

В.И.Спиваков**ПУТИ РАЗВИТИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ
ТОЛСТОЛИСТОВОЙ СТАЛИ***Институт черной металлургии НАН Украины*

Приведен краткий обзор работ, выполненных в ИЧМ НАНУ по проблеме термического упрочнения толстолистового проката конструкционного назначения, выдвинутой академиком К.Ф. Стародубовым в 70–е годы.

К.Ф. Стародубов, обладая большой научной эрудицией и жизненным опытом, умел предвидеть перспективные научно–технические направления в области термической обработки массовых видов проката. Исследования закалки и отпуска низкоуглеродистой стали, выполненные под его руководством Ю.З. Борковским, убедительно свидетельствовали о перспективных возможностях процессов термического упрочнения для повышения комплекса свойств рядовой толстолистовой стали [1].

По инициативе К.Ф. Стародубова, в 70–е годы в ИЧМ были начаты работы по созданию технологий для термического упрочнения толстых листов и широкополосной стали путем регулируемого ускоренного охлаждения (РУО) с прокатного нагрева. Непосредственной причиной для этого явился возрастающий спрос на недорогие толстолистовые стали повышенной ($\sigma_T = 325 - 425 \text{ Н/мм}^2$) и высокой ($\sigma_T \geq 450 \text{ Н/мм}^2$) прочности, производство которых в то время отставало от потребностей народного хозяйства. Основной мотивацией применения указанных сталей взамен рядового конструкционного проката с $\sigma_T \leq 235 \text{ Н/мм}^2$ являлась необходимость снижения металлоемкости конструкций и машин при одновременном повышении их конструктивной прочности и надежности.

Необходимо отметить, что в отличие от многих видов проката, в те годы уже существовали оборудование и технологии для термической обработки листов с повторного нагрева, позволяющие производить прокат указанной прочности. Например, для мосто и судостроения производили толстый лист по ГОСТ 6713, ГОСТ 5521 из низкоуглеродистых и низколегированных сталей по энергоемким технологиям – нормализацией и закалкой с отпуском в термических отделениях некоторых меткомбинатов Украины и России. В связи с относительно небольшими объемами производства этих сталей остро не стоял вопрос о переходе к более экономичным технологиям термической обработки.

Однако, в связи с ростом потребности в недорогих сталях повышенной прочности для промышленного строительства, сооружения нефтегазопроводов и, в связи с удорожанием энергоносителей, стало очевидно,

что их производство экономически целесообразно только при использовании энерго- и ресурсосберегающих технологий и, прежде всего, деформационно-термического упрочнения (ДТУ) с использованием РУО или контролируемой прокатки (КП).

К.Ф. Стародубов в те годы, считал, и оказался прав, что применение режимов КП вместо РУО на существующих отечественных реверсивных станах не имеет перспектив [2], ведь тогда еще не были построены современные станы 3600 и 3000 в г. Мариуполе. Вместе с этим, отечественный и зарубежный промышленный опыт, приобретенный в основном в 1960–1980 г.г., показал, что осуществление термического упрочнения листовой стали с прокатного нагрева, сопряжено со значительными трудностями, что вызвано прежде всего повышенными требованиями к оборудованию для РУО, которое должно обеспечивать одновременно требуемые скорости охлаждения и плоскостность проката. Это объясняет различные подходы к решению этой проблемы в те годы и отсутствие на сегодняшний день унифицированных общепризнанных технологий и охлаждающих устройств для термического упрочнения листового проката путем РУО. Эти трудности оказались настолько значительными, что некоторые известные фирмы, например, «Италсидер» (Италия) считали, что «поскольку существующее оборудование мало соответствует требованиям РУО листов то сейчас найдется мало изготовителей проката, которые склонны быть пионерами в этой области и проложить, таким образом, путь своим конкурентам» [3].

Для ДТУ толстых листов путем РУО прежде всего, потребовалось создание эффективных средств для охлаждения раскатов после чистовой клетки без их коробления, причем таких же высокопроизводительных и надежных в эксплуатации, как и все основное оборудование прокатного стана. Использование известных способов охлаждения и оборудования, применяемых для закалки листов с печного нагрева – закалочные прессы и роликовые закалочные машины (РЗМ) оказалось практически неприемлемо для ДТУ листов в потоке стана в основном из-за ряда их конструктивных особенностей и недостатков, пониженной стойкости оборудования при высоких температурах и неэффективности существующих охлаждающих устройств.

Предпринимались неоднократные попытки разместить за чистовыми клетями установки с охлаждающими устройствами форсуночно-струевого типа без применения РЗМ, однако дальше их опытного опробования, как правило, дело не продвигалось и работоспособные системы охлаждения, в том числе без зажатия листов, были созданы только в 90-е годы [4]. Оказалось также, что в промышленных условиях, для обеспечения нормальной работы традиционных охлаждающих устройств форсуночно-струевого типа немаловажным является повышенные требования к очистке больших объемов технической воды (более 3000 тыс. м³/ч),

что в ряде случаев ставило под сомнение возможность осуществления ДТУ листов в существующих и строящихся цехах в связи с высокими текущими и капитальными затратами.

Учитывая положительный опыт термоупрочнения сортового проката, в ИЧМ НАНУ первоначально опробовали в промышленных условиях реверсивных и широкополосных станов охлаждающие устройства камерного типа, применительно к листовому прокату, однако оснастить ими станы не удалось из-за высоких расходов воды и трудностью обеспечения плоскостности листов при их интенсивном охлаждении до заданной температуры [5]. Камерный принцип охлаждения был позднее реализован в промышленных масштабах фирмой «Юзинор» (Франция) в закалочной машине роликового типа, расположенной в потоке стана [4].

В 1973 г. после ввода в действие на меткомбинате «Азовсталь» крупнейшего в Европе толстолистого стана 3600 ИЧМ НАНУ по просьбе завода были начаты работы по созданию нового оборудования и технологии для регулируемого ускоренного охлаждения толстолистого проката в незажатом состоянии с прокатного нагрева. На первом этапе в работе принимали участие сотрудники ГМетАУ: Ю.П. Гуль, Ю.А. Ключник, А.Ф. Сиухин. Под руководством И.Г. Узлова (руководителя с 1973 г. отдела металловедения и термической обработки стали ИЧМ) после выполненных поисковых и опытно-конструкторских работ была разработана технология ДТУ листов путем РУО до заданной температуры.

Впервые в СНГ была введена в эксплуатацию промышленная охлаждающая установка ванного типа (УОВТ) за чистовой клетью стана 3600, позволяющая охлаждать до 600°C и ниже в незажатом состоянии листы толщиной 50–10 мм со скоростью соответственно 7–30 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ от различных температур конца прокатки. Это позволило производить листы повышенной прочности из рядовых низкоуглеродистых и низколегированных сталей с прокатного нагрева без применения роликовых закалочных машин [6, 7]. По нашему мнению, наличие подобных механизмов значительно усложняет и удорожает технологию ДТУ, необходимость их применения оправдана только в случае полной закалки листов с последующим высоким отпуском.

Многие вопросы, связанные с обеспечением равномерности и интенсивности охлаждения листов технической водой грубой очистки при небольших удельных расходах (15–40 м³/м²/ч) удалось решить при использовании вместо форсуночного – плоскоструйного охлаждения с помощью низконапорных устройств ванного типа [6]. Плоскостность охлаждаемых раскатов в отсутствии механизмов зажатия (прижимных роликов или роликовых проводок) достигается за счет создания уравновешенной системы температурных напряжений в объеме охлаждаемого раската при использовании способа контролируемого асимметричного охлаждения

[8]. Плоскостность раскатов на выходе из установки соответствует требованиям их удовлетворительной транспортировки по технологическому потоку а после правки – требованиям ГОСТ.

Для повышения стабильности и однородности свойств листов различного сортамента установка УОВТ снабжена автоматической системой регистрации параметров и управления процессом ДТУ на основе разработанных корреляционных моделей, алгоритмов и программных средств, позволяющих обеспечить допустимые уровни отклонения механических свойств и плоскостности проката от заданных [9]. Учитывая длительный срок эксплуатации установки в потоке стана 3600, ее можно рассматривать как типовое оборудование для РУО толстолистового проката в незажатом состоянии на реверсивных станах.

В связи с созданием охлаждающего оборудования, удовлетворяющего требованиям его эксплуатации в потоке стана 3600, стало возможным осуществление следующих технологий, при которых используется тепло прокатного нагрева:

- нормализация с горячего посада (с температурой не более 600–650 °С, которая достигается при охлаждении раскатов на УОВТ после прокатки) – (РУО + Н);
- ускоренное охлаждение после прокатки от обычных (выше $A_{с3}$) температур конца прокатки и режимов деформации – (РУО);
- контролируемая прокатка (КП), осуществляемая в различных температурных интервалах от $A_{с3}$ до $A_{с1}$, при которой регламентируют также режимы деформации и применяется ускоренное охлаждение на завершающей стадии – (КП + РУО).

Указанные технологии деформационно–термического упрочнения, широко практикуемые в отечественной и зарубежной практике [6, 7, 10, 11, 12], отличаются между собой уровнем достигаемых показателей энерго и ресурсосбережения при обеспечении требуемого комплекса механических свойств сталей повышенной и высокой прочности различного назначения. Оценку каждой из приведенных технологий для выбора оптимальной целесообразно выполнить исходя из анализа уровня достигаемых показателей энерго и ресурсосбережения при условии обеспечения требуемого комплекса механических свойств. Так, технология РУО+Н, т.е. нормализация в потоке с горячего посада с предварительной регламентацией температуры за счет РУО после прокатки, обеспечивает экономии тепловой энергии до 50 %, измельчение феррито–перлитной структуры, повышение пластичности и ударной вязкости до уровня требований ГОСТов, но прочность по сравнению с горячекатаным состоянием практически не повышается, что не отражается на показателях экономии расхода металла в конструкциях.

ДТУ путем ускоренного охлаждения (РУО) после обычных режимов деформации и температур (выше $A_{с3}$) конца прокатки обеспечивает про-

межуточные значения (между нормализацией и улучшением) прочностных свойств в листах толщиной до 40 мм из сталей Ф – П класса ($\sigma_T = 325 - 425 \text{ Н/мм}^2$), при высоком уровне ударной вязкости и пластичности за счет подавления процессов рекристаллизации, измельчения структуры, снижения доли структурно-свободного феррита и образования до 10–15% псевдоэвтектоида. При этом достигается 100 % экономии тепловой энергии (в сравнении с улучшением) и становится возможной замена некоторых низколегированных сталей (09Г2С и др.) низкоуглеродистыми термоупрочненными и оптимизация химического состава сложнолегированных сталей заданного уровня прочности [6, 7].

В связи с относительно невысокой степенью упрочнения (15–30 %) разупрочнение при сварке ДТУ листов из Ф–П сталей не происходит, что позволяет их применять для изготовления ответственных изделий в том числе и труб большого диаметра класса прочности К44 – К50 [13, 14]. Дополнительное регламентирование температуры конца прокатки по сравнению с обычной технологией в сторону ее уменьшения (не ниже A_{c3}) при тех же режимах обжатия позволяет при РУО повысить стабильность и однородность свойств проката. Указанная технология РУО, принятая в качестве базовой, позволяет, например, в условиях стана 3600 производить прокат повышенной и высокой прочности и поставлять его по разработанным техническим условиям:

- ТУ У 14–4–405–97 «Прокат толстолистовой термически упрочненный из углеродистой и низколегированной стали»;
- ТУ У ДП 14–4–421–97 «Прокат толстолистовой повышенной вязкости».

Оценивая роль контролируемой прокатки (КП) листов, осуществляемой в различных температурных интервалах от A_{c3} до A_{c1} (в зависимости от величины углеродного эквивалента), при которой регламентируют также режимы деформации (более 60–70 % обжатия в последних проходах) следует отметить, что ее целесообразно применять для малоперлитных сталей (не более 0,1 % С) с карбонитридным упрочнением, содержащих Nb, V, Mo, что придает им свойство повышенной стойкости против рекристаллизации и разупрочнения после сварки. Высокая прочность, стойкость к хрупкому излому и свариваемость достигаются при низком содержании углерода за счет мелкого зерна феррита, дисперсионного твердения и образования устойчивой субструктуры.

В мировой практике указанные стали и технология КП применяется для изготовления труб большого диаметра с толщиной стенки до 18 мм класса прочности до К52 – К56 ($\sigma_T = 390 - 490 \text{ Н/мм}^2$) для газопроводов, работающих под давлением до 7,5 МПа [10]. Для рядовых сталей Ф–П класса (с низкой устойчивостью аустенита) применение контролируемой прокатки вместо РУО нецелесообразно, поскольку при идентичном уровне свойств энергоемкость процесса прокатки значительно возрастает а

производительность стана снижается. Однако, применение РУО для сталей с карбонитридным упрочнением после обычной прокатки, как технологии альтернативной КП, в некоторых случаях допустимо, поскольку при этом обеспечивается идентичный уровень свойств [15]. Иногда, в связи с одинаковым эффектом измельчения зерна, достигаемым по сравнению с нормализацией, технологию ДТУ с применением РУО называют «нормализующей прокаткой» [11].

Преимуществом применения технологии регулируемого ускоренного охлаждения в этих случаях является возможность повышения производительности стана, снижение нагрузок в чистовой клетке или энергосбережение за счет отказа от дополнительной нормализации листов. Важным ориентиром дальнейшего развития технологий ДТУ, в частности КП + РУО, являются данные о том, что при контролируемой прокатке листов из сталей с карбонитридным упрочнением для сварных труб большого диаметра класса прочности K60 – K70 с толщиной стенки до 25 мм за рубежом (Япония, ФРГ, США) широко применяют регулируемое ускоренное охлаждение на завершающей стадии прокатки, созданы специализированные установки в потоке станов, работающие в автоматизированном режиме [4, 11, 12], в том числе, для производства бейнитных сталей с $\sigma_{\text{в}} = 650 - 700 \text{ Н/мм}^2$, имеющих структуру игольчатого феррита.

Рассматривая пути развития технологий термоупрочнения листов можно сделать вывод о том, что процессы контролируемой прокатки и технологию ДТУ путем регулируемого ускоренного охлаждения (РУО) необходимо рассматривать не как конкурирующие а как взаимодополняющие, совместное применение которых необходимо прежде всего для производства листов толщиной более 20 мм с прочностью $\sigma_{\text{в}} \geq 600 \text{ Н/мм}^2$ высокой вязкости и свариваемости. В остальных случаях производства конструкционных листовых сталей повышенной ($\sigma_{\text{т}} = 325 - 425 \text{ Н/мм}^2$) и высокой ($\sigma_{\text{т}} \geq 450 \text{ Н/мм}^2$) прочности широкого назначения технология РУО после обычных температур конца прокатки (выше $A_{\text{с3}}$) или повышенных температур КП, является эффективной альтернативой по отношению к классической технологии контролируемой прокатки.

Учитывая постоянный рост цен на сырье и энергоносители роль указанных технологий при раздельном или совместном их использовании, как наиболее эффективных и экономичных способов производства толстого листа высокой прочности, вязкости и свариваемости, должна возрастать а оборудование и технологии ДТУ совершенствоваться.

1. Стародубов К.Ф., Борковский Ю.З. Изменение микроструктуры низкоуглеродистой стали в зависимости от скорости охлаждения при закалке и от температуры отпуска.// Научные труды ИЧМ АНУ. – 1960. – Том 13. – С.228–241.

2. *Стародубов К.Ф.* Новые направления в развитии термического упрочнения проката в СССР и за рубежом. //Сб. Термическая обработка металлов. – 1974. – №3. – С.2–5.
3. *Паррини Ч. и др.* Перевод «Новые способы термической обработки высокопрочных сталей взамен контролируемой прокатки» //»Bolletino tecnico Finsider», 1976. – № 350. – р. 217–231.
4. *Елесина О.П.* Состояние и перспективы развития упрочнения толстолистового проката / Обзор по системе «Информсталь» Ин-т «Черметинформация», М.,1986. – Вып. 15. – С. 32.
5. *Спиваков В.И.* Деформационно–термическое упрочнение листовой стали в условиях реверсивных и непрерывных широкополосных станов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 1999, № 5, – с. 64–66.
6. *Спиваков В.И., Савенков В.Я., Бабицкий М.С. и др.* Освоение регулируемого охлаждения при термической обработке листов с прокатного нагрева. //«*Сталь*». – 1983. – № 12. – С. 39.
7. *Спиваков В.И., Булянда А.А., Орлов Э.А. и др.* Термическое упрочнение толстолистовой углеродистой стали до уровня свойств низколегированной. //«*Сталь*». – 1991. – № 1. – С.64–69.
8. *Спиваков В.И.* Регулирование плоскостности толстолистового проката при деформационно–термическом упрочнении //«*Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*», Сб. ИЧМ НАНУ – Выпуск 2. –Киев.: Наукова думка/ 1999. – С. 74–77.
9. *Спиваков В.И.* Управление деформационно–термическим упрочнением толстых листов. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1988. – № 3. – С. 43–45.
10. *Погоржельский В.И., Литвиненко Д.А., Матросов Ю.И. и др.* Контролируемая прокатка. – М. Металлургия, 1979. – С.183.
11. *Degenkolbe J., Schriever U.* Влияние процесса прокатки и способа охлаждения на структуру толстых листов. *Walzverfahren und Kuhlmathode beeinflussen die Gefügeausbild – und bei der Grobblechherstellung* // *Maschinenmark.* – 1988. – № 44. – С.66 –71.
12. *Ватанабэ И. и др.* Современные тенденции использования высокопрочной судостроительной стали. Новые методы производства. //«*Нихон дзосэн гаккайси*». «*Bull. Soc. Nav. Archit. Jap.*». – 1983. – № 649. – Р. 374–386.
13. *Труфяков В.И., Бабаев А.В., Чаленко М.Н. и др.* Свойства термически упрочненного с прокатного нагрева толстолистового проката из сталей ВСтЗсп и 09Г2С. //Сб. «*Производство и свойства термически обработанного проката*». – М., Металлургия, 1988. – С. 72–74.
14. *Коломенский В.К., Можаренко И.П., Шифрин Л.М., Спиваков В.И. и др.* Исследование качества стальных труб большого диаметра из углеродистой стали СтЗсп (С345Т), подвергнутой деформационно–термическому упрочнению // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1997. – № 1. – С.2–44.
15. *Спиваков В.И., Савенков В.Я., Заннес А.Н., Орлов Э.А.* Влияние упрочняющей термической обработки с прокатного нагрева на свойства листов малоуглеродистых сталей. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1979. – №4. – С.19–21.