

Вл. И. Большаков

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БЕЙНИТНЫХ СТАЛЕЙ НА УКРАИНЕ

Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры

Показано, что одним из наиболее перспективных путей коренного улучшения комплекса механических свойств металлопроката является термическая и термомеханическая обработка по различным технологическим схемам.

Приоритет в разработке теории и технологии процесса термического упрочнения проката принадлежит академику К.Ф.Стародубову, заведовавшему кафедрой термической обработки металлов ДМетИ с 1938 по 1979 год, который еще в начале 60–х годов переориентировал коллектив кафедры и отдела ТОС ИЧМ АН УССР (а затем Минчермета СССР) на решение этой проблемы. На основании выполненных К.Ф.Стародубовым с сотрудниками исследований сегодня можно считать установленным, что в общих чертах термоупрочнение металлопроката заключается в регламентированном охлаждении его за чистовой клетью, а иногда и между клетями прокатного стана, в состоянии рекристаллизованного аустенита. Такое охлаждение: предотвращает рост рекристаллизованного мелкого зерна аустенита; обеспечивает получение либо мелкодисперсных квазиэвтектоидных структур без– или с небольшим количеством избыточного феррита, либо низкоуглеродистого мартенсита; претерпевшего самоотпуск, приводит к получению мелких пересыщенных углеродом ферритных зерен (в сталях с содержанием углерода менее 0,2%). Все это, по сравнению с горячекатаным состоянием, позволяет в конструкционных сталях: существенно повысить пределы прочности и текучести, усталостную прочность, сопротивление распространению трещин, живучесть металлоконструкций; сохранить на допустимом уровне характеристики пластичности и вязкости, уменьшить чувствительность к концентраторам напряжений; снизить порог хладколомкости, т.е. позволяет улучшить весь комплекс свойств, реализовать до 40% физической прочности конструкционной стали. Важно, что термическое упрочнение, по сравнению с альтернативными способами упрочнения, наименее требовательно к составу стали и технологическим параметрам, наиболее технологично и производственно приемлемо, относительно легко осуществимо как на новом, так и на действующем оборудовании, а значит является наиболее эффективным способом повышения комплекса свойств.

К.Ф.Стародубов исследовал, разработал и опробовал в промышленных условиях технологические процессы термического

упрочнения многих видов массового металлопроката общего и отраслевого назначения: арматуры класса Ат III, помольных шаров, крупных и средних фасонных профилей, универсальной полосы, сварных и бесшовных труб и др. Работы эти завершены выпуском промышленных партий термоупрочненного проката, испытанием их в отраслевых НИИ, лабораториях у потребителя, выдачей проектным организациям заданий на проектирование участков, отделений, цехов, постоянных линий для термоупрочнения проката как с прокатного так и с отдельного нагрева (установка для термоупрочнения шаров в потоке стана 120, участки для термоупрочнения универсальной полосы в потоке стана 800 и среднесортных профилей проката в потоке стана 350 завода им.Дзержинского; цех для термического упрочнения крупных профилей проката – задание выдано совместно с ИЧМ; участок термического упрочнения крупных швеллеров для лонжеронов рам грузовых автомобилей; отделение для термической обработки подката стана 250–6 КМЗ, установка для термоупрочнения арматуры на КМЗ, поточная линия для термомеханико–термической обработки крепежных изделий и др.) Некоторые из этих проектов (установка для термоупрочнения шаров, отделение для термообработки подката, установка для термоупрочнения арматуры и др.) реализованы. Во всех случаях испытания опытно–промышленных и промышленных партий термоупрочненного металлопроката показали высокую эффективность исследования его в народном хозяйстве; снижение расхода металла до 20% и более, экономия легирующих элементов; повышение надежности и долговечности несущих металлоконструкций и др. Важным достоинством технологии термического упрочнения является также его экологическая безвредность; при осуществлении термоупрочнения непосредственно с прокатного нагрева обеспечивается улучшение санитарно–гигиенических условий за счет существенного уменьшения выделения тепла в окружающее пространство. Таким образом можно только поражаться научному предвидению академика К.Ф.Стародубова. Он задолго до нашего времени увидел и смог поставить и решить следующие задачи:

1. Решить вопрос о получении высокопрочного состояния на самых простых композициях сталей – малоуглеродистых сталях типа СтЗ; снижение металлоемкости от 20% и выше.

2. Он предвидел дефицит легирующих элементов, хотя в 60–е годы декларировалось в СССР многообразие легирующих элементов, их неиссякаемые месторождения на территории СССР, – самые большие в мире.

3. Он предвидел, что стоимость энергоресурсов будет расти и вопросы энергосбережения ставил превыше всего.

4. К. Ф. Стародубов считал самым важным при решении задач прочности и надежности проката вопросы сохранения природы,

уменьшение расхода воды; оборотный цикл – не приводящий к загрязнению наших водоемов.

Только сегодня через 40–50 лет после начала работ по термическому упрочнению проката можно в полной мере оценить важность таких подходов. Ведь в начале 60–х годов никто не мог предвидеть распад СССР, экологические проблемы XXI века, дефицит энергетических и минеральных ресурсов. С середины 50–х годов К.Ф.Стародубов применяя новые физические методы для изучения природы формирования тонкой (дислокационной) структуры мелкозернистых термомеханически упрочненных сталей. Его талантливые сотрудники и в первую очередь Юрий Здиславович Борковский, Александр Федорович Сиухин – создавали новые приборы для исследования кинетики превращения аустенита в малоуглеродистых сталях, позволившие построить термостатические диаграммы сталей с различным содержанием углерода и других легирующих элементов. Этими работами были заложены предпосылки для понимания сложных процессов структурообразования характерных для малоуглеродистых и низкоуглеродистых сталей. Раньше других понял Кирилл Федорович возможности электронной микроскопии для исследования структуры металлов. Он командировал в Москву в ЦНИИЧМ им.И.П.Бардина целый ряд сотрудников кафедры и отдела термической обработки стали для изучения этого метода в Институте металлофизики (директор акад.Г.В.Курдюмов, зам. Директора по научной работе Р.И.Энтин). Это были Б.Я.Дроздов, З.К.Косько, Ю.С.Дворядкин, В.И.Большаков, С.З.Некрасова, Н.М.Павловцева (Александрова), А.И.Лукиянкова, Л.С.Кривуша, И.А.Монгайт, П.В.Мудрук, И.Э.Погребная и др. Результатом такого «десанта» в Москву был большой прорыв в изучении тонкой структуры деформированного металла, а также понимание процессов структурообразования с учетом деформации.

Созданное академиком К.Ф.Стародубовым новое научно–техническое направление – термическое и термомеханическое упрочнение массовых видов стального металлопроката – кроме решения проблемы повышения уровня свойств массовых видов стального металлопроката, как оказалось, позволяет решить еще две проблемы, резко сократить длительность сфероидизации карбидной фазы и тем самым радикально усовершенствовать режимы сфероидизирующих отжигов массовых видов металлопроката и паковок из конструкционных, подшипниковых инструментальных и других сталей: получать «структуры отпуска» непосредственно при распаде аустенита, а не путем закалки на мартенсит и последующего отпуска закаленной стали. Этими вопросами занялся и успешно решил их профессор И.Е.Долженков, возглавлявший кафедру после ухода К.Ф.Стародубова [1]. Этот аспект имеет огромное научное и прикладное значение, т.к. в случае решения этой проблемы отпадает необходимость в одной из самых распространенных технологий термической обработки – технологии термического улучшения, которой в

настоящее время подвергают около 2/3 всех термически обрабатываемых изделий в машиностроении, металлургии и др.отраслях. До недавнего времени такая задача считалась не имеющей решения, т.к. А.П.Гуляевым и многими другими учеными однозначно было доказано, что при любом охлаждении переохлажденных однородный аустенит с эвтектоидной или квазиэвтектоидной концентрацией углерода превращается в диффузионной области в феррито–цементитную смесь с пластинчатой или игольчатой морфологией образующихся фаз. Полученные И.Е.Долженковым и другими исследователями, данные свидетельствуют о том, что воздействуя определенным образом на аустенит, можно его искусственно регомогенизировать и заставить превращаться непосредственно в «структуры отпуска» или идентичные им по свойствам. К таким воздействиям относится «термический удар» (прерванная закалка), пластическая деформация аустенита до его распада, или в процессе его эвтектоидного (квазиэвтектоидного) превращения, электромагнитного воздействия.

Невозможно не остановиться на проблеме термического упрочнения железнодорожных колес, которую поставил и решил соратник К.Ф.Стародубова и его ученик проф., д.т.н. И.Г.Узлов. Эти работы отличались четкостью постановки задачи, глубиной исследований, созданием мощной школы по исследованиям и внедрению в практику термического упрочнения «транспортного металла». И, наконец, я хочу показать, что К.Ф.Стародубов, занимался не только малоуглеродистыми сталями, а с 1980 года он поставил цикл исследований по изучению бейнитных сталей, неразупрочняющихся при сварке. Были исследованы дислокационные структуры бейнитных сталей типа 14Х2ГМР, выплавлены стали на Московском метзаводе и Орско–Халиловском меткомбинате. На образцах были получены характерные структуры верхнего, нижнего бейнита, реечного дислокационного мартенсита после закалки, улучшения и термомеханической обработки. Были изготовлены рукояти экскаваторов и золотодобывающих драг, элементы автодорожного моста через р.Смотрич в Каменец–Подольске, конструкции отвалных мостов, ковши экскаваторов и др. изделия. Было показано, что стойкость рукоятей экскаваторов в золотодобывающих областях, отличающихся очень низкими температурами эксплуатации, повышалась в 2–3 раза. Однако вопросы разупрочнения при сварке не были решены кардинально, и в связи с этим эти стали не были включены в СНиП II–23–72.

В последствии, при изучении процессов контролируемой прокатки на сталях 09Г2ФБ и аналогичных английских сталях, выплавленных в Шеффилде, было показано, что получение при этой обработке мелкозернистых структур стали 14Х2ГМР позволило решить проблему разупрочнения указанных сталей. На рис. 1 а–г приведены

микрофотографии тонкой структуры стали 09Г2ФБ после контролируемой прокатки, а также после последующей закалки.



Рис. 1а Структура стали 09Г2ФБ после контролируемой прокатки при 740 °С (разветвление пластин цементита с изменением плоскости габитуса x30 000)

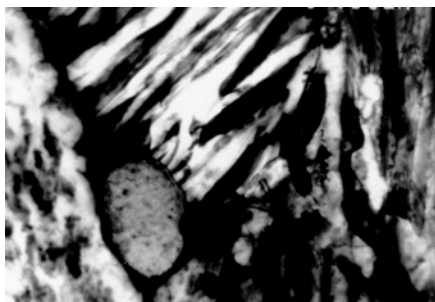


Рис. 1б Структура стали 09Г2ФБ после контролируемой прокатки при 740 °С (начальная стадия рекристаллизации x40 000)

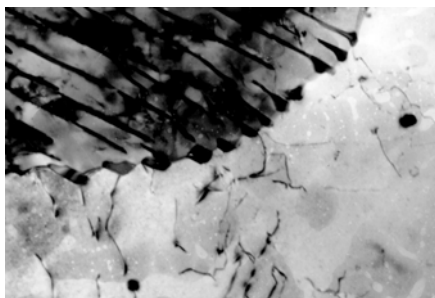


Рис. 1в. Структура стали 09Г2ФБ после контролируемой прокатки при 825 °С (утолщение цементитных пластин на границе перлитной колонии с доэвтоктоидным ферритом, x15 000)

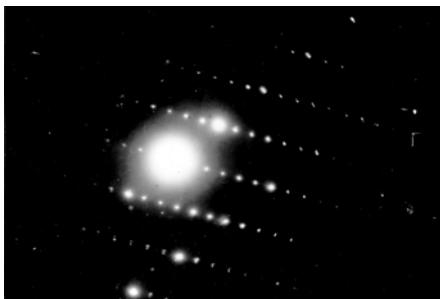


Рис. 1г Структура стали 09Г2ФБ после контролируемой прокатки при 825 °С (микродифракционная картина. Ориентационное соотношение Багаряцкого[2])

Эти работы получили развитие в 80-е годы. Была показана важная роль создания субструктуры в результате термомеханической обработки. Результаты этих работ легли в основу моей докторской диссертации, которая была защищена в ДМетИ в 1985 г. Задание на выполнение этих работ было сформулировано К.Ф.Стародубовым еще в 60–70-е годы, поэтому сам К.Ф.Стародубов является организатором и вдохновителем работ по разработке, изучению структурообразования и внедрения этих сталей. В работах принимали участие довольно много организаций ИЭС им.Е.О.Патона, ИСС ЦНИИЧМ им. И.П.Бардина, МИСИ им. В.В.Куйбышева, КИСИ, завод им.Бабушкина, Уралмаш, Азовсталь. Макеевский металлургический завод, Орско–Халиловский металлургический комбинат, Днепропетровский институт строительства и архитектуры и, конечно, головная организация в СССР по термическому упрочнению проката Институт черной металлургии МЧМ СССР. Это и Б.Е.Патон, Б.С.Касаткин, М.Ф.Мусияненко, Тылкин М.А., Жербин М.М., Стародубов К.Ф., Узлов И.Г., Матросов Ю.И. Каждая из организаций – участников делала свое дело. ИЭС им.Е.О.Патона исследовал вопросы сварки и разупрочнения стали 14Х2ГМР во время сварки, ЦНИИЧМ им.Бардина внедрял и выплавлял указанные стали на Макеевском метзаводе и Орско–Халиловском мет.комбинате. МИСИ, ИЧМ, ДИСИ – исследовали тонкую структуру этих сталей и природу бейнитного превращения КИСИ – внедряя эти стали в изделия машиностроения и мостостроения, завод им.Бабушкина изготавливал конструкции моста через р.Смолит в Каменец–Подольском и т.д.

В настоящее время ученики Кирилла Федоровича, ведя научные исследования в различных областях металлургии, используют те концепции подходов к разрешению технологических и исследовательских проблем, которые были заложены во время совместной работы с К.Ф.Стародубовым. Я, теперь уже со своими учениками, иду по пути максимальной экономии дорогостоящих легирующих элементов, использования оптимальных систем легирования для каждого конкретного случая, широкого применения комбинированных обработок и применения новейшего исследовательского оборудования для получения информации о структуре и свойствах исследуемых материалов. Применение концепций Кирилла Федоровича позволило разработать сначала теоретическое обоснование, а затем и перейти к практическому внедрению технологии модернизации старых пятиэтажных жилых зданий путем их надстройки с использованием металлопроката из высокопрочных низколегированных сталей.

В Украине и бывшем Советском Союзе строительство жилых зданий осуществлялось и выполняется в настоящее время либо в железобетонных панельных конструкциях, чему способствует развитая база строительной индустрии, либо в кирпиче и кирпичных блоках. Применение стальных конструкций в жилищном строительстве по причине

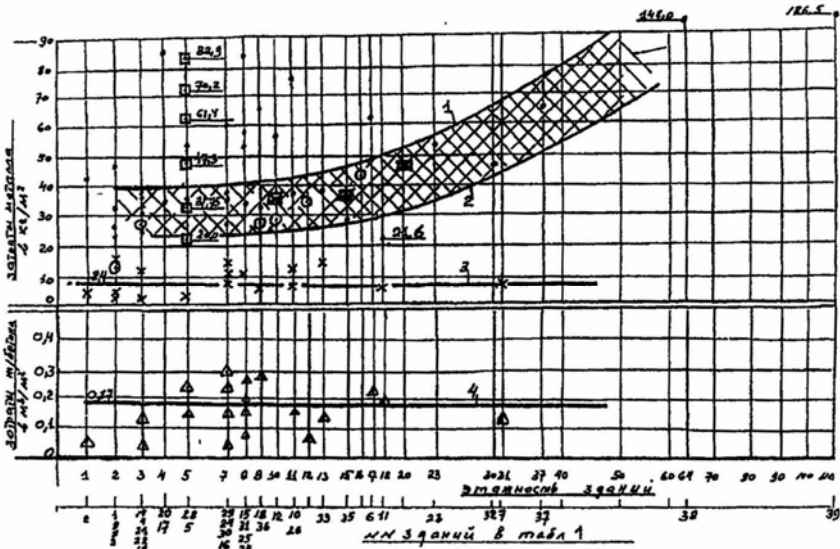
якобы значительно большего расхода металла против зданий в железобетоне бывшим Госстроем СССР было запрещено и ни одно жилое здание со стальными каркасами ни в Украине, ни в странах СНГ возведено не было. Вместе с тем, за рубежом использование стальных каркасов в жилищно–гражданском строительстве находит широкое развитие и практика их применения насчитывает свыше 120 лет. Так, например, в США до 70% таких зданий, от одно–двух– до 110–этажных, возводятся в стальных конструкциях. В Европе металлические конструкции в указанных домах также используются, хотя и в несколько меньшей степени. В северных странах применение железобетонных наружных стен вообще ограничено из–за их низких теплозащитных свойств.

Интерес к стальным конструкциям объясняется многими причинами: они легче аналогичных железобетонных в 8–12 раз, дают возможность монтажа крупными блоками с размерами в несколько этажей, позволяют вести монтажную сборку на болтах, исключив монтажную сварку и мокрые процессы, уменьшают в 2–4 раза, против железобетонных, массу надземной части зданий, а значит, упрощают фундаменты под них и, наконец, существенно сокращают сроки строительства. Все вышесказанное полностью относится к металлическим конструкциям надстраиваемых зданий, где их применение особенно целесообразно.

Для определения эффективности применения металлических каркасов в гражданском строительстве были проведены исследования [11,12] металлоемкости и затрат железобетона зарубежных гражданских зданий со стальными каркасами и выполнено их сравнение с ранее построенными в Украине и СНГ типовыми жилыми пятиэтажными и ныне возводимыми многоэтажными железобетонными домами. Были рассмотрены 39 зарубежных гражданских зданий с металлическими каркасами, различных назначений и высоты, построенных в Европе и Америке в 1960–70 годах.

Несмотря на наблюдаемый известный разброс в затратах металла, исследование позволило установить ориентировочную зависимость металлоемкости от этажности зданий и построить графики затрат металла на один квадратный метр общей площади здания в зависимости от количества этажей (рис.2). Эти кривые, несмотря на некоторую их условность, показывают, что затраты металла в зданиях со стальными каркасами высотой 10–30 этажей находятся в пределах от 22 до 50–60 кг/м². В возводимых в Украине типовых железобетонных домах высотой до 16 этажей эти затраты находятся в пределах 30–50 кг/м². Если их сопоставить с зарубежными металлическими домами одинаковой высоты, то, как видно, расход металла в железобетонных примерно равен, а в отдельных случаях и превышает в домах со стальными каркасами (на рис. 2 обозначены точками в кружочках). Имеются случаи, когда затраты металла в зданиях со стальными каркасами

намного ниже аналогичных домов в железобетоне. Так, например, 18-этажная гостиница "Альфа" в Амстердаме строившаяся в 1968–71 годах, имеет расход металла $21,6 \text{ кг/м}^2$ против $40\text{--}50 \text{ кг/м}^2$ в типовых 16-этажных домах



возводимых в Киеве. В 15-этажном административном здании во Франции расход металла составляет $29,9 \text{ кг/м}^2$, в 30-этажном административном здании в Лондоне – $47,5 \text{ кг/м}^2$ и др.

Рис. 2. Сводный график материалоемкости зданий.

Затраты: 1 – металла при нагрузке $> 500 \text{ кгс/м}^2$; 2 – то же, при нагрузке $< 300 \text{ кгс/м}^2$; 3 – средние затраты арматурной стали; 4 – средние затраты железобетона, – здания со стальными каркасами, – пятиэтажные типовые, – железобетонные панельные, – арматурная сталь, – затраты железобетона, – затраты стали при надстройке.

Таким образом, перерасход металла в зданиях со стальными каркасами против железобетона не наблюдается, и устоявшее мнение о якобы неэффективности использования стальных конструкций в жилищно-гражданском строительстве можно считать необоснованным. Особый интерес, в свете рассматриваемой концепции, представляют затраты металла на стальные каркасы надстраиваемых пятиэтажных зданий. Проводимые исследования показали что при надстройке до 10 этажей они различаются в зависимости от типа здания и системы каркаса в пределах $30\text{--}32 \text{ кг/м}^2$ общей площади надстраиваемых этажей. При надстройке до 15 этажей–

около 35 кг/м^2 , до 20 этажей – около 40 кг/м^2 (на рис.2 показаны крестиками в квадратах). Как видно, расход металла на стальной каркас близок к затратам стали в железобетонных зданиях.

Важным направлением сокращения затрат металла в стальных каркасах, помимо использования наиболее эффективных систем, является рациональный выбор классов и марок сталей. Это важно еще и для уменьшения габаритов отдельных элементов, что необходимо для более удобного размещения их внутри ограждающих конструкций здания. Исследования показали эффективность применения для наиболее нагруженных элементов сталей повышенной и высокой прочности. В первую очередь это касается колонн, в которых усилия при надстройке до 10 этажей находятся в пределах 220–240 т, до 15 этажей – около 400 т, а до 20 – порядка 550–600 т и применение в них сталей повышенной прочности с пределом текучести от 440 МПа и выше рационально. В тяжело нагруженных решетчатых фермах–ригелях и балках междуэтажных перекрытий возможно применение низколегированных сталей повышенной прочности классов С345 и С375 с пределом текучести до 375 МПа (например, марки 09Г2С1 – гр.2), в остальных элементах – обычных углеродистых.

Сегодня прокат для стальных конструкций различного назначения представлен в СнИП II 23–81 нормативными и расчетными сопротивлениями по пределу текучести и временному сопротивлению. СнИП регламентирует использование углеродистых и низколегированных сталей с феррито–перлитной структурой, с нитридным упрочнением и высокопрочных бейнитных для четырех групп конструкций, различающихся назначением и степенью ответственности.

Свойства и область применения феррито–перлитных и закаливаемых в воде строительных сталей широко известны на основе многочисленных исследований и практического опыта. Строительно–технические характеристики высокопрочных малоперлитных и бейнитных сталей требуют подробного изучения.

В настоящее время появилось много публикаций по бейнитам и бейнитным сталям [6,20,22]. И это вполне закономерно, так как бейнитные структуры и, соответственно, стали бейнитного класса, с их привлекательным комплексом механических свойств (высокая прочность с достаточной пластичностью и вязкостью) занимают значительное место при производстве низколегированных и микрелегированных сталей.

Известно, что первые патенты по бейнитным сталям появились после второй мировой войны [19], а большая статья Эборна по малоуглеродистому мартенситу – в 1956 г. [24]. Приоритет наших ученых в развитии методов термомеханической обработки был признан в работе [20].

Большой цикл статей сотрудников Британского общества черной металлургии, опубликованных в журнале "J. Iron and Steel Inst" в 1957–1969

годах, завершился выходом монографии "Физическое металловедение и разработка сталей" доктора Пиккеринга Ф.Б. (Шеффилд) в 1978 г.

Практическая работа по производству и применению высокопрочных строительных сталей бейнитного класса, в частности, стали типа "Фортивелд"— была начата в 60-е годы большими коллективами ученых. Это были ИЭС им. Е.О. Патона, МИСИ им. В.В. Куйбышева, ЦНИИЧМ им. И.П. Бардина и ИЧМ МЧМ СССР, а также КИСИ. У истоков этих работ стояли металлургические заводы Коммунарский и Орско-Халиловский.

Большой технико-экономический эффект обеспечил применение бейнитных сталей в транспортно-отвальных мостах и отвало-образователях, в металлических копрах и других конструкциях, применяемых в угольной промышленности.

Значение этих работ трудно переоценить. Они, безусловно, опережали свое время, были направлены на снижение металлоемкости изделий и конструкций из высокопрочных строительных сталей и создавали реальные основы для широкого использования этих сталей в различных отраслях промышленности нашей страны.

Затем высокопрочные стали были применены для изготовления тяжело нагруженных узлов и деталей карьерных и шагающих экскаваторов, грохотов большегрузных 75-тонных самосвалов, горношахтного оборудования, дорожных машин, золотодобывающих драг и т.д. Во всех известных случаях применение высокопрочных сталей обеспечивало значительное снижение веса конструкций, повышало эксплуатационную надежность и долговечность машин, механизмов и сооружений, обеспечивало большую экономию металла. Уже тогда было понятно, что широкое внедрение свариваемых низколегированных сталей бейнитного класса является важным фактором технического прогресса в машиностроении и строительстве. Нельзя не назвать энтузиастов внедрения высокопрочных сталей. Это Б.С. Касаткин, М.М. Жербин, В.Ф. Мусияченко, М.А. Тылкин, К.Ф. Стародубов, И.Г. Узлов, Б.Е. Патон и многие другие.

По итогам этих работ, а также по результатам работы Коммунарского металлургического завода по выпуску опытно-промышленных партий высокопрочных сталей академик К.Ф. Стародубов подготовил записку в Правительство СССР и разработал план глубокого исследования структуры и свойств высокопрочных строительных сталей. В записке указывалось, что, несмотря на некоторые успехи по производству высокопрочных сталей, металлургические заводы не готовы к глобальному решению этой проблемы так же, как и потребители-строители и машиностроители. Производство указанных высокопрочных сталей бейнитного класса требует как значительно более высокой культуры производства стали, так и более высокой культуры производства металлических конструкций. Необходимы дополнительные

исследования структуры и свойств этих сталей и т.д. В связи с этим Институт черной металлургии МЧМ СССР пригласил для выполнения этих работ МИСИ им. В.В. Куйбышева (проф. М.А. Тылкин), Днепропетровский инженерно-строительный институт и Днепропетровский завод металлических конструкций им. Бабушкина. Работы, которые были запланированы, опережали уровень зарубежных разработок. Было предпринято комплексное исследование бейнитных структур методами трансмиссионной электронной микроскопии. К этому проекту было привлечено внимание таких ученых как акад. Г.В. Курдюмов и д.т.н. Р.И. Энтин, работы проводились в лаборатории № 2 ИМФ ЦНИИЧМ под непосредственным руководством проф. М.А. Тылкина и с.н.с., к.т.н. Л.Г. Орлова. Результаты этих работ были опубликованы в трех десятках публикаций, в т.ч. и за рубежом, а затем была издана монография: Большаков В.И., Стародубов К.Ф., Тылкин М.А. Термическая обработка строительной стали повышенной прочности. – М.: Металлургия, 1977. – 199 с. с ил. На то время это была первая монография в мире, где, наряду с детальными исследованиями микроструктуры высокопрочных сталей, была в полной мере использована техника просвечивающей электронной микроскопии, опережающая на то время разработки Ф.Б. Пиккеринга (Англия, Шеффилд).

Прошло 20 лет и сегодня трудно переоценить значение этих работ для нашей страны. Сказалось удивительное предвидение академика К.Ф. Стародубова о том, что высокие потенциальные качества высокопрочных строительных сталей следует реализовать методами термомеханической обработки или сочетания контролируемой прокатки и регулируемого охлаждения с целью получения фрагментированной бейнитной структуры с повышенной плотностью дислокаций. Именно эти работы получили продолжение в Приднепровской академии строительства и архитектуры на кафедре технологии металлов (зав. д.т.н., проф. В.И. Большаков).

Опыт производства и опыт ВТМО бейнитных сталей позволил перенести его на микролегированные ниобием и ванадием стали [7, 8, 10]. Морфологии и особенности превращения малоуглеродистого мартенсита [9, 13–17, 25], нижнего бейнита и игольчатого феррита были обобщены в работах Мардера и Крауса [19], а развитие методов контролируемой прокатки сталей бейнитного класса микролегированных сталей приведены в работах [3–5, 22, 23, 25, 26]

Ниже приводятся химический состав и механические свойства исследуемых марок сталей

На рис. 3 приведены микроструктуры стали 09Г2ФБ после прокатки на стане 3600 меткомбината "Азовсталь".

Таблица 1. Химический состав выбранных марок сталей

Марки стали	Содержание химических элементов, %									
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	V	Mo	другие
ВСтЗпс6, 16Г2АФ	0,19 0,17	0,49 1,45	0,09 0,37	0,029 0,015	0,016 0,012	. 0,08	— 0,011	— —	— —	— 0,02N 0,1V
09Г2ФБ* (БКЧМ)	0,1	1,4	0,29	0,005	0,006	0,02	0,02	0,08	0,02	0,045Nb 0,03Al 0,014N
14Х2ГМР**	0,14	1,04	0,25	0,02	0,029	0,45	0,03	0,03	0,5	0,002В
12Г2СМФ	0,12	1,6	0,55	0,012	0,018	—	—	0,1	0,2	—
09Г2ФБ***	0,08	1,4	0,22	0,005	0,019	—	—	0,07	—	0,024Nb

* Сталь опытно-промышленной выплавки Британской корпорации черной металлургии (БКЧМ).

** Сталь 14Х2ГМР разработана и внедрена в производство ЦНИИЧМ им. И.П. Бардина и ИЭС им. Е.О. Патона, МИСИ им. В.В. Куйбышева, ИЧМ МЧМ СССР).

*** Сталь 09Г2ФБ разработана ЦНИИЧМ им. И.П. Бардина.

Таблица 2. Механические свойства после контролируемой прокатки исследуемых сталей

Обработка	Марка стали	Ударная вязкость, Мдж/м ² (кгс.м/см ²)							
		Температура отпуска, °С							
		б/о	100	200	300	400	500	600	650
Закалка от отдель- ного нагрева со скоростью 120°С/с	Вст. 3	0,4 (4,0)	0,21 (2,1)	0,20 (2,01)	0,27 (2,71)	0,48 (4,85)	0,86 (8,63)	1,04 (10,45)	1,45 (14,58)
	16Г2АФ	0,25 (2,50)	0,38 (3,86)	0,21 (2,13)	0,27 (2,75)	0,66 (6,63)	1,03 (10,35)	1,70 (17,04)	1,36 (13,61)
	12Г2СМФ	0,248 (2,48)	0,34 (3,40)	0,22 (2,21)	0,18 (1,77)	0,20 (2,02)	0,24 (2,40)	0,40 (4,00)	0,43 (4,36)
ВТМО, закалка со скоростью 120°С/с	Вст. 3	0,26 (2,58)	0,28 (2,85)	0,22 (2,25)	0,27 (2,70)	0,28 (2,78)	0,29 (2,95)	0,54 (5,40)	0,94 (9,38)
	16Г2АФ	0,35 (3,53)	0,35 (3,57)	0,28 (2,85)	0,25 (2,50)	0,45 (4,53)	0,32 (3,28)	0,63 (6,33)	0,82 (8,20)
	12Г2СМФ	0,34 (3,40)	0,30 (3,00)	0,29 (2,91)	0,29 (2,90)	0,30 (2,95)	0,39 (2,85)	0,39 (3,90)	0,45 (4,50)

Таблица 3. Влияние типа структуры на механические свойства исследуемых строительных сталей после различных обработок

№/№ п/п	Марка стали	Обработка стали	Предел Прочности, МПа	Предел Текучести, МПа	Оносит. удлинен., %	Оносит. сужение, %	Твердость, НВ	Структура стали
1.	Ст.3	ГК	380,0	230,0	23	60	248	Ферритно-Перлитная Ферритно-Бейнитная
		ВТМО $T_{\text{ауст}} = 1000$	1240,0	1040,0	7	22	345	
		ВТМО+отпуск 500°C	760,0	570,0	19	57	212	
2	16Г2АФ	ГК	600,0	450,0	19	54	255	Ферритно-бейнитная Реечный Мартенсит
		ВТМО	1310,0	1100,0	7	30	369	
		ВТМО+отпуск 600°C	790,0	660,0	22	55		
3.	09Г2ФБ	Контролир. прокатка	600,0	470,0	23	60	276	Ферритно-Перлитная
4.	14Х2ГМР	ВТМО	1330,0	1160,0	8,7	38	358	Реечный Мартенсит
		ВТМО+отпуск 650°C	930,0	850,0	14	49	259	

Из рис.3 следует типичная для контролируемой прокатки феррито-перлитная структура. Феррит характеризуется большим количеством выделения карбидов ванадия и ниобия. На рис. 4 приведены субзеренные структуры, обеспечивающие оптимальный комплекс механических свойств.

Анализ механических свойств позволяет сделать вывод о целесообразности закалки с прокатного нагрева после контролируемой прокатки и расширения использования сталей типа 09Г2ФБ для изготовления морских платформ, сосудов высокого давления и строительных металлических конструкций.

Проведенный анализ эффективности применения металлических каркасов в гражданском строительстве вместо традиционного железобетона свидетельствует о том, что затраты металла в зданиях со стальными конструкциями не превышают затрат типовых серий с железобетонными конструкциями. Выполненные проектные разработки по надстройке пятиэтажных зданий показали, что расход металла на стальной каркас близок к затратам стали в железобетонных зданиях.

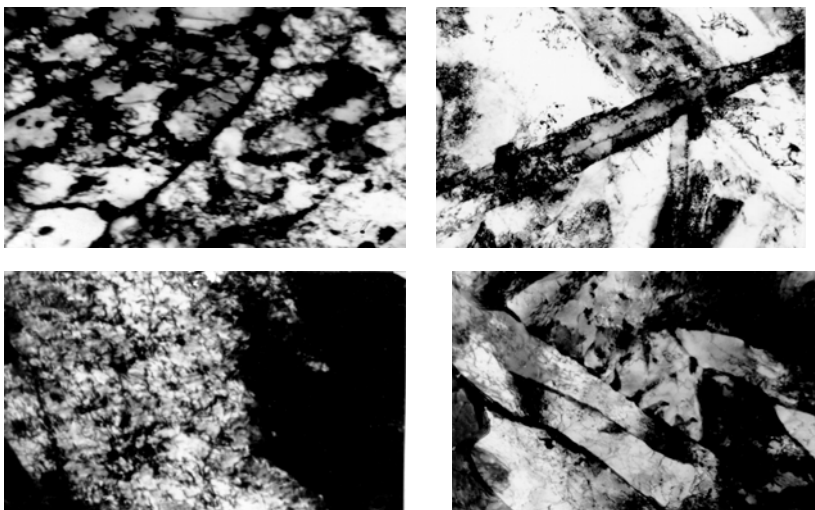


Рис.3. Микроструктура стали 09Г2ФБ, которая обеспечивает оптимальные механические свойства:

слева сверху – оптимальная субзеренная структура; $\times 22000$; справа сверху – игольчатый феррит; $\times 22000$; слева внизу – повышенная плотность дислокаций; $\times 28000$; справа внизу – образование "чистых" границ и центров рекристаллизации внутри сформированного игольчатого феррита; $\times 28000$.

Важным направлением сокращения затрат металла в стальных каркасах является использование сталей повышенной и высокой прочности для наиболее нагруженных элементов (от 440 МПа). Для внедрения в практику строительства таких сталей необходимо изучение и совершенствование их строительно-технических свойств. Работы по выпуску опытно-промышленных партий проката высокопрочных строительных сталей бейнитного класса С 70/60 на Коммунарском металлургическом заводе, а затем на Орско-Халиловском металлургическом комбинате были успешно завершены к семидесятым годам. Всесторонние исследования, которые проводились в 1965–1967 гг. Коммунарским металлургическим заводом,

Институтом электросварки им. Е.О. Патона АН УССР, ЦНИИЧМ им. И.П. Бардина, КИСИ и МИСИ позволили разработать и освоить производство двух высокопрочных марок сталей с пределом текучести $60\text{--}70 \text{ кг/мм}^2$ – 14Х2ГМР и 14ХМНДФР. Было выплавлено более 1 тыс. тонн. Эти стали обладали глубокой прокаливаемостью, что позволяло получать при закалке стабильную мартен-ситную структуру в листах толщиной до 100 мм и более. После закалки и высокого отпуска при температуре $600\text{--}650^\circ\text{C}$ механические свойства листового проката следующие:

- предел текучести – не менее 600 МПа;
- предел прочности – не менее 700 МПа;
- относительное удлинение – не менее 14%;
- ударная вязкость при -40°C – не менее 4 кгм/см^2 .

Совмещение процесса контролируемой прокатки с ТМО позволяет получить механические свойства, удовлетворяющие уровню свойств сталей класса Х70. Снижение углеродного эквивалента, связанного с упрочнением химического свойства этих сталей, позволяет улучшить их свариваемость, повысить их сопротивление хрупкому и усталостному разрушению.

На основании настоящих работ сегодня формируется Национальная программа "Высокопрочные свариваемые стали для Украины". Показаны приоритетность и необходимость проведения такого цикла научно-исследовательских работ. Продолжается совершенствование технологии контролируемой прокатки с последующим ускоренным охлаждением на стане 3600 меткомбината «Азовсталь». Академия разрабатывает нормативные документы по применению сталей с ниобием и ванадием для строительных металлических конструкций.

Несколько лет назад я обсуждал результаты работ начатых К.Ф. Стародубовым и его командой с Б.Е. Патонем. Мы пришли к выводу, что эти работы были незаслуженно забыты, а в свое время в 70-е годы не были представлены на соискание Гос. Премии Украины и Б.Е. Патон сказал, что несмотря на то, что такие исполнители как К.Ф. Стародубов, Б.С. Касаткин, М.А. Тылкин ушли в мир иной все таки следовало бы представить эту работу на соискание Гос. Премии Украины. И это будет справедливо и мы отдадим дань первооткрывателям и внедренцам бейнитных высокопрочных строительных сталей в СССР. А роль этих разработок трудно переоценить, ведь без производства высокопрочных строительных сталей с пределом текучести 600 МПа невозможно высотное строительство в нашей стране. Кроме того опыт производства и исследования структурообразования сталей типа 14Х2ГМР, 14ХМНДФР показал возможность их производства методом контролируемой прокатки, что дает вторую жизнь этому классу сталей на Украине.

Из разработчиков этих сталей сегодня здравствуют И.Г. Узлов, В.Я. Савенков, Б.Е. Патон, Л.М. Любашев, М.М. Жербин, В.И. Большаков, Е.П.

Лукияненко, и наши уже ушедшие из жизни корифеи К.Ф. Стародубов, Б.С. Касаткин, Л.Г. Орлов (организации институт сварки им. Е.О. Патона, ИЧМ НАН Украины, завод им. Бабушкина (г. Днепропетровск), КНУБА, ПГАСиА). Нам казалось бы, что выдвижение этой работы восстановило бы справедливо по отношению к разработчикам этой проблемы, такой важной сегодня для Украины.

1. *Долженков И.Е., Долженков И.И.* Сфероидизация карбидов в стали. – М. Металлургия, 1984. – 140 с., ил.

2. *Утевский Л.М.* Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. – М. Металлургия, 1973. – 582 с., ил.

3. *Большаков В.И.* Разработка и использование сталей повышенной и высокой прочности в строительстве // Вісник Академії будівництва України. – 1997. – № 3. – С. 63–68.

4. *Большаков В.И.* Упрочнение строительных сталей. – Днепропетровск: Січ. – 1993. – 333 с.

5. *Большаков В.И.* Экономическая эффективность применения сталей бейнитного класса // Проблемы современного материаловедения. – Днепропетровск, 1998. – С. 10–14.

6. *Большаков В.И.* Экономическая эффективность применения бейнитных сталей // Theoretical Foundations of civil engineering. – Warsawa, June 1998.

7. *Большаков В.И., Монгайт И.А.* Закалка с прокатного нагрева малоperlитной конструкционной стали, микролегированной ниобием и ванадием // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1983. – № 12. – С. 42–44.

8. *Большаков В.И., Монгайт И.А.* Исследование тонкой структуры закаленной стали с ниобием и ванадием после контролируемой прокатки // Известия вузов. – Черная металлургия. – 1983. – № 7. – С. 102–106.

9. *Большаков В.И., Монгайт И.А., Котова Л.И.* Выбор оптимального структурного состояния конструкционных строительных сталей бейнитного класса // *МиТОМ*. – 1976. – № 2. – С. 28–31.

10. *Большаков В.И., Стародубов К.Ф., Куксенко И.В.* Электронно-микроскопические исследования тонкой структуры низколегированной стали после контролируемой прокатки и прямой закалки // Доклады АН УССР. – Серия А. – Физ. мат. и техн. науки. – 1983. – С. 76–78.

11. *Жербин М.М., Большаков В.И.* Новая концепция модернизации и надстройки существующих малоэтажных жилых зданий до любого количества этажей // Вестник академии. – 1998. – № 2. – С. 5–50.

12. *Жербин М.М., Большаков В.И.* Нова концепція реконструкції та модернізації існуючих житлових будинків // Будівництво України. – 1998. – № 2. – С. 19–23.

13. *Изотов В.И.* Морфология и кристаллография реечного (массивного) мартенсита // ФММ. – 1972. – Т. 34. – Вып. 1. – С. 123–132.

14. *Изотов В.И., Утевский Л.М.* О тонкой структуре мартенсита // Проблемы металловедения и физики металлов. – М.: Металлургия, 1968. – Вып. 58, Сб. № 9. – С. 24–37.

15. *Карабасова Л.В., Спасский М.Н., Штрель М.А.* Иерархия структуры малоуглеродистого мартенсита // ФММ. – 1972. – Т. 34. – Вып. 1. – С. 123–132.

16. Курдюмов Г.В. Кристаллическая решетка мартенсита, механизм А–М–превращения и поведение углерода в мартенсите // ФММ. – 1976. – Т.42, № 3. – С. 527–546.

17. Спасский М.Н., Утевский Л.М., Хашимов Ф.Р. О структуре мартенсита и ее изменениях в результате термомеханической обработки // ФММ. – 1965. – Т. 20, № 4. – С. 614–621.

18. Aborn R.H. Low carbon martensite // Trans. ASTM. – 1956. – V. 48. – P. 51–85.

19. Bardgett W.E., Reeve L. Mechanical properties of low-carbon low-alloy steels containing boron // JISI. – 1949. – V. 163, N 11. – P. 277–294.

20. Bolshakov V.I. Substructural strengthening of constructions steels. – Canada. Basilian Press, 1998. – 312 p.

21. Bolshakov V.I., Mironova O.Y. Structure and properties of HSLA steels // Metal 98 the 7-th International Metallurgical Fair and Symposium. – Ostrava–Czech Republic, May 1998.

22. Habracken L.J., Economopoulos M. Bainite microstructures in low carbon alloy steels and their mechanical properties // Transformation and Hardenability in Steels. Climax Molybdenum Company Symp.– Ann Arbor. – 1967. –P. 69–108.

23. Irvine K.J. The development of high strength steels // JISI. – 1962. – V. 200, N 10. – P. 820–834.

24. Kopenaal T.J. The current status of thermomechanical treatment of steel in the Soviet Union // Trans. Quart. – 1969. – V. 62, N 1. – P. 24–37.

25. Marder A.R., Krauss G. The morphology of martensite // Trans of ASM. – 1967. – N 1. – P. 651–160.

26. Pickering F.B. High-strength, Low alloy steels – A decade of progress // Micro Alloying'75. – International Conf. – Washington, 1975. – P. 9–30.