

**И.Г. Узлов, В.Г. Раздобреев, А.В. Мамаев, И.П. Федорова,
Ж.А. Дементьева**

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КОНЦА ДЕФОРМАЦИОННОЙ
ОБРАБОТКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОУПРОЧНЕННОЙ
АРМАТУРНОЙ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ А 500С**

Представлены результаты исследования влияния пониженных температур нагрева исходной заготовки на формирование структуры и комплекса физико-механических и служебных свойств термоупрочненной арматуры класса прочности А 500С.

Непрерывные мелкосортные и проволочные станы являются наиболее современными высокопроизводительными агрегатами, технологический процесс на которых характеризуется строгой поточностью и согласованностью, что в принципе позволяет осуществлять его в узких интервалах измерения параметров. Внедрение в практику сортопрокатного производства непрерывных станов позволило существенно увеличить единичную производительность агрегатов, однако при этом проявились недостатки этого процесса, связанные с ухудшением структурного состояния и служебных свойств готовой продукции. Например, для основного марочного сортамента сортовых и проволочных станов температура начала прокатки регламентируется обычно в пределах 1150...1200⁰С [1], а температура конца прокатки составляет 1190...900⁰С. Однако для современных непрерывных мелкосортных и проволочных станов характерным являются более высокие температуры конца прокатки 1140...1020⁰С, что способствует повышенному окалинообразованию и обезуглероживанию, ухудшает формирование требуемой микроструктуры и в целом комплекса физико-механических свойств готового проката. Сравнительный анализ уровня свойств сортового проката из стали марки Ст3, прокатанных на линейном (низкоскоростном) стане 650 комбината «Азовсталь» и непрерывном (высокоскоростном) стане 450 Западно-Сибирского меткомбината, показывает снижение предела текучести от 350 до 270 Н/мм² и временного сопротивления разрыву от 450 до 400 Н/мм² при одновременном снижении вязких характеристик у проката, изготовленного при высокоскоростной прокатке [2]. Это явилось следствием повышения температуры конца прокатки на 280⁰С на непрерывном стане (1080⁰С против 800⁰С на линейном стане). В определенной степени проблемы, связанные с повышением температуры конца прокатки на непрерывных станах, решаются установкой специальных устройств или линий для охлаждения проката перед последними проходами в чистой группе клетей. Однако такой способ

производства проката является энергоемким, т.к. прокатка в черновой и промежуточной группах клетей ведется при высоких температурах нагрева заготовки с целью исключения перегрузки прокатных клетей и привода, а также обеспечения высокой износостойкости валков и арматуры. При этом предъявляются очень жесткие требования в отношении расположения, конструкции и большой протяженности основного и вспомогательного (участок для выравнивания температуры между серединой и поверхностью подохлажденного профиля) рабочего оборудования прокатного стана [3].

Другим решением понижения температуры конца деформационной обработки с целью получения мелкозернистой структуры и повышения всего комплекса механических и служебных свойств термомеханически упрочненного проката является понижение температуры нагрева исходной заготовки. Однако переход на прокатку с пониженной температурой нагрева заготовок встречает ряд трудностей в условиях этого перехода на действующих станах, оборудование которых в большинстве случаев максимально загружено.

Тем не менее, когда в 70-х годах XX столетия на мировом рынке резко возросли цены на жидкое и газообразное топливо, во многих странах идея перехода на пониженные температуры прокатки начала усиленно прорабатываться. В основу этой идеи положен известный факт, что с понижением температуры нагрева заготовок снижается суммарный расход физической энергии на нагрев и формоизменение металла, поскольку затраты тепловой энергии на нагрев существенно превышают расход электроэнергии на прокатку. Так при производстве проката на современных мелкосортных станах для нагрева заготовок перед их прокаткой требуется топливная энергия в количестве 1,3–1,65 ГДж на каждую тонну готового проката, а на собственно прокатку (с учетом неизбежных потерь) – еще 0,15–0,40 ГДж электроэнергии. С учетом потерь при выработке электроэнергии расход первичной энергии на прокатку одной тонны готового проката оценивается в 0,45–1,20 ГДж [4], т.е. даже при пересчете на первичную энергию в прокатном производстве преобладают затраты энергии, связанные с нагревом исходной заготовки. Поэтому уже к середине 80-х годов прошлого столетия в зарубежной литературе появились первые публикации, в которых приводились подтверждения экономической и экологической целесообразности перехода сортовой стали с пониженной температурой нагрева заготовок, оценивалась экономия энергии, ресурсных и материальных средств [5–7].

В 90-е годы XX столетия в мире были введены в эксплуатацию новые или кардинально модернизированные 23 мелкосортных, 33 проволочных и 96 других прокатных станов [8]. Технологию прокатки на этих станах удалось поднять на более высокий уровень для обеспечения более высоких требований к геометрическим размерам проката и его механическим свойствам [9]. Осуществляется совершенствование

температурного режима прокатки и его последующей термомеханической обработки проката. К основным мероприятиям по энергосбережению в прокатных цехах можно отнести повышение температуры посада заготовок, повышение коэффициента полезного действия нагревательных печей и снижение температуры нагрева заготовок. Так, при температуре посада заготовок выше 650°C удельный расход энергии на нагрев снижается по сравнению с холодным посадом более чем на 50%, а при посаде заготовок при температуре 980°C и выше – на 70...80%. Повышение коэффициента полезного действия нагревательных печей (средний к.п.д. современных нагревательных печей составляет 55–65%) на каждые 5% приводит к снижению удельного расхода энергии на нагрев заготовок на 4,8% [9]. Экспертные оценки разных исследователей показывают, что снижение температуры нагрева заготовок перед прокаткой на 100°C обеспечивает уменьшение удельного расхода топлива на 0,14 ГДж/т или 9,7% [8], а по другим [9] экономия общей энергии составляет не менее 15%.

Разработанная Kawasaki Steel Corp. деформационно–термическая обработка (ТМСР) [10] и реализованная на заводе Mizushima Works [11] технология производства проката (круг 80мм) из низкоуглеродистой стали при пониженной температуре нагрева заготовок (до 900°C) позволило не только значительно сэкономить тепловую энергию (суммарная экономия более 15%), но и существенно повысить при этом механические свойства. Внедрение такого режима обработки позволяет получать значительно более мелкозернистую структуру (величина зерна при нагреве 900°C составила 20 мкм, а при нагреве 1000°C – 60 мкм) с $\sigma_{\text{в}}=900$ Н/мм², повысить ударную вязкость на 25% и равномерность распределения по сечению проката механических свойств. Процесс ТМСР применяется и при прокатке крупных строительных балок, сталей для подшипников качения и других видов сортового проката [11–13].

Выполненный на протяжении последних лет Институтом черной металлургии НАН Украины комплекс разработок и исследований по оптимизации температурно–деформационных параметров упрочняющей обработки проката из малоуглеродистых и низколегированных конструкционных марок сталей [14–16], подтвердили, что рассматриваемая технология, безусловно, является энерго – и металлосберегающей и позволяет экономить не менее 5% суммарной энергии и 8% природного топлива на каждые 100°C снижения температуры начала прокатки

Проведенные нами исследования показали, что при завершении деформационной обработки конструкционных сталей температура конца прокатки вблизи линии As_3 ($900\text{...}950^{\circ}\text{C}$) является оптимальной и позволяет получить наилучшее сочетание прочностных, пластических и вязких характеристик. Было установлено, что формирование благоприятной высокодисперсной структуры и субструктуры,

унаследованных от мелкозернистого аустенита, обеспечивает повышение прочностных и вязких характеристик, показателей усталостной прочности, коррозионной стойкости и долговечности углеродистых и низколегированных сталей с сохранением на достаточном уровне пластических свойств готовых изделий [16–18]. Было показано, что снижение температуры конца прокатки позволяет понизить расход воды при термомеханическом упрочнении проката и облегчить работу системы охлаждения, т.е. тем самым значительно сэкономить количество закалочной воды и электроэнергии, необходимой для подачи воды на установку термоупрочнения.

Целью настоящей работы являлось исследование структуры, физико–механических и служебных свойств, формирующихся при термомеханическом упрочнении от пониженных температур нагрева исходной заготовки при производстве арматуры класса прочности А 500С.

Исследования проводили на плавке №262706 текущего производства термоупрочненной арматурной стали марки Ст3ТРпс диаметром 12мм класса прочности А 500С в потоке МС 250–1 меткомбината «Криворожсталь». Химический состав (% масс.) пл. №262706 был следующий: С=0,18; Мn=0,54; Si=0,05; S=0,038; P=0,007. В связи с тем, что приводные двигатели отдельных рабочих клеток черновой группы МС 250–1 максимально загружены при прокатке арматурного профиля в соответствии с температурами нагрева заготовок по действующей технологии производства термоупрочненной арматуры, прокатки при пониженных температурах нагрева заготовки осуществляли в одну нитку в черновой группе клеток указанного стана с одновременным понижением скоростного режима деформационной обработки (скорость конца прокатки соответствовала 14, 12 и 10 м/с). Термическое упрочнение проводили на установке термоупрочнения МС 250–1 согласно действующей технологической инструкции по режимам упрочнения на класс прочности А 500С.

Исследуемые образцы арматуры подвергали испытаниям с определением полного комплекса механических и эксплуатационных свойств согласно требований ДСТУ 3760–98, ГОСТ 10884–94, EURONORM ENV 10080 1995, ISO 6935–2 1990, DIN 488 и других зарубежных стандартов. Механические испытания на растяжение проводили на испытательной машине ЕУС–100 с записью диаграмм растяжения и определением временного сопротивления разрыву (σ_B); условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$); условного предела упругости ($\sigma_{0,02}$); относительного удлинения после разрыва (δ_5); полного (общего) удлинения при максимальной нагрузке (δ_{max}); начального модуля упругости ($E \cdot 10^{-4}$); отношения $\sigma_B / \sigma_{0,2}$; отношения $\sigma_{0,02} / \sigma_{0,2}$. Данные замеров температурно–скоростных режимов прокатки и механических испытаний представлены в таблице.

Таблица. Результаты механических испытаний термоупрочненной арматурной стали диаметром 12мм пл. № 262706 на класс прочности А 500С, прокатанных по разным температурно–скоростным режимам прокатки и единому режиму охлаждения по правой стороне МС 250–1

| № п / п | Режим прокатки | Механические свойства | | | | | $E \cdot 10^{-4}$, Н/мм ² | $\sigma_B / \sigma_{0,2}$ | $\sigma_{0,02} / \sigma_{0,2}$ |
|---------------------------------|---|-----------------------|----------------|-----------------|------------|----------------|--|---------------------------|--------------------------------|
| | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\sigma_{0,02}$ | δ_5 | δ_{max} | | | |
| | | Н/мм ² | | | % | | | | |
| 1 | $T_{к.пр.} = 910^{\circ}\text{C};$ $V_{пр.} = 14 \text{ м/с}$ | 805 | 720 | 625 | 17,0 | 4,4 | 19,2 | 1,12 | 0,87 |
| 2 | $T_{к.пр.} = 950^{\circ}\text{C};$ $V_{пр.} = 12 \text{ м/с}$ | 857 | 773 | 696 | 15,5 | 4,5 | 19,0 | 11,1 | 0,90 |
| 3 | $T_{к.пр.} = 890^{\circ}\text{C};$ $V_{пр.} = 10 \text{ м/с}$ | 871 | 773 | 699 | 15,0 | 6,5 | 19,3 | 1,13 | 0,90 |
| 4 | $T_{к.пр.} = 1100^{\circ}\text{C};$ $V_{пр.} = 14 \text{ м/с}$ | 680 | 605 | 539 | 20,0 | 7,3 | 20,2 | 1,12 | 0,89 |
| Требования стандартов, не менее | | ≥600 | ≥500 | ≥425 | ≥14 | ≥2,5 | ≥19 | ≥1,05 | ≥0,85 |

Из таблицы видно, что образцы, прокатанные по разным температурно–скоростным режимам и упрочненные по единому режиму охлаждения по прочностным и пластическим свойствам, удовлетворяют требованиям отечественных и зарубежных стандартов на данный вид продукции.

Исследуемые образцы подвергли испытаниям на загиб 90 градусов с последующим остариванием в печи камерного типа загнутых образцов при $+100^{\circ}\text{C}$ в течение 30 минут и последующим их разгибом на 20 градусов в холодном состоянии. Испытанию подвергали по 3 образца от каждого температурно–деформационного режима обработки и последующего одного и того же режима упрочнения. Все тестируемые образцы после испытаний не имели трещин, разрывов или других поверхностных дефектов.

Произвели эксплуатационные испытания коррозионной стойкости отобранных арматурных образцов. Испытания проводили на 5–ти натуральных образцах от каждого режима длиной 100мм в 1Н растворе H_2SO_4 в течение 72 часов непрерывного погружения в раствор при

комнатной температуре. О стойкости против коррозионного разрушения судили по потере массы образцов после испытаний. Результаты коррозионных испытаний (рис.1) не выявили зависимости повышения скорости коррозии термоупрочненной арматуры, произведенных от разных температур нагрева исходной заготовки.

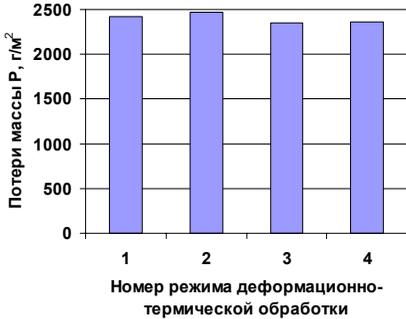


Рис.1 – Коррозионная стойкость арматурной стали марки СтЗТРпс диаметром 12 (пл. № 262706), упрочненных от температур конца прокатки $T_{к.п.} = 900...950^{\circ}\text{C}$ (№№ 1,2,3) и от температуры конца прокатки $T_{к.п.} = 1100^{\circ}\text{C}$ (№ 4).

Провели усталостные испытания натурных стержней диаметром 12 мм на испытательной машине ЭДЦ–20 в условиях растяжения при коэффициенте асимметрии цикла $\rho=0,5$. На рис.2 в полулогарифмических координатах представлены кривые усталости арматурной стали марки СтЗТРпс термомеханически упрочненной по единому режиму охлаждения от температуры конца прокатки $900...950^{\circ}\text{C}$ (кривая 1) и 1100°C (кривая 2).

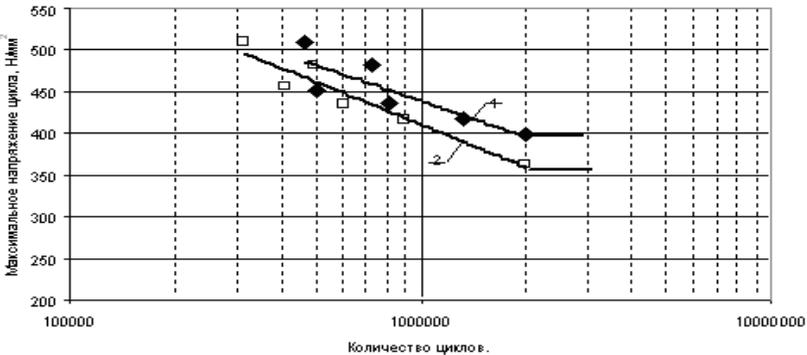


Рис. 2 – Кривые усталости арматурной стали марок СтЗТРпс диаметром 12 мм (пл. № 262706), прокатанной от температуры конца прокатки $900...950^{\circ}\text{C}$ (кривая 1) и 1100°C (кривая 2) и упрочненной по единому режиму охлаждения.

В результате металлографического исследования установлено, что у всех образцов арматурного проката, полученного при прокатке с понижением температуры нагрева исходной заготовки и скорости прокатки у поверхности, формируется слой отпущенного мартенсита высокой дисперсности. Толщина этого слоя колеблется в зависимости от

скорости прокатки от 0,925мм (14 м/с) до 1,45мм (12 м/с) и 1,2мм (10 м/с). За слоем отпущенного мартенсита следует переходная зона со структурой, состоящей из отпущенного мартенсита и выделений по границам бывших аустенитных зерен избыточного феррита. Ширина переходной зоны так же колеблется в зависимости от скорости прокатки: от 2,525мм (14 м/с) до 2,00мм (12 м/с) и 2,5мм (10 м/с). Центральные объемы исследуемых образцов представляют собой мелкодисперсную феррито–перлитную структуру. Сумма толщины поверхностного и переходного слоев в зависимости от понижения температуры нагрева и снижения скорости прокатки увеличивается от 3,45мм (14 м/с) до 3,7мм (10 м/с), что согласуется с результатами механических испытаний (таблица). Повышение прочностных свойств связано с увеличением общей толщины поверхностного и промежуточного слоев. Микроструктура арматурной стали, упрочненной от температуры конца прокатки 1100⁰С представляет собой на поверхности отпущенный мартенсит. Далее следует промежуточный слой, состоящий из смеси верхнего бейнита, квазиэвтектоида с небольшими участками феррито–перлитной структуры. В центре формируется феррито–перлитная структура.

Было так же установлено, что структура арматурного проката диаметром 12 мм, упрочненного по единому режиму охлаждения от температуры конца прокатки 900...950⁰С, характеризуется более мелким зерном и соответствует на поверхности баллу № 11÷10, в центре баллу № 10÷9 (рис.3,а), а величина действительного зерна в арматурной стали той же плавки, упрочненной по тому же режиму охлаждения, но от температуры конца деформационной обработки 1100⁰С составило на поверхности балл № 8÷9 и в центре балл № 7÷8 (рис.3,б).

Исходя из требований ГОСТ 10884–94, ограничивающие верхний предел значений временного сопротивления разрыву (не более чем на 200 Н/мм²) термоупрочненной арматуры для класса прочности Ат–500С должен составлять 800 Н/мм². Из анализа таблицы следует, что σ_b для образцов арматурного проката № 12, прокатанного и охлажденного от температур 900...950⁰С при скоростях прокатки 10 и 12 м/с превышает в среднем на 60...70 Н/мм² ограничение нормированного значения, а при скорости 14 м/с и пониженных температурах нагрева исходной заготовки σ_b находится на верхнем пределе ограничивающего значения. Т.е. степень упрочнения при таких скоростях прокатки была весьма значительна. Поэтому, необходима корректировка режима охлаждения для получения временного сопротивления разрыву в необходимом диапазоне и при этом, можно сократить расход закалочной воды.



Рис.3 Микроструктура арматурной стали (пл. № 262706), охлажденной от температуры конца прокатки 900...950⁰С (а) и 1100⁰С (б) x200.

Выводы.

1. Установлено, что понижение температуры нагрева заготовок приводит к повышению комплекса механических и служебных свойств термоупрочненной арматурной стали марки СтЗТРпс.

2. Показано, что при понижении температуры нагрева исходных заготовок необходима корректировка режима термоупрочнения в сторону значительного сокращения расхода охлаждающей воды.

3. Установлено, что понижение температуры деформационной обработки арматурной стали СтЗТРпс диаметром 12 мм с последующим термомеханическим упрочнением приводит к уменьшению в 2,5–3 раза глубины обезуглероженного слоя, значительному измельчению величины действительного зерна по сечению профиля, повышению на 40% усталостной прочности и долговечности, коррозионной стойкости.

1. *Теория* прокатки / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. Справочник. – М.: Металлургия, 1985. – 235 с.
2. *Узлов И.Г.* Термомеханическое упрочнение проката – эффективный путь энергосбережения и повышения качества металлопродукции // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 1999. – № 5. – С.61–64.
3. *Прокатка* сортовой стали и катанки с контролем температур / П. Маук, Х.Мюллер // *Труды Международного симпозиума по технологии производства стали и проката.* – Каошинг, 19–22 ноября 1995. Тайвань.
4. *Prozess-, Anlagen- und Produktentwicklungen Bein Walzen von Stabstahl und Draht/ R. Kawall , W. Lehnert // Metalurgija (Zagreb).* 2002. Bd.41. №3. S. 171–182.
5. *Lundberg S.E.* «METEC’84: Int. Walswerkskongr., Düsseldorf, 22–28 juni, 1984, Bd.2». Düsseldorf, 1984, G. 2/1–G. 2/12.
6. «METEC’84: Int. Walswerkskongr., Düsseldorf, 22–28 juni, 1984, Bd.2.» / R.Herendi, M. Voith Düsseldorf, 1984, G. 3/1–G. 3/14.
7. *Energiespavmöglichkeit* beim Walzen von Draht / A. Hensel, I. Ochlstöter // *Drahtwelt.* –1985. –Ig. 71. –№ 9. –S. 181–184.

8. *Перспективные технологии, используемые в производстве прутков и катанки за рубежом* / Л.А. Никитина, Б.Н. Матвеев // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». М. – 2003. – № 3. – С.36–44.
9. *Глуховский Е.С.* Новые технологические решения в проектах сортопрокатных цехов // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». М.– 1999. – № 7. – 8 – С.36–39.
10. *ISIJ Int.* / J. Yanagimoto, T. Ito, J. Liu // 2000. 40. № 1. P. 65–70.
11. *Development of high performance steel bars using 4–rolling technology and TMCP*/ H. Nagihara et al. // La Revue de Metallurgie – CIT. 1999. Juillet – Août. P. 911–918.
12. *Recent activities in research of shapers, bars and wire roads* / K. Amano, T. Hoshino, F. Kawabata // Kawasaki Steel Techn. Report. 1999. № 41. P. 52–54.
13. *Матвеев Б.Н.* Применение деформационно–термической обработки при прокатке сорта и катанки (по зарубежным источникам) // Производство проката. – 2001. – № 2. – С.16–18.
14. *Особенности* формирования структуры и свойств углеродистой и низколегированной сталей при различных режимах их деформационно–термической обработки / И.Г. Узлов, М.Д. Куцыгин, И.П. Федорова и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1996. – №2. – С.26–29.
15. *Разработка* новых температурно–деформационных параметров упрочняющей обработки углеродистых и низколегированных сталей / И.Г. Узлов, М.Д. Куцыгин, И.П. Федорова, В.Г. Раздобреев. // Сб. науч.тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». К.: Наукова думка. – 1998. – Вып.2. – С.333–339.
16. *Особенности* формирования структуры и свойств сортового проката из малоуглеродистых и низколегированных сталей при низкотемпературных деформационно–термических обработках / И.Г. Узлов, И.П. Федорова, В.Г. Раздобреев и др. // Сб. научн.тр. «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Днепропетровск: «ВІЗІОН». – 2004. – Вып. 7. – С.184–194.
17. *Влияние* пониженных температур прокатки на механические и служебные характеристики высокопрочной термомеханически упрочненной арматуры / И.Г. Узлов, О.Г. Сидоренко, В.Г. Раздобреев // Теория и практика металлургии. – 2000. – № 5. – С.27–28.
18. *Структурное* состояние и комплекс свойств арматурной стали, упрочненной после деформационной обработки при пониженных температурах / И.Г. Узлов, О.Г. Сидоренко, В.Г. Раздобреев // Металознавство та термічна обробка металів. – 2001. – № 2. – С.11–17.

Статья рекомендована к печати д.т.н. Г.В.Левченко