

И. Ф. Пемов, Е. А. Голи-Оглу, А. Д. Лючков*, Е. А. Грималовская*, Э. Н. Шебаниц,
Д. И. Зерницкий****

Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И. П. Бардина, Москва

* Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности им. Я. Е. Осады, Днепропетровск

** ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», Группа Метинвест

Взаимосвязь микроструктуры и параметров разрушения при испытаниях падающим грузом толстолистового проката из низкоуглеродистой микролегированной стали

Установлена взаимосвязь между микроструктурой толстолистового проката класса прочности Х70 и видом излома, количеством поглощенной энергии при испытаниях падающим грузом (ИПГ), критической температурой вязко-хрупкого перехода. По полученным данным определена оптимальная (с точки зрения стабильных и высоких значений показателей ИПГ) микроструктура толстолистового трубного проката.

Ключевые слова: толстолистовой прокат, контролируемая прокатка, микроструктура, испытание падающим грузом, хладостойкость, поглощенная энергия

Контролируемая прокатка (КП) как разновидность термомеханической обработки (ТМО) является наиболее перспективным способом получения высокопрочного проката, предназначенного для производства газопроводных труб большого диаметра [1]. КП представляет собой технологический процесс, включающий в себя нагрев металла, предварительную деформацию при температуре выше температуры остановки рекристаллизации аустенита (T_{nr}), межстадийное подстуживание подката, окончательную деформацию в области отсутствия рекристаллизации аустенита (либо в $\gamma+\alpha$ -области), охлаждение проката [2]. В настоящее время производство высокопрочного проката трубных марок стали осуществляется по двум наиболее распространенным вариантам сочетания термических и деформационных процессов [3]: с окончанием деформации в $\gamma+\alpha$ -области и последующим охлаждением на спокойном воздухе (НКП); с окончанием деформации в нижней части γ -области и последующим ускоренным охлаждением (ВКП + УО*).

В зависимости от варианта технологии в металле формируется феррито-перлитная (при НКП) или феррито-бейнитная (при ВКП + УО) микроструктура [4]. Эти микроструктурные состояния стали определяют уровень механических свойств толстолистового проката, а также способность металла к остановке магистральной трещины. Однако изучению взаимосвязи между типом микроструктуры и показателями

способности металла к остановке вязкой трещины, определяемыми по результатам испытаний на ударный изгиб падающим грузом (ИПГ), уделяется недостаточно внимания.

Целью настоящей работы являлось изучение взаимосвязи между типом микроструктуры, количеством вязкой составляющей в изломе и поглощенной энергии разрушения полнотолщинных образцов ИПГ, а также критической температурой вязко-хрупкого перехода.

Исследования проводили в условиях ПАО «ММК им. Ильича» на отобранных образцах толстолистового проката класса прочности Х70 (09Г2ФБ) толщиной 18,7 и 21,6 мм, произведенного по четырем вариантам технологии контролируемой прокатки (табл. 1). Во всех вариантах технологии КП нагрев и черновую стадию деформации проводили по одинаковым режимам.

В случае низкотемпературной контролируемой прокатки (режимы № 1 и 2) чистовую стадию проводили в $\gamma+\alpha$ -области в температурном интервале 730-700 °С с последующим охлаждением на воздухе со скоростью $\approx 1,5$ °С/с (НКП) или ускоренно в температурном интервале 680-600 °С со скоростью ≈ 15 °С/с и последующим охлаждением на воздухе (НКП + УО). В случае высокотемпературной контролируемой прокатки (режимы № 3 и 4) чистовую стадию проводили в нижней части γ -области в температурном интервале 830-800 °С с последующим охлаждением на воздухе со скоростью $\approx 1,5$ °С/с (ВКП) или

Таблица 1

Варианты режимов контролируемой прокатки

Номер режима КП	Параметры чистовой стадии деформации	Ускоренное охлаждение	Условное обозначение
1	В $\gamma+\alpha$ -области (730-700 °С)	–	НКП
2	В $\gamma+\alpha$ -области (730-700 °С)	+	НКП + УО
3	В нижней части γ -области (830-800 °С)	–	ВКП
4	В нижней части γ -области (830-800 °С)	+	ВКП + УО

* Для данного варианта технологии в литературе также распространено сокращение КП + УО. Авторы модифицируют данное сокращение на ВКП + УО во избежание путаницы у читателя во время изучения изложенного ниже материала.

ускоренно в температурном интервале 780-600 °С со скоростью ≈ 15 °С/с и последующим охлаждением на воздухе (ВКП + УО). Используя различные варианты технологии, формировали разные типы конечной микроструктуры проката.

Изучение микроструктуры толстолистного проката проводили с помощью световой микроскопии (микроскоп Leica DMI 5000M) в соответствии с ГОСТ 5639 и ГОСТ 8233. Испытания падающим грузом (ИПГ) проводили на образцах с вдавленным надрезом при температурах +20...-80 °С по ГОСТ 30456 с определением доли вязкой составляющей в изломе образцов.

В соответствии с названием и целью работы, в дальнейшем внимание будет уделено исключительно исследованиям, связанным с испытанием толстолистного проката на ударный изгиб падающим грузом.

Лаборатория механических испытаний ММК им. Ильича располагает двумя копрами ИПГ маятникового типа, один из которых оснащен цифровым индикатором угла подъема (падения) маятника, что позволяет определить энергетические параметры разрушения образцов ИПГ, в частности – их полную поглощенную энергию. Максимальная запасенная энергия копра составляет 11100 Дж. Такой энергии может оказаться недостаточно для обеспечения корректных условий испытания образцов стали, ударная вязкость KCV²⁰ которой составляет 200-300 Дж/см² и более. Поэтому возникла необходимость проверить, обеспечивает ли энергия копра стабильное и полное разрушение образцов ИПГ по всему рабочему сечению.

В соответствии с рекомендацией международного стандарта API RP 5L3 [5] были выбраны значения запасенной энергии копра по соотношению поглощенная энергия ИПГ – поглощенная энергия образцов Шарпи с V-образным надрезом, для чего графики, приведенные в стандарте, были пересчитаны на реальные значения толщины проката, а по ним определены критические значения ударной вязкости, обеспечивающие корректные условия испытаний. Для проката толщиной 18,7 и 21,6 мм критические значения KCV оказались равными соответственно 252 и 212 Дж/см², как это показано на рис. 1. Проверка достоверности этих значений была выполнена экспериментально при оценке зависимости количества вязкой составляющей в изломе и полной поглощенной энергии разрушения образцов ИПГ от величины ударной вязкости KCV проката обеих толщин. Как видно из данных, представленных на рис. 2, при значениях KCV выше критических имеет место падение доли вязкой со-



Рис. 1. Соотношение поглощенной энергии ИПГ и ударной вязкости KCV

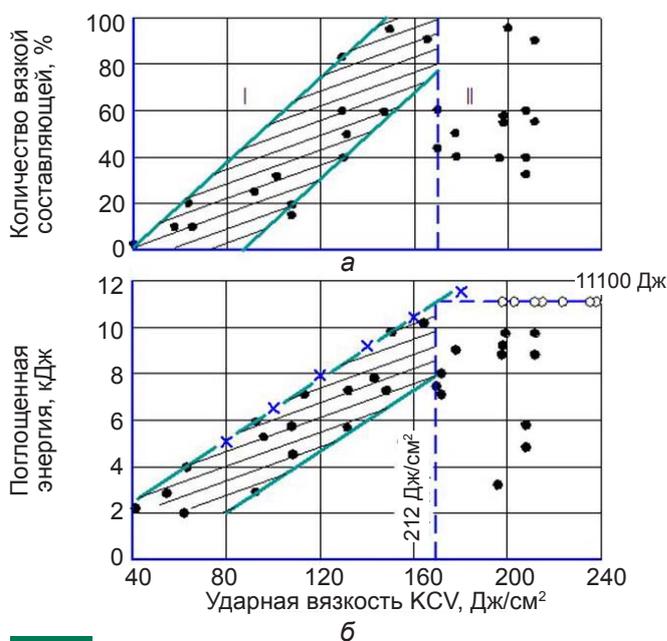


Рис. 2. Соотношение количества вязкой составляющей (а), поглощенной энергии ИПГ (б) и ударной вязкости металла листов толщиной 21,6 мм; ○ – неполное разрушение образцов; × – расчетные значения поглощенной энергии

ставляющей и поглощенной энергии, за которым следует неполное разрушение образцов. В связи с этим в дальнейшем при оценке результатов ИПГ в расчет принимались только те значения показателей, которые были получены на образцах проката, ударная вязкость металла которых не превышала критических значений.

Ниже приведены результаты выполненных исследований.

Влияние режимов контролируемой прокатки на микроструктуру толстолистного проката

Характерная микроструктура металла, полученная после прокатки по режимам, приведенным в табл. 1, показана на рис. 3.

Как известно [6, 7], толстый лист, произведенный

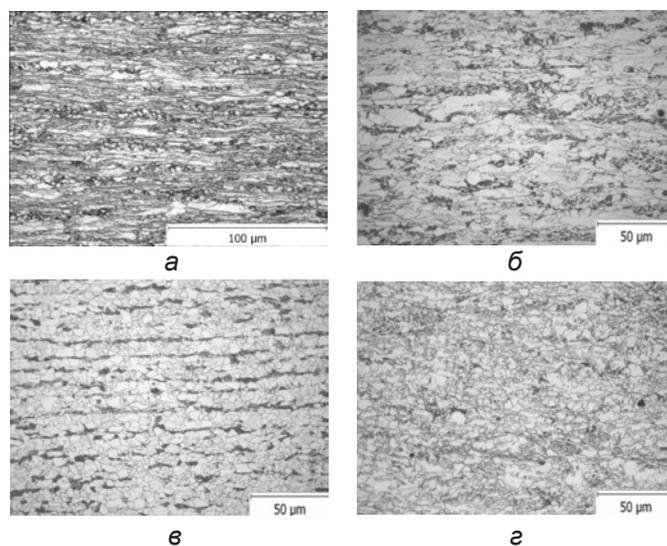


Рис. 3. Характерная микроструктура проката стали категории прочности Х70 при различных режимах контролируемой прокатки (x500): а – режим № 1; б – № 2; в – № 3; г – № 4

по технологии НКП (режимы № 1 и 2), имеет ряд характерных микроструктурных особенностей, связанных с условиями деформации и последующего охлаждения. Микроструктура металла после такой прокатки (режим № 1 и рис. 3, а) представляет собой феррито-перлитную (Ф-П) смесь, в большинстве случаев с явно выраженной полосчатостью. Состояние ферритной фазы зависит от температуры деформации и степени обжатия в чистовой стадии. В случае деформации при 730-700 °С формируются вытянутые вдоль направления прокатки наклепанные ферритные зерна с развитой субструктурой и высокой плотностью дислокаций [8]. Последующее ускоренное охлаждение (режим № 2 и рис. 3, б) изменит морфологию перлита, также значительную его долю заменит бейнит.

При использовании технологии ВКП (режим № 3) конечная микроструктура проката представляет собой смесь равноосных ферритных зерен и перлита с явно выраженной полосчатостью. Технология ВКП + УО с окончанием деформации и началом ускоренного охлаждения в нижней части γ -области (режим № 4) формирует феррито-бейнитную (Ф-Б) микроструктуру (рис. 3, в).

Анализ полученных данных показал, что с точки зрения размера и степени однородности зерна режим № 4 наиболее эффективен.

Взаимосвязь микроструктуры проката и характера разрушения образца при ИПГ

На рис. 4 показаны фотографии изломов образцов при ИПГ металла, прокатанного по режимам № 1 и 4, то есть с феррито-перлитной (рис. 4, а) и феррито-бейнитной (рис. 4, б) микроструктурой соответственно.

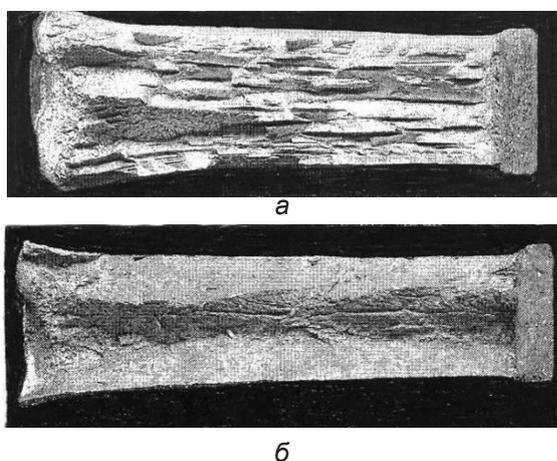


Рис. 4. Характерная микроструктура излома образца ИПГ проката класса прочности Х70: а – феррито-перлитная (НКП); б – феррито-бейнитная (ВКП + УО)

Для проката с феррито-перлитной микроструктурой при температуре испытания выше критической температуры вязко-хрупкого перехода характерны изломы ИПГ с расщеплениями (рис. 4, а), представляющими хрупкие трещины, параллельные поверхности листа, образующиеся в процессе испытания материала, обладающего высокой вязкостью и пластичностью, когда утонение образца (утяжка) приводит к возникновению трехосного напряженного состояния. В таких условиях проявляет себя более слабая когезия слоев в направлении, нормальном к плоско-

сти прокатки, что связано с особенностями формирования микроструктуры металла при распаде горячедеформированного аустенита при температуре ниже A_{r3} – с образованием вытянутых сплюснутых зерен феррита (рис. 3, а) и выраженной анизотропии прочностных характеристик [9].

В изломах образцов ИПГ проката с феррито-бейнитной микроструктурой (рис. 4, б) при тех же условиях испытания расщепления отсутствуют, за исключением осевой зоны образцов ИПГ, где возможно небольшое количество расщеплений из-за ликвационной неоднородности стали, обусловленной технологией непрерывной разливки слябов, и градиента скоростей охлаждения (особенно в случае ускоренного охлаждения).

Для оценки влияния типа микроструктуры на строение изломов, поглощенную энергию образцов ИПГ и температуру вязко-хрупкого перехода (хладостойкость) проката класса прочности Х70 сравнивали результаты сериальных испытаний металла – прокатанного по приведенным в табл. 1 режимам контролируемой прокатки – падающим грузом в интервале температур +20...–80 °С.

На рис. 5 показаны изломы образцов ИПГ стали с феррито-бейнитной микроструктурой, прокатанной с ускоренным (режим № 4, рис. 5, а) и без ускоренного охлаждения (режим № 3, рис. 5, б). В образцах стали, прокатанной с УО в интервале температур испытания +20...–60 °С, строение изломов практически не меняется. Только при температуре –80 °С появляется участок хрупкого разрушения, ограниченный губами среза (более темные полосы, примыкающие к поверхностям листа).

В отсутствие ускоренного охлаждения структура изломов существенным образом изменяется (рис. 5, б). При температурах испытаний +20...–40 °С в изломах

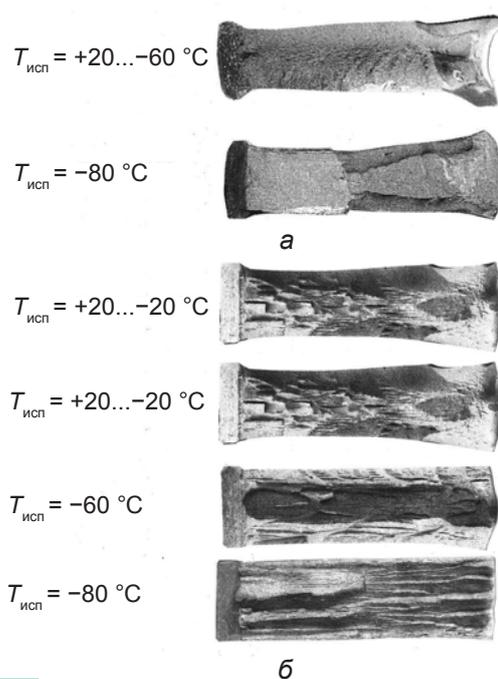


Рис. 5. Строение изломов ИПГ проката класса прочности Х70 (феррито-бейнитная микроструктура), прокатанного в нижней части γ -области (830-800 °С): а – с ускоренным охлаждением (режим № 4); б – с охлаждением на воздухе (режим № 3)

появляются расщепления, характерные для феррито-перлитной микроструктуры и отсутствующие в образцах, прокатанных с УО. Количество вязкой составляющей резко падает при температуре испытания $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Строение изломов стали с феррито-перлитной микроструктурой (режимы № 1 и 2) показано на рис. 6. Для всех образцов при температурах испытания $+20\text{...}-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ характерны изломы с расщеплениями

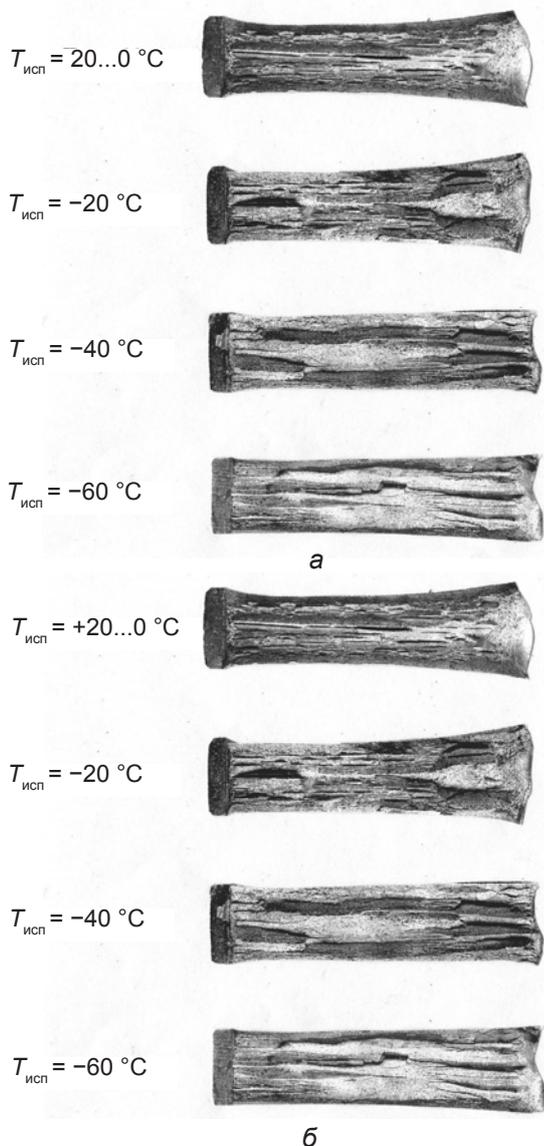


Рис. 6. Строение изломов ИПГ проката класса прочности Х70 (феррито-перлитная микроструктура), прокатанного в $\gamma+\alpha$ -области ($730\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$): а – с ускоренным охлаждением (режим № 4); б – с охлаждением на воздухе (режим № 3)

как в стали, прокатанной с УО (режим № 2 и рис. 6, а), так и без УО (режим № 1, рис. 6, б). В структуре изломов образцов, испытанных при более низких температурах, расщепления практически отсутствуют, а вязкое разрушение сосредоточено в основном в приповерхностных участках, образующих губы среза в изломах. В образцах стали, прокатанной без УО (режим № 1), наблюдается более резкое падение количества вязкой составляющей с понижением температуры испытания.

Результаты сериальных испытаний ИПГ проката категории прочности Х70 представлены на рис. 7. Количество вязкой составляющей в изломах ИПГ про-

ката (рис. 7, а и б) с понижением температуры испытаний изменяется следующим образом. В образцах стали с феррито-бейнитной микроструктурой (рис. 7, а) при температурах испытания $+20\text{...}-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ количество вязкой составляющей находится на уровне 100 %. Снижение температуры до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ уменьшает этот показатель до $\approx 65\%$. У стали с феррито-перлитной микроструктурой (рис. 7, б) температурный интервал высоких (95-100 %) значений вязкой составляющей сокращается до $+20\text{...}-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Дальнейшее снижение температуры приводит к резкому падению доли вязкого излома, которая уже при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет только $\approx 45\%$ и снижается до $\approx 20\%$ при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Соответствующим образом изменяется и температурная зависимость поглощенной энергии разрушения образцов ИПГ (рис. 7, в и г) от максимальных значений при температурах, отвечающих высокому содержанию вязкой составляющей до минимальных при температуре $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ у проката с феррито-бейнитной микроструктурой и $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ – с феррито-перлитной микроструктурой. Отсутствие УО приводит к значительному падению количества вязкой составляющей и поглощенной энергии у проката с феррито-бейнитной микроструктурой, начиная с температуры $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$; с феррито-перлитной – уже с $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Критическую температуру вязко-хрупкого перехода (T_x) определяли по данным рис. 7 как температуру, отвечающую 50 % вязкой составляющей в изломах и половине кривых поглощенной энергии [10]. Данные определения T_x приведены в табл. 2.

Таблица 2
Влияние режимов КП на температуру вязко-хрупкого перехода (T_x) проката категории прочности Х70

Номер режима КП	$T_x, ^{\circ}\text{C}$		FATT85
	по 50 % вязкой составляющей	по поглощенной энергии	
1	-28	-21	-10
2	-39	-34	-24
3	-59	-47	-43
4	-88	-75	-70

Как видно из данных, представленных в табл. 2, прокат с феррито-бейнитной микроструктурой (режим № 4) имеет существенно более низкую T_x по сравнению с прокатом с феррито-перлитной микроструктурой (режим № 1 и 2). Отсутствие УО повысило T_x проката с феррито-бейнитной микроструктурой на $\approx 19\text{ }^{\circ}\text{C}$; с феррито-перлитной – на $\approx 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в условиях эксперимента).

Оценку влияния типа микроструктуры проката на количественные показатели ИПГ исследуемого проката проводили по результатам испытаний при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ пяти опытных партий листов. Результаты испытаний приведены на рис. 8.

Максимальные значения количества вязкой составляющей достигают 100 % как в случае феррито-перлитной (режимы № 1, 2), так и в случае феррито-бейнитной микроструктуры (режим № 4), однако минимальный уровень этого показателя существенно

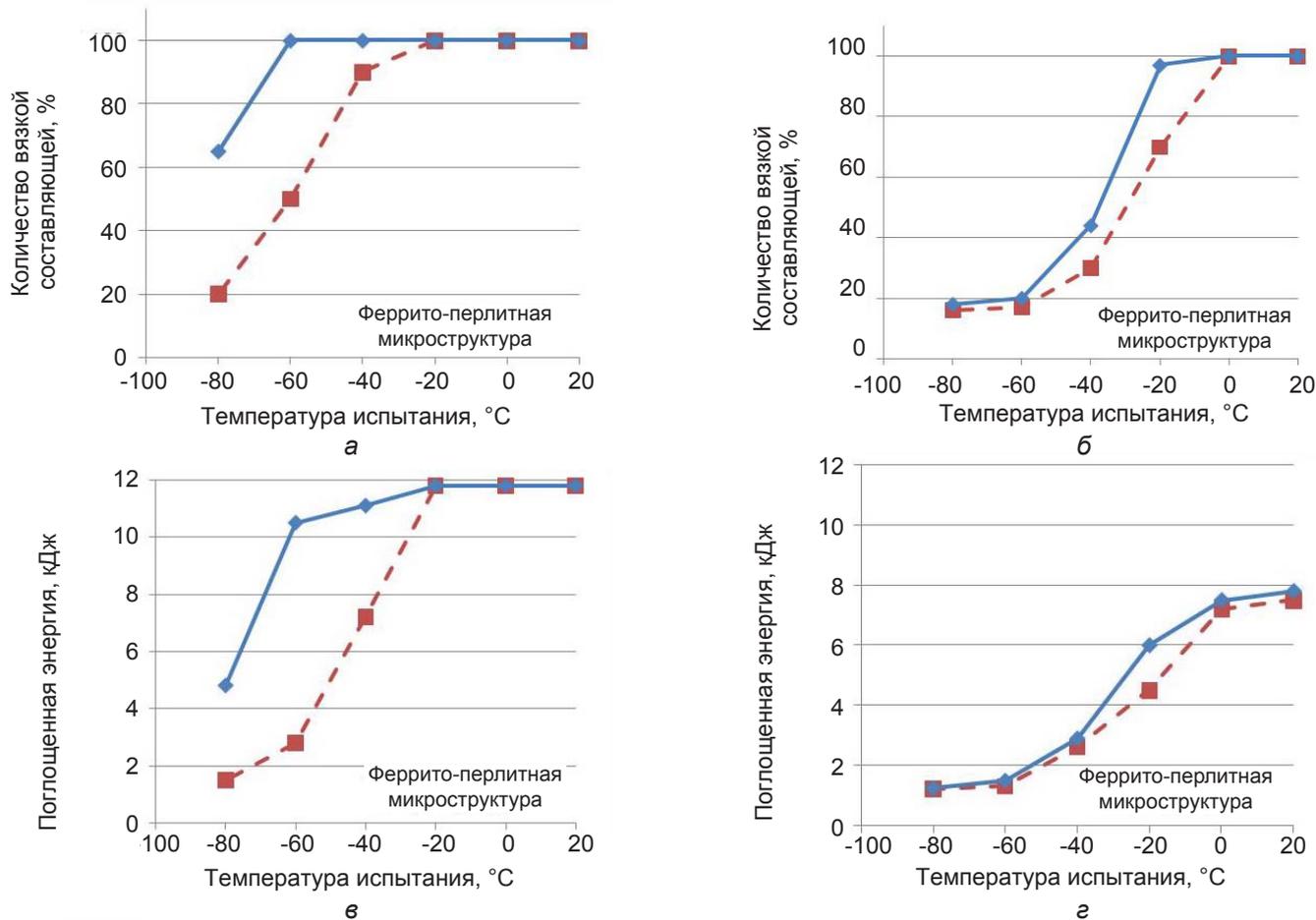


Рис. 7. Температурная зависимость количества вязкой составляющей: — режимы № 3 (а) и № 1 (б); — режимы № 4 (а) и № 2 (б) и поглощенной энергии: — режим № 3 (в) и № 1 (г); — режим № 4 (в) и № 2 (г) проката класса прочности Х70 при различных режимах КП

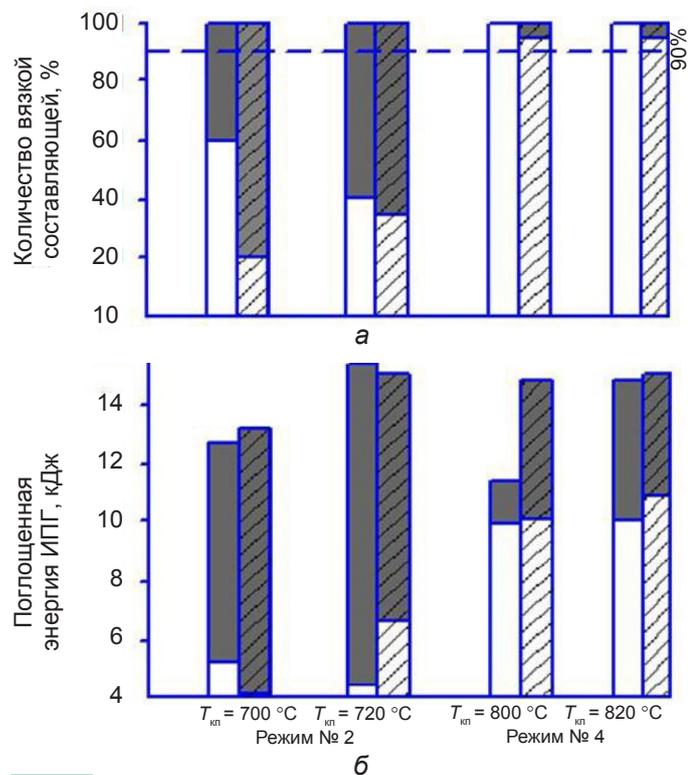


Рис. 8. Зависимость количества вязкой составляющей (а) и поглощенной энергии ИПГ (б) от режима контролируемой прокатки: ■ – интервал минимальных и максимальных значений показателей; □ – лист толщиной 18,7 мм; ▨ – лист толщиной 21,6 мм

различается. Минимальные значения количества вязкой составляющей при феррито-перлитной микроструктуре находятся в пределах 20-60 %, тогда как для стали с феррито-бейнитной микроструктурой они остаются на уровне 95 %. Соответствующим образом изменяется и энергоемкость разрушения стали с феррито-перлитной и феррито-бейнитной микроструктурой. Для первой минимальные значения поглощенной энергии составляют 4100-4400 Дж, для второй – 9800-10800 Дж. Максимальные показатели имеют близкие значения и соответственно равны 11300-15400 и 11500-15100 Дж*.

Выводы

Микроструктура проката категории прочности Х70 из низкоуглеродистой микролегированной стали оказывает существенное влияние на особенности формирования изломов, количество поглощенной энергии ИПГ и хладостойкость металла.

Для проката с феррито-перлитной микроструктурой при температурах испытаний выше критической температуры вязко-хрупкого перехода характерны изломы ИПГ с расщеплениями как в случае последовательного ускоренного охлаждения, так и без ускоренного охлаждения. В изломах ИПГ проката с феррито-бейнитной микроструктурой, прокатанного с ускоренным охлаждением, расщепления

*Поглощенную энергию выше 11 100 Дж определяли расчетным путем по графикам, представленным на рис. 1

не наблюдаются. Обнаружено, что хотя максимальные значения количества вязкой составляющей при ИПГ⁻²⁰ достигают 100 % для всего исследуемого проката, минимальный уровень этого показателя в случае проката с феррито-бейнитной микроструктурой составляет 95 %, а с феррито-перлитной – 20-60 %. Показано, что величина полной поглощенной энергии ИПГ также зависит от типа микроструктуры: в

условиях эксперимента для феррито-бейнитной микроструктуры она составила 9800-10800, а для феррито-перлитной – 4100-4400 Дж.

Таким образом, толстолистовой прокат с феррито-бейнитной микроструктурой обладает более высоким и стабильным уровнем показателей ИПГ и большей хладостойкостью по сравнению с прокатом с феррито-перлитной микроструктурой.



ЛИТЕРАТУРА

1. Матросов М. Ю., Филимонов В. Н. Бернштейн М. Л. Рекристаллизация аустенита в низколегированных сталях с карбонитридными включениями // *Металлы*, 1981. – № 6. – С. 96-103.
2. Ниобийсодержащие низколегированные стали / Ф. Хайстеркамп, К. Хулка, Ю. И. Матросов и др. – М.: Интермет инжиниринг, 1999. – 94 с.
3. Эфрон Л. И. Формирование структуры и механических свойств конструкционных сталей при термомеханической обработке в потоке прокатного стана // *Сталь*, 1995. – № 8. – С. 57-64.
4. Шабалов И. П., Морозов Ю. Д., Эфрон Л. И. Стали для труб и строительных конструкций с повышенными эксплуатационными свойствами. – М.: Металлургиздат, 2003. – 520 с.
5. Стандарт API RP 5L3-96 (2003). Трубы магистральные. Рекомендуемый метод выполнения испытаний на ударный разрыв падающим грузом. – 9 с.
6. Матросов Ю. И. Филимонов В. Н. Влияние контролируемой прокатки на механические свойства, структуру и характер разрушения стали 09Г2 // *Изв. Академии наук СССР. – Металлы*, 1980. – № 5. – С. 99-104.
7. Совершенствование технологии производства стали штрипсовых марок на стане 2800 ОАО «Уральская сталь» / И. Ф. Пемов, Е. А. Голи-Оглу, Е. В. Якушев и др. // *Металлург*, 2010. – № 7. – С. 35-41.
8. Контролируемая прокатка / В. И. Погоржельский, Д. А. Литвиненко, Ю. И. Матросов, и др. – М.: Металлургия, 1979. – 184 с.
9. Голованенко С. А., Чевская О. Н. Влияние контролируемой прокатки на характер разрушения малоперлитных сталей для сварных труб большого диаметра // *Сталь*, 1984. – № 12. – С. 51-55.
10. Норрис Э., Уайтли Р. Исследования в области испытаний для определения критической температуры хрупкости материалов для магистральных трубопроводов: Сб. Ударные испытания металлов. – М.: МИР, 1973. – 316 с.

Анотація

Пемов І. Ф., Голі-Оглу Є. О., Лючков А. Д., Грималовська Є. О., Шебаниць Е. М., Зерницький Д. І.

Взаємозв'язок мікроструктури та параметрів руйнування при випробуваннях падаючим вантажем товстолистового прокату з низьковуглецевої мікролегованої сталі

Встановлено взаємозв'язок між мікроструктурою товстолистового прокату класу міцності Х70 та видом зламу, кількістю поглинутої енергії при випробуваннях падаючим вантажем (ВПВ), критичної температури в'язко-крихкого переходу. За отриманими даними визначено оптимальну з точки зору стабільних та високих значень показників ВПВ мікроструктуру товстолистового трубного прокату.

Ключові слова

товстолистовий прокат, контрольована прокатка, мікроструктура, випробування падаючим вантажем, холодостійкість, поглинута енергія

Summary

Pemov I., Goli-Oglu E., Lyuchkov A., Grimalovskaya E., Shebanits E., Zernitskiy D.

The relationship between microstructure and fracture parameters when the drop weight tear test of hot rolling low carbon microalloyed linepipe steel

The relationship between the microstructure of the hot rolled high-strength plates X70 and type of fracture, the amount of energy absorbed during drop weight tear test (DWTT), a critical temperature of ductile-brittle transition is established. The optimal (from the point of view stable and high values of DWTT) microstructure of linepipe plate parameters has been determined.

Keywords

high-strength plate, controlled rolling, microstructure, DWTT, cold resistance, absorbed energy