных сталей, что дает основание считать диссертационную работу, соответствующую требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Хотин В.А. заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов.

Профессор кафедры металловедения,
профессор, доктор технических наук



Филиппов М.А.

05.03.2021

620002, г.Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (ФГАОУ ВО УрФУ)

e-mail: filma1936@mail.ru

тел.: 8 (912) 252-43-42

ПОДПИСЬ
ЗАВЕРЯЮ.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ УРФ
МОРОЗОВА В.А.

