

УДК 669.017:621.771:621.785.66-97

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ В МЕЖКРИТИЧЕСКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР ПРИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКЕ С УСКОРЕННЫМ РЕГУЛИРУЕМЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ НА КОНЕЧНУЮ СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА

БОЛЬШАКОВ В. И.^{1*}, д. т. н., проф.,

СУХОМЛИН Г. Д.^{2*}, д. т. н., проф.,

ТКАЧ Т. В.^{3*}, м. н. с.

^{1*}Кафедра материаловедения и обработки материалов (МиОМ), Государственное высшее учебное заведение (ГБУЗ) «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» («ПГАСА»), ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 745 23 72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*}Кафедра МиОМ, ГБУЗ «ПГАСА», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-62, e-mail: g_suhomlin@mail.ru, ORCID ID: 000-0001-5840-169X

^{3*}Кафедра МиОМ, ГБУЗ «ПГАСА», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: tkatsch.tw@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-0757-2277

Аннотация. Проведено исследование влияния температуры конечной деформации в межкритическом интервале на структуру и свойства толстолистого проката, полученного методами контролируемой прокатки.

Методика. Использованы методы: количественной и качественной металлографии, трансмиссионной и растровой электронной микроскопии, испытания механических свойств. **Цель исследования** – на основании теоретических и экспериментальных результатов сформулировать требования к температурно-деформационным параметрам производства, позволяющим получить более высокие прочностные и пластические свойства, чем при существующих промышленных вариантах контролируемой прокатки.

Результаты. Показано, что при фиксированной степени деформации одновременное повышение прочностных и пластических свойств в зависимости от температуры носит слабо выраженный экстремальный характер.

Практическая значимость. Предложен режим контролируемой прокатки при температурах конечной деформации 785...810°C с ускоренным регулируемым охлаждением, а также режим, повышающий недостаточно высокие пластические свойства, полученные в толстых листах при случайных отклонениях штатной технологии.

Ключевые слова: контролируемая прокатка, низкоуглеродистые микрелегированные стали, межкритический интервал температур, ускоренное регулируемое охлаждение

ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЇ У МІЖКРИТИЧНОМУ ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР ПРИ КОНТРОЛЬОВАНІЙ ПРОКАТЦІ З ПРИСКОРЕНИМ РЕГУЛЬОВАНИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ НА КІНЦЕВУ СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ТОВСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ

БОЛЬШАКОВ В. И.^{1*}, д. т. н., проф.,

СУХОМЛИН Г. Д.^{2*}, д. т. н., проф.,

ТКАЧ Т. В.^{3*}, м. н. с.,

^{1*}Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів (МиОМ), Державний вищий навчальний заклад (ДВНЗ) «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» («ПДАБА»), вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 745 23 72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*}Кафедра МиОМ, ДВНЗ «ПДАБА», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-62, e-mail: g_suhomlin@mail.ru, ORCID ID: 000-0001-5840-169X

^{3*}Кафедра МиОМ, ДВНЗ «ПДАБА», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: tkatsch.tw@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-0757-2277

Анотація. Проведено дослідження впливу температури кінцевої деформації у міжкритичному інтервалі на структуру та властивості товстолистого прокату, отриманого методами контрольованої прокатки. **Методика.**

Використані методи: кількісної та якісної металографії, трансмісійної та растрової електронної микроскопії, випробування механічних властивостей. **Ціль дослідження** – на основі теоретичних і експериментальних результатів сформулювати вимоги до температурно-деформаційних умов виробництва, які дозволяють отримати більш високі міцнісні і пластичні властивості, ніж при існуючих промислових варіантах контрольованої прокатки. **Результати.** Показано, що при фіксованому ступені деформації одночасне підвищення міцнісних і пластичних властивостей в залежності від температури має екстремальний характер.

Практична значимість. Запропоновано режим контрольованої прокатки при температурах кінцевої

деформації 785...810°C з прискореним регульованим охолодженням, також режим, підвищуючий недостатньо високі пластичні властивості, отриманні в товстих листах при випадкових відхиленнях штатної технології.

Ключові слова: *контрольована прокатка, низьковуглецеві мікролеговані сталі, міжкритичний інтервал температур, прискорене регульоване охолодження*

THE EFFECT OF DEFORMATION IN THE INTERCRITICAL INTERVAL TEMPERATURE AT THE CONTROLLED ROLLING WITH THE ACCELERATED CONTROLLED COOLING ON THE FINAL STRUCTURE AND PROPERTIES OF HEAVY PLATES

BOL'SHAKOV V. I.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
SUKHOMLIN G. D.^{2*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
TKACH T. V.^{3*}, *junior researcher.*

^{1*} Department of Material Science and Treatment of Materials (MSTM), State Higher Education Establishment (SHEE) «Pridneprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture» («PSACEA»), 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 745 23 72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*} Department of Material Science and Treatment of Materials (MSTM), State Higher Education Establishment (SHEE) «Pridneprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture» («PSACEA»), 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-62, e-mail: g_suhomlin@mail.ru, ORCID ID: 000-0001-5840-169X

^{3*} Department of Material Science and Treatment of Materials (MSTM), State Higher Education Establishment (SHEE) «Pridneprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture» («PSACEA»), 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: tkatsch.tw@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-0757-2277

Abstract. The study was conducted the effect of the final deformation temperature in the intercritical interval on the structure and properties of heavy plate, produced by the controlled rolling method. **Methodology.** There are used the methods: qualitative and quantitative metallography, transmission and scanning electron microscopy, testing of mechanical properties. **The purpose of the study** - based on theoretical and experimental results to formulate the requirements for temperature and deformation parameters of production, providing higher strength and plastic properties than the existing industrial versions of controlled rolling. **Results.** It is shown that at a fixed degree of deformation the simultaneous increase in strength and plastic properties versus temperature has a weakly expressed extremum. **Practical value.** It is proposed the regime of controlled rolling at temperatures of finite deformation 785 ... 810° C with accelerated controlled cooling and the regime that increases insufficiently high plastic properties, which are obtained in heavy plates by random deviations of the standard technology.

Keywords: *controlled rolling, low-carbon microalloyed steel, intercritical temperature interval, accelerated controlled cooling*

Введение. Низкоуглеродистые стали широко применяются в промышленном и гражданском строительстве, судостроении, машиностроении, строительстве магистральных нефте- и газопроводов. Различные сферы применения металла требуют повышения уровня механических свойств [1-10].

Термомеханическая обработка (ТМО) – вид обработки, который сочетает пластическую деформацию стали в аустенитном состоянии с последующим регулируемым охлаждением и позволяет повышать комплекс механических свойств проката [2].

Контролируемая прокатка (КП) толстых листов является одним из видов ТМО. Технология КП – метод производства толстых листов для изготовления сварных труб, которые находят применение в строительстве магистральных нефте- и газопроводов.

Повышение прочностных и пластических свойств обеспечивается микролегированием

сталей сильными карбидообразующими элементами – ниобием, ванадием, титаном, для получения мелкозернистой структуры. В результате образуются карбиды, препятствующие росту аустенитного зерна во время динамической и, частично, статической рекристаллизаций, а также запускает механизм дисперсионного упрочнения [3-5].

Листы из низкоуглеродистых микролегированных сталей производят по технологии контролируемой прокатки, которая состоит из двух стадий: а) высокотемпературной деформации при 1040...1200°C (черновой прокатки) и б) завершающей (чистой) прокатки в низкотемпературной части МКИ (730...750°C). Такое снижение температуры чистой прокатки продиктовано необходимостью получения повышенных прочностных показателей в конечном продукте [6].

Применение технологии КП позволяет получить требуемое сочетание высокой прочности и вязкости проката без применения термической обработки с отдельного нагрева [7].

От других видов горячей прокатки КП отличается тем, что образующиеся в структуре субграницы между которыми разориентация составляет не более 2-х градусов, являются центрами зарождения новых зерен феррита не только на большеугловых, но и на малоугловых субзеренных границах аустенита [8], что способствует измельчению зерна феррита.

Потребление толстых листов (свыше 30 мм), в настоящее время, постоянно возрастает. По технологической схеме контролируемой прокатки с ускоренным регулируемым охлаждением (КП+УРО), суммарная деформация в черновой и чистовой клетях снижается, а толщина исходного сляба остаётся неизменной. В итоге эффективность полигонизационной субструктуры как фактора, измельчающего зерно, ослабевает, при этом снижается как прочность, так и сопротивление распространению трещины в толстых листах.

Из описанных схем прокатки листов применение КП+УРО наиболее эффективно повышает прочность и вязкость стали, поэтому совершенствование существующих и создание новых научно обоснованных вариантов этой схемы является актуальным [9-10].

Цель исследования – исследование влияния температур межкритического интервала (МКИ) и последующего охлаждения на структуру и свойства толстолистого проката, а также усовершенствование режима контролируемой прокатки для повышения и оптимального сочетания прочностных и пластических свойств в готовых изделиях.

Материал и методики исследований. Исследовали низкоуглеродистую микрелегированную сталь 10Г2ФБ, применяемую в настоящее время для изготовления толстолистого проката.

Использовали световую качественную и количественную микроскопию, растровую и просвечивающую электронную микроскопию; испытания механических свойств. [11-12].

Температурную зону МКИ (727...910°C) поделили на 8 участков через каждые 25°C (рис. 1).

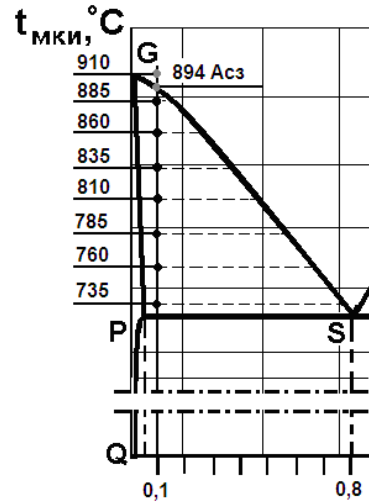


Рис. 1. Часть диаграммы Fe-Fe₃C с разбивкой температуры в МКИ для стали с содержанием углерода 0,10% /

Part of the diagram Fe-Fe₃C with a breakdown temperature ICI for steel with a carbon content of 0.10%

Образцы обрабатывали по режиму: нагрев до 1000°C с выдержкой в течение 90 минут, перенос в печь, нагретую до выбранной температуры, выдержка 10 минут, деформация на 45%, ускоренное охлаждение в масле (V_{охл.} = 10...20°C/c).

Металлографические шлифы после механической шлифовки по традиционной схеме, подвергали электролитической полировке в хлорноуксусном электролите в течение 6 минут с последующим травлением в 2% HNO₃+C₂H₅OH. Изображения фиксировали на цифровую камеру на микроскопе Неофот-2 с иммерсионным объективом при увеличении ×1250.

Таблица 1

Расчетные количества фаз и концентрация углерода в них при различных температурах МКИ / Computation amounts of the phases and concentration of carbon in them at different temperatures ICI

t _{МКИ} , °C	γ, %	C _{γМКИ} , %	α, %	C _{αМКИ} , %
910	100	0,1	0	0
885	70	0,14	30	0,005
860	41	0,23	59	0,007
835	27	0,34	73	0,01
810	20,5	0,44	79,5	0,013
785	16	0,53	84	0,015
760	13,5	0,63	86,5	0,017
735	11	0,75	89	0,019

Результаты исследования и их обсуждение. В лабораторных экспериментах установлено, что структурные превращения в стали развиваются следующим образом. При нагреве формируется зёрненная равновесная структура аустенита, который при охлаждении до температур межкритического интервала ($t_{\text{МКИ}}$) частично распадается с образованием зёрен избыточного феррита, количество которого зависит от температуры распада, а аустенит обогащается углеродом до $C_{\gamma_{\text{МКИ}}}$ (табл. 1).

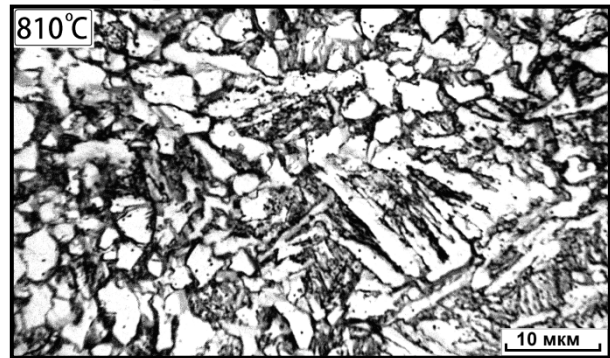
По мере накопления деформации обе фазы приобретают всё более высокую плотность дислокаций, которые в условиях сравнительно высоких температур трансформируются в разветвленную сеть малоугловых полигональных границ. Поэтому, чем ниже температура деформации в

МКИ, тем большее количество зерен α -фазы выделится и подвергнется деформации.

После окончания деформации, с началом охлаждения и понижением температуры, начинается распад нового, не свойственного исходному составу стали аустенита, в котором концентрация углерода составляет $C_{\gamma_{\text{МКИ}}}$, происходит повторное зарождение избыточного феррита на большеугловых и полигональных малоугловых границах зерен деформированного аустенита. Углерод при этом вытесняется в аустенит, где его концентрация несколько повышается (но не достигает 0,8% С). Так как после деформации ускоренное охлаждение снижает температуру на оставшемся участке МКИ (при этом также выделяется небольшое количество мелких зёрен избыточного феррита), то при понижении температуры ниже $A_{\text{г3}}$ стартует бейнитная реакция в аустените.



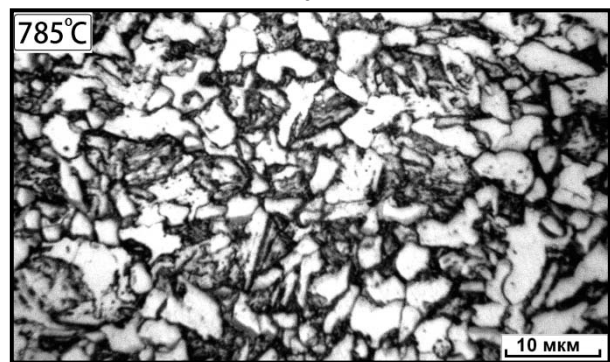
a



д



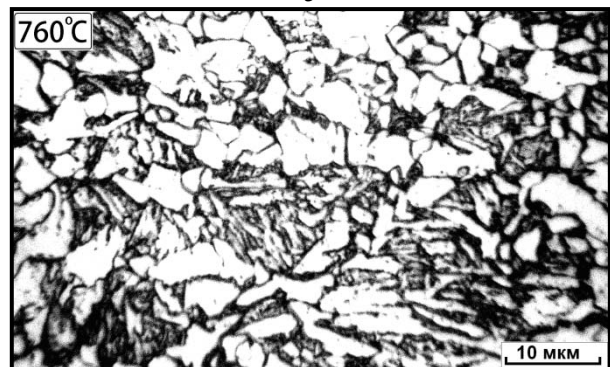
б



е



в



ж

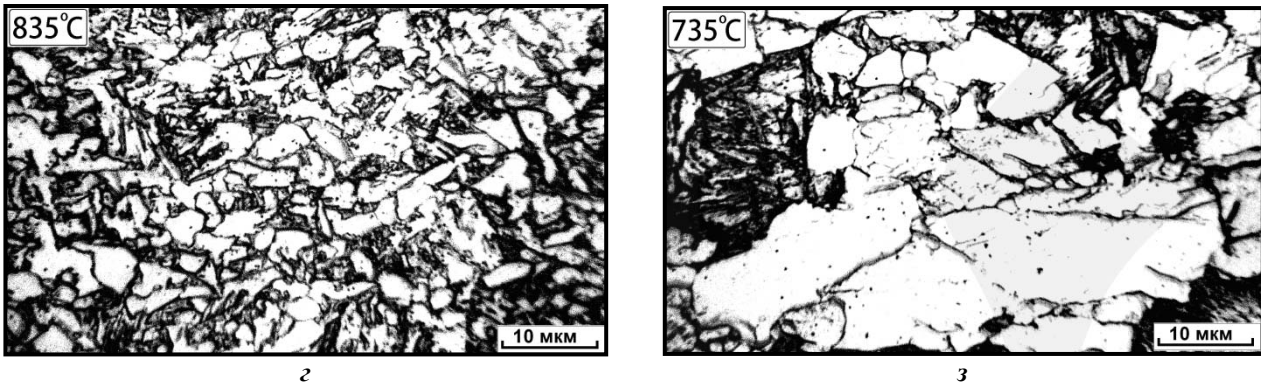


Рис. 2. Микроструктури сталі 10Г2ФБ після деформації та прискореного охолодження від різних температур в МКІ (°С): а – 910; б – 885; в – 860; г – 835; д – 810; е – 785; ж – 760; з – 735.

Напрявлення прокатки – горизонтальне.

Microstructure 10G2FB steel after deformation and accelerated cooling to various temperature ICI (°C):

a – 910; б – 885; в – 860; г – 835; д – 810; е – 785; ж – 760; з – 735.

Direction of rolling – of a horizontal.

Концентрація вуглеорода в α і γ - фазах в межах МКІ різна, однак, коли коливання малих кількостей вуглеорода в ферриті практично не впливають на властивості сталі, то в аустениті це вплив суттєве. Саме варіації концентрації вуглеорода в аустениті в значній ступені визначають характер структуроутворення і поведінку механічних властивостей прокату.

Змінення структури і властивостей в залежності від температури початку деформації в МКІ з наступним УРО показані на рисунках 2-4.

Температура 910°С. Цей варіант був включений в програму досліджень для отримання реперної структури, що відповідає деформації і перетворенню з однофазної γ - області. В кінцевій структурі переважає ігольчатий феррит, т.е. безкарбидний верхній бейніт, і деяка кількість дозвектоїдного феррита, поява якого пов'язана з порівняльною помірною швидкістю охолодження в маслі. Бейнітні пакети темнішого кольору розташовані в ліквационних ділянках, збагачених марганцем і мікролегуючими домішками (рис. 2а).

Температури 885...860°С. В цьому температурному інтервалі з аустеніта виділяється деяка кількість надлишкового феррита, зерна якого за розмірами не перевищують 10 мкм, тобто, порівнянні з шириною рек бейніта, хоча останнього за об'ємом значно більше. Зростання концентрації вуглеорода в аустениті і кількість утвореного з нього бейніта зростає,

з чим пов'язано потемніння бейнітних рек (рис. 2б, в).

Температури 835...810°С. Зниження температури призводить до збільшення частки нагрітого феррита з однієї сторони, і до зменшення кількості бейніта з іншої (рис. 2г, д). Безкарбидний феррит уже не може утворюватися, так як аустеніт містить більше 0,4% С, тому утворюються кристали верхнього бейніта з карбидними частинками по границям між рейками.

Температури 785...760°С. В структурі утворюється більше 60% малих (5...10 мкм) деформованих зерен феррита (рис. 2е, ж), що містять в середньому по 150...500 субзерен, розмірами 1...5 мкм (рис. 2е, ж). Розміри полігонів трохи менше порівняно з утворюваними при більш високих температурах, через прискорення дифузійних процесів. Бейнітна складова при охолодженні заповнює залишені об'єми аустеніта, які стають більш малими і розривними, так як виділяються кристали надлишкового феррита численні і розпадаються на більш малі фрагменти. Через цю причину пакети бейніта не ростуть до великих розмірів і залишаються в межах від 3 мкм (рис. 2е) до 10 мкм (рис. 2ж).

Температура 735°С. Після охолодження в нижній області МКІ (рис. 2з) в структурі збільшується до 70% кількість полігонізованого феррита, з розвинутою мережею субзеренних границь. Решта аустеніт, маючи в своїй решітці до 0,7% С розпадається з утворенням нижнього бейніта з численними

ленними карбидами внутри них, что характерно для высокопрочных структур.

На рисунке 3 приведен электронно-микроскопический снимок фольги после деформации в МКИ с последующим УРО. На нем видны, как отдельные дислокации (обозначено *а*), так и их скопление в полигональные стенки (*б*). Вследствие прошедших процессов возврата и полигонизации сформировалась сеть субзеренных границ, зафиксированная ускоренным охлаждением.

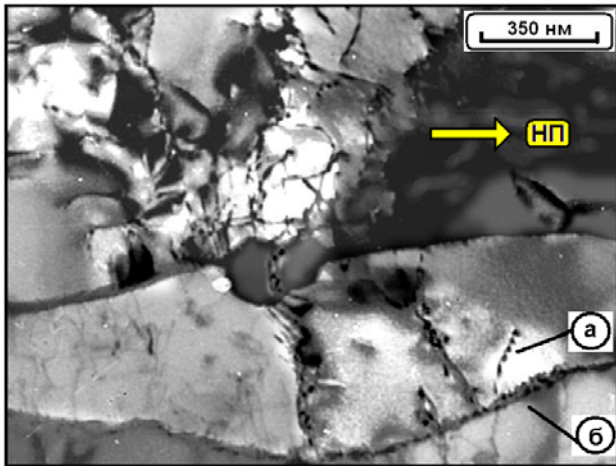


Рис. 3. Полигональная структура феррита после деформации при 785°C и УРО. / Polygonal ferrite structure after deformation at 785°C and ACC.

Формирование разнообразных по морфологии и химическому составу структур после деформации и УРО при различных температурах МКИ, сказывается и на механических свойствах стали, прошедшей такую обработку. Предел прочности (σ_B) после деформации при температурах МКИ и ускоренного охлаждения не проявляет заметных колебаний и находится в диапазоне 770-790 Н/мм² (рис. 4а), поскольку не является структурно чувствительным показателем.

Поэтому одинаковая степень деформации (45%) и снижение температуры МКИ незначительно влияют на его изменение.

Однако предел текучести существенно зависит от структурных изменений (рис. 4а). При температурах 910...860°C показатели предела текучести повышаются, так как в структуре преобладает высокодисперсный бейнит (игольчатый феррит или верхний бейнит). При понижении температуры деформации в МКИ (до 835...785°C) выделяется все большее количество избыточного ферри-

та, поэтому предел текучести несколько снижается. При температурах 760...735°C σ_T начинает возрастать, в образовавшемся ($\approx 80\%$) доэвтектоидном феррите после деформации образуется сеть полигональных границ, то есть действует субзеренный механизм упрочнения. Аналогичным образом наличие второй высокоуглеродистой (до 0,7% С) составляющей – нижнего бейнита – влияет на повышение предела текучести (рис. 4а).

Изменение ударной вязкости стали противоположно изменению предела текучести (рис. 4б). При отрицательных температурах зависимость KCV^{-40} явно выражена. При верхних температурах МКИ (885...860°C) значения ударной вязкости низкие из-за наличия в структуре большого количества бейнита. С понижением температуры и увеличением доли мелких зерен феррита вязкость начинает возрастать. В нижнем интервале МКИ ударная вязкость снижается из-за наличия нижнего бейнита, который наследовал повышенную концентрацию углерода в аустените.

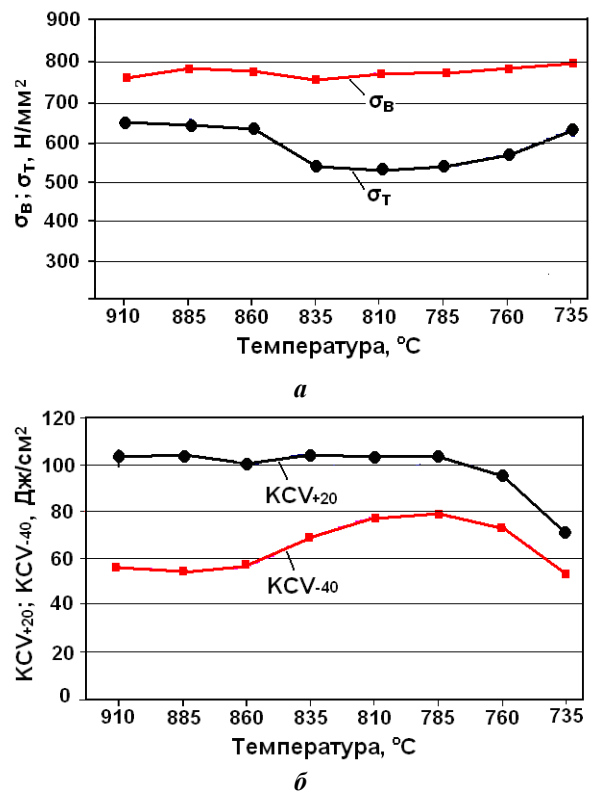


Рис. 4. Свойства стали 10Г2ФБ после УРО при различных температурах в МКИ / The properties of steel 10G2FB after ACC at different temperatures in the ICI

Микрорельеф поверхности разрушения, на снимке, полученном с помощью растро-

вой микроскопии (рис. 5), выявляет чашечное строение, характерное для вязкого типа разрушения.

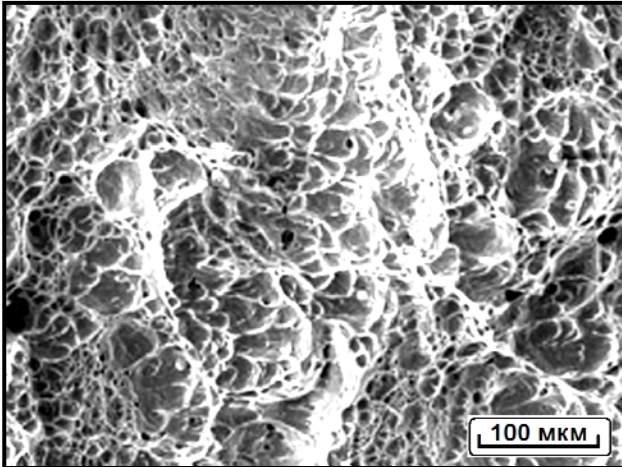


Рис. 5. Поверхность разрушения стали 10Г2ФБ, растровая электронная микроскопия / 10G2FB steel fracture surface, raster electronic microscopy

Таким образом, получена информация, позволяющая судить о структуре и свойствах проката из низкоуглеродистой микрелегированной стали в зависимости от температуры деформации в МКИ с последующим ускоренным охлаждением, и вносить изменения в температурные, деформационные и временные параметры производства листов по технологии КП+УРО.

В заводских условиях деформацию в черновой клети проводят в температурном интервале 980...1100°C в реверсивном периодическом режиме, при этом в чистовой клети может потребоваться корректировка температуры деформации с целью повышения ударной вязкости проката, так как после черновой прокатки металл поступает в чистовую клеть уже несколько упрочненным.

В случае толстых листов ($h \geq 30$ мм) может потребоваться другой вариант коррекции – в сторону повышения прочностных показателей, так как суммарная степень деформации может оказаться недостаточной

для получения в готовых листах требуемой прочности, и может возникнуть необходимость увеличения количества бейнитной составляющей в структуре срединных слоёв толстого листа.

На основании проведенных исследований назначить полный режим прокатки затруднительно, однако можно рекомендовать менять режим завершающей деформации в зависимости от действующей технологии черновой прокатки и необходимости выполнять требования заказчиков по механическим свойствам, учитывая то что на конечной стадии температурный режим 785...810°C является основным и наиболее перспективным.

Выводы. Описаны процессы структурообразования при ускоренном регулируемом охлаждении от различных температур МКИ.

Установлена зависимость структуры и свойств от температуры деформации в МКИ с последующим ускоренным охлаждением, на основании которой для получения требуемых свойств проката можно варьировать температуру деформации в МКИ.

Для низкоуглеродистой стали 10Г2ФБ наиболее перспективное сочетание прочности и вязкости достигается при деформации в средней части МКИ.

На основании теоретических и экспериментальных результатов предложен режим прокатки, позволяющий повысить механические свойства стали 10Г2ФБ по сравнению с существующими промышленными вариантами контролируемой прокатки листов большой толщины.

Возможно применение этого режима с отдельного нагрева для исправления недостаточно высоких пластических свойств, полученных при случайных отклонениях штатной технологии.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Погоржельский В. И Контролируемая прокатка непрерывнолитого металла / Погоржельский В. И. – Москва : Металлургия, 1986. – 151 с.
2. Лахтин Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1980. – 494 с.
3. Матросов Ю. И. Сталь для магистральных газопроводов / Ю. И. Матросов, Д. А. Литвиненко, С. А. Голованенко. – Москва : Металлургия, 1989. – 288 с.
4. Эфрон Л. И. Формирование структуры и механических свойств сталей при ТМО в потоке прокатного стана / Л. И. Эфрон // Сталь. – 1995. – № 8. – С. 57–64.

5. Разработка и технологический процесс производства трубных сталей в 21 веке / Ю. Д. Морозов, Ю. И. Матросов, А. С. Болотов [и др.] // Сталь. – 2001. – № 4. – С. 58–62.
6. Контролируемая прокатка / В. И. Погоржельский, Д. А. Литвиненко, Ю. И. Матросов, А. В. Иваницкий. – Москва : Metallurgija, 1979. – 183 с.
7. Полигонизация аустенита при контролируемой прокатке : монография / Большаков В. И., Лаухин Д. В. – Днепропетровск : ПГАСА, 2011. – 268 с.
8. Влияние режимов контролируемой прокатки на структуру и свойства низкоуглеродистой микролегированной стали 10Г2ФБ / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухин, А. В. Бекетов, Н. В. Сахник, Е. М. Кузмичев, А. А. Тараненко, Ю. М. Снежковская // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднeпр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2009. – Вып. 48, ч. 3. – С. 237–242.
9. Прогнозирование структурного состояния листов на малоперлитной стали после контролируемой прокатки в различных режимах / В. И. Спиваков, Э. А. Орлов, И. В. Ганошенко, П. Л. Литвиненко, В. В. Володарский // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. / Ин-т чер. металлургии Нац. акад. наук Украины. – Днепропетровск, 2006. – Вып. 13. – С. 156–162.
10. Спиваков В. И. Исследование структурообразования в толстых листах из трубных сталей категорий прочности X65, X70 при различных скоростях охлаждения / В. И. Спиваков, П. Л. Литвиненко, Е. А. Шпак // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. / Ин-т чер. металлургии Нац. акад. наук Украины. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 21. – С. 203–210.
11. Металлы. Методы испытаний на растяжение: ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88). – Введ. 1986–01–01. – Изд. офиц. – Москва : Изд-во стандартов, 1985. – 28 с.
12. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах : ГОСТ 9454-78 (СТ СЭВ 472-77, СТ СЭВ 473-771). – Введ. 1979–01–01. – Москва : Госкомиздат, 1980. – 11 с.

REFERENCES

1. Pogorzhel'skij V.I. *Kontroliruemaya prokatka nepreryvnogo metalla* [The controlled rolling of the continuously-casted steel]. Moscow: Metallurgija, 1986, 151 p. (in Russian).
2. Lahtin Ju.M. and Leont'eva V.P. *Materialovedenie* [Material science]. Moscow: Engineering, 1980, 494 p. (in Russian).
3. Matrosov Ju.I., Litvinenko D.A. and Golovanenko S.A. *Stal' dlya magistral'nyh gazoprovodov* [Steel for the gas-main pipelines]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 288 p. (in Russian).
4. Efron L.I. *Formirovanie struktury i mehanicheskikh svojstv stalej pri TMO v potoke prokatnogo stana* [The formation of structure and mechanical properties of steels at TMT in the production line of the rolling mill]. *Stal'* [Steel], 1995, no. 8, pp. 57–64. (in Russian).
5. Morozov Ju.D., Matrosov Ju.I. and Boltov A.S. *Razrabotka i texnologicheskij prozess proizvodstva trubnyh stalej v 21 veke* [The development and technological process of the steel pipe production in the 21st century]. *Stal'* [Steel], 2001, no. 4, pp. 58–62. (in Russian).
6. Pogorzhel'skij V.I., Litvinenko D.A., Matrosov Ju.I. and Ivanitskij A.V. *Kontroliruemaya prokatka* [The controlled rolling]. Moscow: Metallurgija, 1979, 183 p. (in Russian).
7. Bol'shakov V.I. and Lauhin D.V. *Poligonizatsiya austenita pri kontroliruej prokatke* [The polygonization of the austenite at the controlled rolling]. Dnepropetrovsk: PGASA, 2011, 268 p. (in Russian).
8. Bol'shakov V.I., Suhomlin G.D., Lauhin D.V., Beketov A.V., Sahnik N.V., Kuzmichev E.M., Taranenko A.A. and Snezhkovskaja Ju.M. *Vliyanie rezhymov kontroliruej prokatki na strukturu i svojstva nizkouglerodistoj mikrolegirovannoj stali 10G2FB* [The Effect of the controlled rolling on the structure and properties of the low-carbon microalloyed steel 10G2FB]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashynostroenie* [Building, materials science, mechanical engineering]. Pridnepros'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture. Dnipropetrovsk, 2009, no. 48, part.3, pp. 237–242. (in Russian).
9. Spivakov V.I., Orlov E.A., Ganoshenko I.V., Litvinenko P.L. and Volodarskij V.V. *Prognozirovaniye strukturnogo sostoyaniya listov na maloperlitnoj stali posle kontroliruej prokatki v razlichnyh regymah* [The prediction of the structural state of the sheets on the low pearlite steel after the controlled rolling in different regimes]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]. The Iron Industry Institution of the National Academy of Sciences of Ukraine. Dnepropetrovsk, 2006, no. 13, pp. 156–162. (in Russian).
10. Spivakov V.I., Litvinenko P.L. and Shpak E.A. *Issledovanie struktyroobrazovaniya v tolstykh listakh iz trubnyh stalej kategorij prochnosti X65, X70 pri razlichnykh skorostyakh ohlazhdeniya* [The study of the structure formation in thick

- sheets of the steel pipe strength category X65, X70 at different cooling rates]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii* [Fundamental and applied problems of the ferrous metallurgy]. The Iron Industry Institution of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnepropetrovsk, 2010, no. 21, pp. 203–210. (in Russian).
11. *Metally. Metody isputanij na rastyazhenie: GOST 1497-84 (ISO 6892-84, ST SEV 471-88)* [Metalls. Tensile Test. Methods: State Standarts 1497-84 (ISO 6892-84, ST SEV 471-88)]. Moskow: Izdatel'stvo standartov, 1985, 28 p. (in Russian).
 12. *Metally. Metod ispytaniya na udarnyj izgib pri ponizhennyh, komnatnoj i povyshennyh temperaturah: GOST 9454-78 (ST SEV 472-77, ST SEV 473-771)* [Test method for impact bowing at low, normal and elevated temperatures: State Standart 9454-78 (ST SEV 472-77, ST SEV 473-771)]. Moskow: Gos. komizdat, 1980, 11 p. (in Russian).

Рецензент: д-р фіз. - тех. н., проф. В. Ф. Башев

Надійшла до редколегії: 22.10.2015 р. Прийнята до друку: 25.10.2015 р.