

УДК 669.771.23-413.002.64

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СУБСТРУКТУРЫ
ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННОГО АУСТЕНИТА ПРИ
КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКЕ
НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

***д.т.н., проф. В.И. Большаков, *к.т.н., доц. Д.В. Лаухин,
*д.т.н., проф. Г.Д. Сухомлин, к. ф-м. н., проф. Р.Г. Романец ,
*к.т.н., доц. А.В. Бекетов,*м.н.с. С.В. Иванцов,
*асп. А.В. Рязанова, асп. Н.В. Сахник**

**ГВУЗ «Приднепровская государственная академия
строительства и архитектуры»,*

Введение

В настоящее время существует ряд отечественных разработок, направленных на использование высокопрочного металлопроката при строительстве многоэтажных зданий и сооружений, – для изготовления металлических каркасов (основы здания), на базе которых формируется вся конструкция [1].

Интерес к стальным каркасам высотных зданий постоянно растет, что объясняется рядом причин и, в первую очередь, тем, что современное строительство ведется, как правило, в уже застроенных центральных частях городов, где стоимость земли большая, а застраиваемые площади малы. Кроме того, применение конструкций из стали позволяет осуществлять надстройки существующих зданий, поскольку стальные каркасы во много раз легче железобетонных, более просты в выполнении, и, кроме того, дают возможность вести монтаж укрупненными блоками. Для снижения массы конструкций следует свести к минимуму расходы металла как за счет применения высокопрочных экономнолегированных сталей, так и путём индивидуального подбора сечения каждого элемента, исходя из конкретных условий его напряженно-состояния.

Применение высокопрочных сталей в каркасах многоэтажных зданий позволит уменьшить толщину отдельных элементов, и таким образом, массу всей конструкции приблизительно на 60%, снизить расходы на транспортировку и монтаж и сократить объем сварочных работ на 25% [2].

Таким образом, главными требованиями, которые предъявляются к современным стальным конструкциям наряду с экономической эффективностью, является их высокая надежность в эксплуатации при относительно малой массе и сечении отдельных элементов [3].

Надежность конструкций из высокопрочных сталей должна обеспечиваться следующими показателями механических свойств проката: высокой прочностью, пластичностью и ударной вязкостью вдоль, поперек и по толщине продукции, а также контролем качества изготовления изделий на заводах металлоконструкций.

Учитывая непрерывный рост производства высокопрочного толстого листа из микролегированных сталей в мировом масштабе и в Украине, а также перспективу использования его в строительстве, работа, направленная на

повышение механических и эксплуатационных свойств листового проката из низкоуглеродистых микролегированных сталей за счет совершенствования технологической схемы и технологических режимов его изготовления, является актуальной.

Целью данной работы является повышение комплекса механических и эксплуатационных свойств металлопроката из низкоуглеродистых микролегированных сталей, используемых в сварных металлических строительных конструкциях ответственного назначения, путем усовершенствования технологии его производства.

Для достижения этой цели в работе поставлены следующие основные задачи:

- выбрать на научной основе марку стали для строительных конструкций ответственного назначения с оптимальным сочетанием характеристик прочности и пластичности, а также показателей свариваемости и стоимости проката;
- разработать методику определения размера аустенитного зерна, которое формируется при горячей деформации в условиях промышленного производства, с целью контролирования избыточного его роста, который может приводить к снижению характеристик пластичности готового листа;
- изучить закономерности формирования показателей субструктуры: размеров субзерен, углов разориентации на малоугловых полигональных границах при горячей деформации аустенита на модельной стали, которая сохраняет аустенитную структуру при охлаждении до комнатной температуры;
- определить характер влияния количества циклов горячей деформации на стадии черновой прокатки на структуру и механические свойства готового листового проката из стали 10Г2ФБ;
- разработать усовершенствованную технологическую схему и температурно-деформационный режим контролируемой прокатки толстолистовой стали в условиях ОАО «ММК им. Ильича», обеспечивающие повышение комплекса механических свойств проката.

Выбор и обоснование материала для исследований

На основе проведенного анализа установлено, что при выборе стали для проектирования строительных металлических конструкций следует отдавать предпочтение низкоуглеродистым микролегированным сталям типа 10Г2ФБ (показано стрелками на рис. 1), поскольку они при одинаковом уровне прочности имеют более высокий уровень пластичности по сравнению с другими сталями.

Несмотря на относительно высокую стоимость сталей этого типа, их использование в промышленном и гражданском строительстве является экономически целесообразным благодаря экономии металла за счет уменьшения сечения изделий. В связи с этим, для исследования была выбрана феррито-перлитная сталь 10Г2ФБ, которая хорошо зарекомендовала себя при изготовлении труб для газонефтепроводов большого диаметра и хорошо подходит по своим характеристикам для использования в строительстве в качестве мате-

риала для изготовления металлических каркасов зданий.

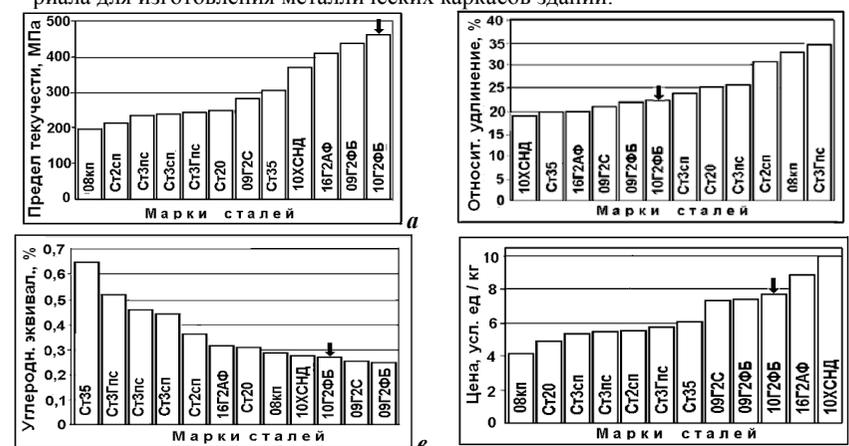


Рис. 1. Диаграммы распределения характеристик марок сталей для толстолистового проката, наиболее широко используемых в строительстве.

Поскольку в феррито-перлитных сталях аустенит исчезает при снижении температуры в α -область, то с целью определения динамики развития дислокационной структуры аустенита в горячедеформированном прокате из низкоуглеродистых сталей в качестве модельного материала была использована аустенитная сталь 08X18H10T, которая сохраняет ГЦК решетку до комнатной температуры. Опытные прокатки сталей 08X18H10T и 10Г2ФБ осуществляли на стане ДУО 280 Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАНУ. Промышленные прокатки стали осуществляли на стане 3000 в условиях «ММК им. Ильича».

Структуру образцов сталей 10Г2ФБ и 08X18H10T изучали методами качественной и количественной световой микроскопии на приборах: «Axiovert 200 MAT», «Неофот-2», автоматическом анализаторе структуры «Leika DM RM», а также методами дифракционной электронной микроскопии и микродифракции на электронном микроскопе ЭМ-125К. Испытания механических свойств на растяжение проводили по нормативам EN 10002-1:2006, на ударный изгиб по EN 10045-1:2006 на образцах с U- и V-образным надрезами.

Результаты и их обсуждение

В работе рассмотрены процессы структурообразования, которые происходят при высокотемпературной деформации в черновой клети листопркатного стана, и имеют важное значение для процесса распада аустенита в межкритическом интервале температур, поскольку они определяют скорость формирования и количество зародышей доэвтектоидного феррита при последующем охлаждении проката на обводном рольганге. Даже небольшие изменения в режиме горячей деформации аустенита влияют как на кинетику процесса фазового превращения, так и на структуру продуктов распада аустенита и, как следствие, на эксплуатационные свойства готового листа.

Влияние температуры конца деформации в черновой клетке на комплекс механических свойств было изучено на основе анализа данных результатов изготовленной в заводских условиях партии из более 500 листов толщиной 16...22 мм из стали 10Г2ФБ. Температура конца черновой прокатки колебалась от 1025 до 920°C при неизменных температурно-деформационных режимах прокатки в чистовой клетке (рис. 2).

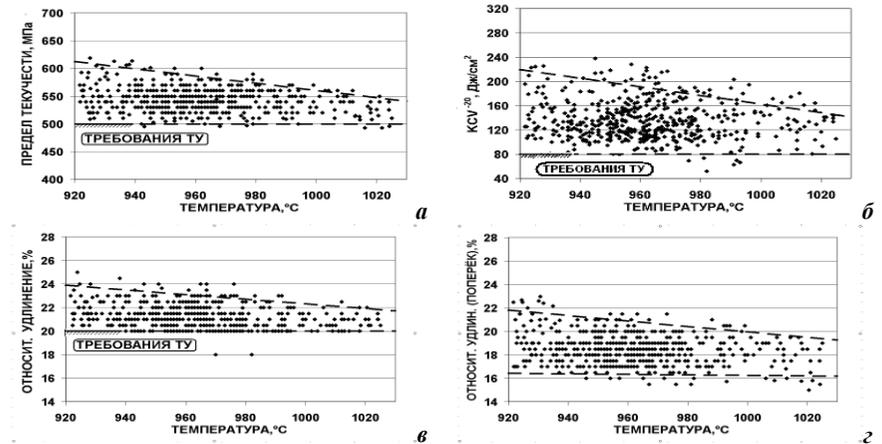


Рис. 2. Механические характеристики листов, прокатанных при разных температурах конца деформации в черновой клетке: а - предел текучести; б – ударная вязкость; в - относительное удлинение (вдоль Н.П.); г - относительное удлинение (поперек Н.П.).

Для количественной и качественной оценки превращений в структуре горячедеформированного аустенита, которые происходят в реальных производственных условиях в последеформационный период, который длится с момента окончания черновой прокатки до начала деформации в чистовой клетке, была проведена горячая деформация образцов аустенитной стали 08Х18Н10Т в условиях, имитирующих реальные режимы заводской технологии, рис. 3.

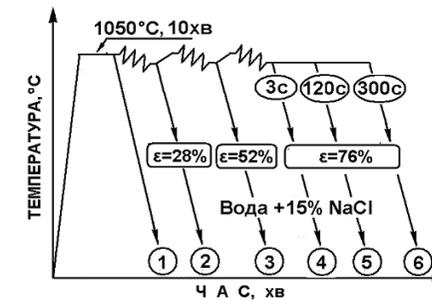


Рис. 3. Технологическая схема прокатки образцов стали 08Х18Н10Т

Результаты исследований приведены на рисунках 4 и 5. К началу деформации (образец 1, рис. 3) сталь имела равновесную рекристаллизованную структуру, средний размер зерна составлял 40...60 мкм, плотность дислокаций $\rho = 5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}$ (рис. 4а). При сравнительно малых степенях деформации ($\varepsilon = 28\%$) плотность дислокаций равняется $\rho = 5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}$.

Они образуют в основном четкие границы субзерен, внутренние объемы которых почти свободны от дислокаций (рис. 4б). По мере увеличения деформации (до $\varepsilon = 52\%$) субзерна приобретают вытянутую форму, вытягиваясь в направлении течения металла (рис. 4в). Повышение степени деформации до $\varepsilon = 76\%$ (образец 4, рис. 3) создает в аустените выраженную текстурированную субзеренную структуру с четкими малоугловыми границами, отдельные дислокации в них не определяются (рис. 4г).

Установлено, что релаксационные процессы, которые протекают как на дислокационном, так и на зернограничном уровнях во время деформации и междеформационных пауз, способствуют стабилизации зеренной и субзеренной структур и происходят в течение всего последеформационного периода, вплоть до начала развития статической рекристаллизации, хотя скорость их относительно невелика.

Например, после выдержки в течение 120 с при 1050°C , параметры субструктуры почти такие же, как и сразу после деформации: угол разориентации θ составляет около $5,3^\circ$ при среднем диаметре субзерен 2,7 мкм (рис. 4д). По мере увеличения выдержки до 300 с углы θ уменьшаются до $2,1^\circ$, размер субзерен растет до 5,1 мкм, рекристаллизация развивается на 35...50%, (рис. 4е).

Результаты электронномикроскопических исследований подтверждают микродифракционными количественными данными, полученными путем определения среднего угла разориентации θ на дистанции 7 мкм (размер селекторной диафрагмы), а также угла θ' , который приходится на одну субгранницу. Они свидетельствуют о том, что характеристики субструктуры в первую очередь зависят от степени деформации. Розориентация на границах субзерен с увеличением степени деформации растет (рис. 5).

Таким образом, при этих режимах формируется стойкая полигональная субструктура, которая сохраняется сравнительно длительное время, что позволяет считать многократную деформацию перспективной для улучшения свойств готовых изделий используя принципы наследования субструктуры горячей деформации аустенита.

Для исследования влияния охлаждения (длительности последеформационных пауз) на развитие процессов рекристаллизации аустенита при горячей деформации, проводили эксперимент по следующей схеме: нагрев заготовки

из стали 10Г2ФБ до температуры 950°C → деформация со степенью 20% → охлаждение на воздухе в течение 5; 15; 30; 40; 50; 60; 90; 120; 180 и 300 с → закалка в подсоленной воде.

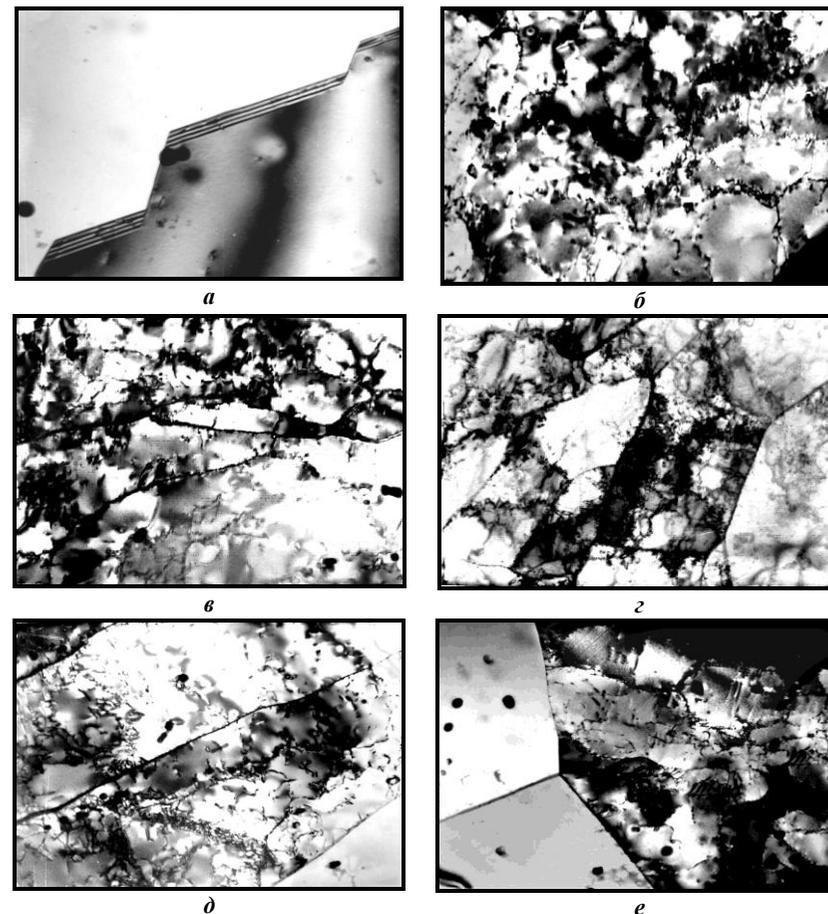


Рис. 4. Структура горячедеформированного аустенита ($\times 22\,000$) после прокатки с деформацией (%): а – 0; б – 28; в – 52; г – 76 при температуре 1050°C, а также после прокатки с деформацией 76% с последующим охлаждением на воздухе в течение: д – 120 с; е – 300 с.

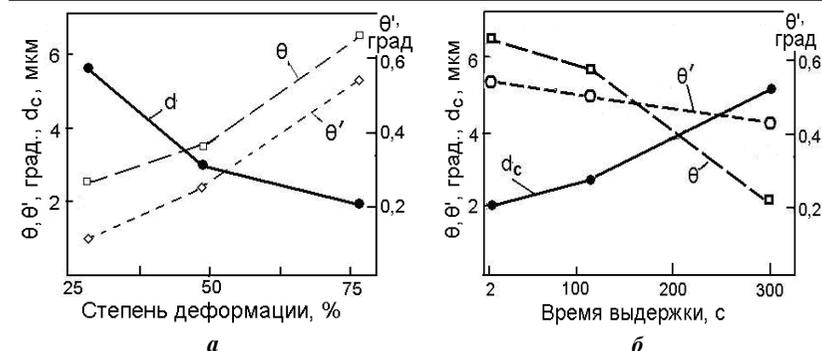


Рис. 5. Параметры субструктуры в зависимости от: а – степени деформации при 950...1050°С; б – продолжительности последеформационной выдержки на воздухе.

Исследования микроструктуры показали, что закалка после паузы 5 с фиксирует мартенситно-бейнитную структуру с высокой степенью дисперсности (рис. 6а). При этом изкоуглеродистый мартенсит имеет очень короткие рейки, что указывает на существование эффективных препятствий в аустенитной матрице, в которой они формируются.

Во время охлаждения на воздухе в течение 15 с температура снижается в межкритическую область и, соответственно, по границам аустенитных зерен появляются прослойки доэвтектоидного феррита (рис. 6б), а после паузы 30 с они видны достаточно отчётливо (рис. 6в). Их топография позволяет воссоздать расположение бывших границ первых рекристаллизованных зерен аустенита и оценить их размеры. Кроме того, после выдержки на воздухе в течение 15 с и больше вместе с прослойками доэвтектоидного феррита наблюдаются многочисленные мелкие (до 3 мкм) зародыши ферритных кристаллов, расположенных группами по несколько десятков (пауза 15 с) и даже сотен (пауза 60 с) единиц (рис. 6а, б). Следовательно, эти кристаллы-зародыши возникают на полигональных дислокационных границах, которые формируются во время динамической и последеформационной полигонизации.

Более длительное (до 5 минут) охлаждение на воздухе перед закалкой приводит к образованию более крупных, до 10...15 мкм, зерен избыточного феррита, который выделяется при распаде аустенита во время сравнительно медленного охлаждения. Остаточный аустенит при закалке превращается в среднеуглеродистый мартенсит, который, как показывает подсчет относительного количества ферритной составляющей в структуре стали, содержит до 0,5...0,7% С (рис. 6в, г).



Рис. 6. Структура стали 10Г2ФБ ($\times 1250$) после экспериментальной прокатки, выдержки в течение (с): а – 5; б – 15; в – 120; г – 300 и последующей закалки.

Количественным анализом определен размер зерна аустенита, которое формируется при статической рекристаллизации после горячей деформации доэвтектоидной низкоуглеродистой стали при температурах аустенитной области выше A_{r3} ($980...920^{\circ}\text{C}$), а также при последующем частичном распаде аустенита в межкритическом интервале температур.

Установлено, что образовавшиеся после окончания горячей деформации аустенитные зерна растут медленно и в течение первой минуты достигают среднего размера $20...30$ мкм. После паузы 120 с средний размер зерна достигает 40 мкм и в дальнейшем остается на этом уровне. При этом следует учитывать, что рост зерен аустенита происходит под действием сил натяжения полигональных границ, разориентация на которых со временем снижается. В результате снижается их поверхностное натяжение и уменьшается движущая сила процесса роста зерен. Последующая стабилизация и прекращение роста зерна связаны с тем, что при снижении температуры в межкритический интервал появляются зародыши доэвтектоидного феррита, которые блокируют границы аустенита, препятствуя их перемещению и, таким образом, тормозят рост зерна.

Перед началом охлаждения структура аустенита может быть представлена как скопление многочисленных, разделенных полигональными границами субзерен, и если создать условия для повышения устойчивости такой полигонизованной субструктуры, то она может способствовать общему измельчению конечной зеренной структуры и повышению как прочностных, так и пластических свойств готового проката.

Результаты комплексных исследований позволили рекомендовать толстолистовой прокат из стали 10Г2ФБ к использованию в строительстве в качестве материала для изготовления металлических каркасов сооружений и большепролётных перекрытий.

Основные выводы по работе:

1. Проведен сравнительный анализ механических характеристик, степени легирования, показателя свариваемости (углеродного эквивалента) и стоимости толстого листа из строительных сталей и сталей для магистральных газонефтепроводов. За основу при этом были взяты характеристики, которые являются основными для расчета строительных металлоконструкций, – предел текучести (σ_T) и относительное удлинение (δ_5).
2. В работе сделано теоретическое обобщение и предложены новые решения научных и практических задач, которые заключаются в управлении структурным состоянием низкоуглеродистых микролегированных сталей при контролируемой прокатке на основе создания особенного субструктурного состояния аустенита при горячей деформации.
3. Методом дифракционной электронной микроскопии показано, что многократная высокотемпературная деформация формирует в аустените стали развитую субзеренную структуру, которая после суммарной деформации $\varepsilon = 50...75\%$ характеризуется средней разориентацией около $0,5^\circ$ на одной субгранице и размером субзерен около 2 мкм.
4. Обработкой количественных данных относительно тонкой структуры горячедеформированного аустенита получена зависимость величины максимального угла (θ) разориентации субзерен от суммарной степени деформации (ε): $\theta = k \cdot \varepsilon$, (где $k = 0,10$ градуса/процент.) и показано, что на черновой стадии прокатки в металле формируется термически метастабильная субструктура, которая сохраняется длительное время после завершения деформации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жербин М.М. Высокопрочные строительные стали (характеристики, область применения, расчет и проектирование) / Жербин М.М.– К.: „Будівельник“, 1974. – 160 с.
2. Экономические предпосылки применения стали повышенной прочности при реконструкции зданий первых массовых серий / В.И. Большаков, О.Ю. Щеглова, Д.А. Вязовая // Матеріалознавство та термічна обробка матеріалів. – 2003. – №2-3 – С 40-45.
3. Большаков В.И. Использование сталей повышенной прочности в новом высотном строительстве и реконструкции / В.И. Большаков, О.В. Разумова. – Дніпропетровськ: Пороги, – 2008. – 216 с.