

УДК 669-1:620.186.82:539.375.5

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ АУСТЕНИТА И ПРОДУКТОВ ЕГО РАСПАДА НА КВАЗИХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

БОЛЬШАКОВ В. И.¹ *д.т.н., проф.*,
ЛАУХИН Д. В.² *д.т.н., проф.*,
ИВАНЦОВ С. В.³ *к.т.н.*

¹ кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-2624-4666

² кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

Аннотация. Цель. Установить влияние размера зерна аустенита на формирование бейнита, поверхности разрушения и значений ударной вязкости высокопрочного листового проката толщиной 12...40 мм. **Методика.** В качестве базового материала исследования выбрали традиционно используемую в строительстве низкоуглеродистую низколегированную сталь 09Г2С, для сравнения близкую по химическому составу, но отличающуюся прочностью и технологией производства высокопрочную микролегированную сталь 10Г2ФБ. Исследовали: микро- и субструктуру бейнита, фрактографические особенности разрушения различных по геометрическим показателям пакетов бейнита и их влияние на показатели ударной вязкости. **Результаты.** Проведенный комплекс исследований позволил установить взаимосвязь между структурой аустенита, формированием реек в бейните, поверхностью разрушения и ударной вязкостью сталей 09Г2С и 10Г2ФБ. **Научная новизна.** Установлено, что причиной снижения ударной вязкости толстолистового проката из сталей 09Г2С и 10Г2ФБ является формирование в изломах участков квазихрупкого разрушения, которые связаны с увеличением в структуре стали бейнитной составляющей, сформировавшейся из относительно больших (65 мкм) зерен аустенита. **Практическая значимость.** Взаимосвязь микро- и субструктура – поверхность разрушения – ударная вязкость позволит скорректировать действующие режимы контролируемой прокатки при изготовлении стали 10Г2ФБ для стабилизации механических свойств и снижения отбраковки по ударной вязкости.

Ключевые слова: высокопрочная микролегированная сталь; толстый лист; микроструктура; фрактография; квазихрупкое разрушение, ударная вязкость.

ВПЛИВ СТРУКТУРИ АУСТЕНІТУ ТА ПРОДУКТІВ ЙОГО РОЗПАДУ НА КВАЗІКРИХКЕ РУЙНУВАННЯ ВИСОКОМІЦНОГО ТОВСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА

БОЛЬШАКОВ В. И.¹ *д.т.н., проф.*,
ЛАУХИН Д. В.² *д.т.н., проф.*,
ИВАНЦОВ С. В.³ *к.т.н.*

¹ кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-2624-4666

² кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

Анотація. Мета. Встановити вплив розміру зерна аустеніту на формування бейніту, поверхні руйнування і значень ударної в'язкості високоміцного листового прокату товщиною 12 ... 40 мм. **Методика.** В якості базового матеріалу дослідження вибрали традиційну в будівництві низьковуглецеву низьколеговану сталь 09Г2С, для порівняння близьку за хімічним складом, але відмінну за показниками міцності та технологією виробництва високоміцну мікролеговану сталь

10Г2ФБ. Досліджували: мікро- та субструктуру бейніту, фрактографічні особливості руйнування різних за геометричними показниками пакетів бейніту та їх вплив на показники ударної в'язкості. **Результати.** Проведений комплекс досліджень дозволив встановити взаємозв'язок між структурою аустеніту, формуванням рейок у бейніті, поверхнею руйнування і ударною в'язкістю сталей 09Г2С і 10Г2ФБ. **Наукова новизна.** Встановлено, що причиною зниження ударної в'язкості товстостілого прокату зі сталей 09Г2С і 10Г2ФБ є формування в зламах ділянок квазікрихкого руйнування, які пов'язані зі збільшенням в структурі сталі бейнітної складової, яка склалася з відносно великих (65 мкм) зерен аустеніту. **Практична значимість.** Взаємозв'язок мікро- і субструктура - поверхня руйнування - ударна в'язкість дозволить скорегувати діючі режими контрольованої прокатки при виготовленні сталі 10Г2ФБ для стабілізації механічних властивостей та зниження відбраковування за критеріями ударної в'язкості.

Ключові слова: високоміцна мікрولةгована сталь; товстий лист; мікроструктура; фрактографія; квазікрихке руйнування, ударна в'язкість.

INFLUENCE OF AUSTENITE STRUCTURE AND ITS DECAY PRODUCTS ON THE QUASI-BRITTLE FRACTURE OF HIGH STRENGTH PLATE FOR BUILDING CONSTRUCTION

BOLSHAKOV V. I.¹ *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
LAUKHIN D. V.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
IVANTSOV S. V.³, *Ph. D.*

¹ Department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24^A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, (0562)46-64-62, (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-2624-4666

² Department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24^A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, (0562)46-64-62, (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ Department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24^A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, (0562)46-64-62, (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

Summary. Purpose. Influence of the grain size austenite on the formation of bainite, the fracture surface and toughness values of steel plate. **Methodology.** As a basic material for study was chosen is traditionally used in the construction of low-carbon low alloy steel 09G2S to compare close in chemical composition, but different strength and production technology, high-strength micro-alloyed steel 10G2FB. We studied: micro- and substructure bainite fractographic especially destruction of various geometrical parameters of packets of bainite and their influence on the toughness indices. **Results.** Conducted complex investigations possible to establish the relationship between the structure of austenite, the formation of bainite lath, fracture toughness, and surface of 09G2S 10G2FB steels. **Originality.** It is found that the reason for the decrease in toughness of the hot rolled plate and 09G2S 10G2FB steels is the formation of fractures in portions quasi-brittle cracking which are associated with an increase in bainite structure steel component, formed from relatively large (65 μm) of austenite grains. **Practical significance.** The relationship of micro- and substructure - the cracking of the surface - toughness enable to adjust operating modes controlled rolling in the manufacture of steel 10G2FB to stabilize the mechanical properties and reduce the rejection toughness.

Keywords: high-strength micro-alloyed steel; steel plate; microstructure; fractography; quasi-brittle fracture, toughness.

Введение

Одной из основных задач современного украинского материаловедения является производство материалов для строительства (в том числе и высотного, большепролетного) с высокими механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками [1, 2]. Решение данной задачи в Украине связано с внедрением новых, а также усовершенствование существующих технологий производства металлопроката для промышленного и гражданского строительства [3-7]. При этом одним из важнейших требований, выдвигаемым к стали, используемой для производства металлоконструкций, является ударная вязкость – способность материала сопротивляться разрушению при нагрузках [8]. Как известно из работ [9-12]

способность стали сопротивляться зарождению и распространению в нем трещины определяется множеством структурных факторов: размер структурных составляющих, дисперсность неметаллических включений и их распределение, типы внутрифазных и межфазных границ.

В связи с этим работа, направленная на изучение взаимосвязи между начальной структурой, поверхностью разрушения и конечной ударной вязкостью в толстом листе из высокопрочных микрولةгованных сталей является актуальной.

Цель

Таким образом, целью настоящей работы являлось установление взаимосвязи между структурными составляющими, поверхностью

разрушения и ударной вязкостью высокопрочных микролегированных сталей толщиной 12...20 мм.

Материал и методика исследований

В качестве материала для настоящего исследования были выбраны образцы из низкоуглеродистой низколегированной стали 09Г2С и высокопрочной микролегированной стали 10Г2ФБ. Химический состав данных сталей в зависимости от толщины листа представлен в таблице 1.

В лабораторных экспериментах, проведенных для формирования в металле разных структурных составляющих использовали упрочнение с отдельного нагрева. Для определения зависимости размера аустенитного зерна от температуры нагрева под прокатку карточки из сталей 09Г2С и 10Г2ФБ размером 100×300 толщинами 12, 16 и 20 мм (для стали 09Г2С) и толщиной 20 мм для 10Г2ФБ нагревали до температур 950, 1000, 1100 и 1200°С, выдерживали в течении 1 часа и охлаждали в масло со скоростью 15°С/с.

Таблица 1

**Химический состав исследуемых сталей /
Chemical composition of steels**

Сталь	Толщ., мм	Содержание элементов, (масс.) %						
		C	Mn	Si	S	P	V	Nb
10Г2ФБ	20	0,16	1,28	0,24	0,004	0,012	0,061	0,04
10Г2ФБ	40	0,16	1,27	0,26	0,003	0,011	0,059	0,04
09Г2С	12	0,11	1,54	0,61	0,01	0,016	–	–
09Г2С	16	0,11	1,4	0,6	0,01	0,017	–	–
09Г2С	20	0,11	1,55	0,62	0,01	0,016	–	–

В лабораторных экспериментах, проведенных для формирования в металле разных структурных составляющих использовали упрочнение с отдельного нагрева. Для определения зависимости размера аустенитного зерна от температуры нагрева под прокатку карточки из сталей 09Г2С и 10Г2ФБ размером 100×300 толщинами 12, 16 и 20 мм (для стали 09Г2С) и толщиной 20 мм для 10Г2ФБ нагревали до температур 950, 1000, 1100 и 1200°С, выдерживали в течении 1 часа и охлаждали в масло со скоростью 15°С/с. Реконструировали размер исходного аустенитного зерна по методикам, описанным в работе [13]. Для выявления взаимосвязи между внутренней структурой листа и формированием поверхности разрушения стали 09Г2С (толщиной 12, 16 и 20 мм) и стали 10Г2ФБ (толщина 20 мм) проводили следующие операции:

- образцы для испытания на ударную вязкость вырезали таким образом, чтобы одна сторона образца совпадала с поверхностью листа;

- V-образный концентратор напряжений наносили поперек феррито-перлитной полосчатости вдоль направления прокатки со стороны поверхности листа

с целью исключения влияния обезуглероженного слоя;

- после динамических испытаний поверхность разрушения одной половинки образца анализировали с помощью растровой электронной микроскопии (JEOL45, РЕМ 106-И), а затем с ее противоположной стороны выполняли шлиф для оптических микроструктурных исследований (Неофот-2, Axiovert-232)

Испытания на ударную вязкость образцов с V-образным концентратором напряжения проводили в соответствии с ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре 2130 КМ-0,3 [14]. Исследование изломов ударных образцов проводили в соответствии с требованиями [15]. При выполнении количественного анализа использовался программный комплекс STATISTICA 7.0.

Результаты

Для определения влияния температуры аустенитизации на формирование поверхности разрушения и изменения показателей ударной вязкости были проведены лабораторные исследования, которые приближенно моделируют процессы, которые реально протекают в условиях промышленного производства. Образцы из сталей 09Г2С и 10Г2ФБ толщиной 12...20 мм подвергали аустенитизации при температурах 950...1200°С с выдержкой 1 час и ускоренно охлаждали со скоростью 15°С/с. На рисунке 1 приведена построенная на основании экспериментальных данных зависимость размера зерна аустенита от температуры аустенитизации с учетом повышения толщины металлопроката.

На основании анализа полученных данных можно сделать вывод, что для металлопроката из сталей 09Г2С и 10Г2ФБ размеры зерен γ-фазы увеличиваются с повышением температуры нагрева под деформацию.

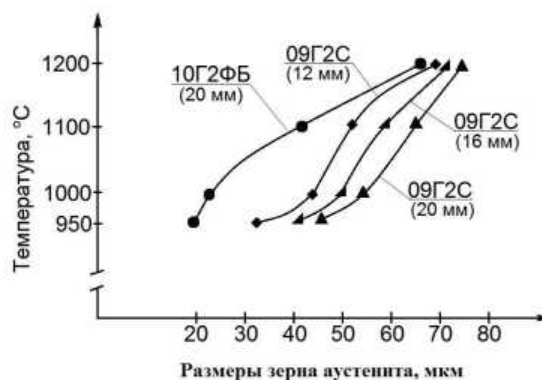


Рис. 1. Зависимость размера зерна аустенита от температуры нагрева и выдержки в течении 1 ч. /
Dependence of grain size of austenite from heat temperature during 1 hour.

Установлено, что с повышением толщины металлопроката средний размер зерен аустенита при одной и той же температуре аустенитизации

увеличивается. Так, например, для стали 09Г2С при температуре 950 °С размер зерна увеличивается с 32 до 44 мкм, при повышении толщины металлопроката с 12 до 20 мм. Увеличение зерна при данной температуре объясняется процессами рекристаллизации в аустените. Такой эффект при применении технологии контролируемой прокатки вызывает рост ферритного зерна, что приводит к уменьшению показателей механических свойств металла. При увеличении температуры аустенитизации уменьшается интервал между размерами зерна при различных толщинах исследуемых марок сталей: при температуре выдержки 1200°С средняя величина зерна для всех образцов колеблется в пределах 67...73 мкм.

В стали 10Г2ФБ, микролегированной ниобием и ванадием, диаметр выходного аустенитного зерна практически в два раза меньше, чем у стали 09Г2С. Это связано с формированием на границах зерен аустенита стали 10Г2ФБ карбонитридов ванадия и ниобия, которые эффективно препятствуют миграции границ зерен аустенита при высоких температурах. Заметный рост размеров аустенитных зерен наблюдается в интервале температур 1000...1100°С, что связано с диссоциацией карбидов ванадия ($T_{дис}(VC) \approx 1000^\circ C$), а в дальнейшем и частичной диссоциацией карбидов ниобия ($T_{дис}(NbC) \approx 1100^\circ C$).

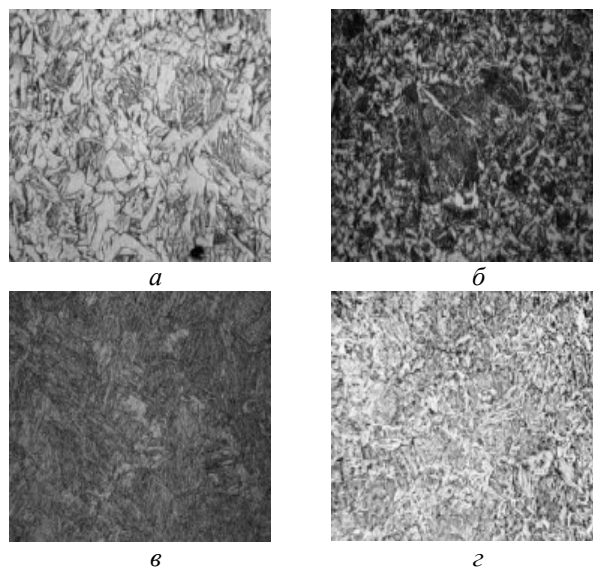


Рис. 2. Структура сталей при температуре аустенитизации 1200 °С: а – 09Г2С, толщина 12 мм, б – 09Г2С, толщина 16 мм, в – 09Г2С, толщина 20мм, г – 10Г2ФБ, толщина 20 мм. (×500) / The structure of the steels at a temperature of austenitisation 1200°С: а – 09G2S, thickness 12 мм, б – 09G2S, thickness 16 мм, в – 09G2S, thickness 20mm, г – 10G2FB, thickness 20 mm (×500)

Анализ поверхностей разрушения образцов металлопроката после различных температур нагрева показал преимущественно вязкий характер разрушения, на что указывает значительное количество неоднородных по размеру чашек,

образующихся в результате объединения микропор. Кроме того, на фрактограммах изломов присутствуют локальные участки, которые характерны для механизма разрушения квазисколом (рис. 3а). Они характерны для хрупкого разрушения и объясняются присутствием в структуре продуктов промежуточного и сдвигового механизмов превращения аустенита (рис. 3б).

С повышением температуры аустенитизации и дальнейшем охлаждении для всех опытных образцов увеличивается размер бейнитных пакетов вследствие роста зерен аустенита. При этом, наблюдается увеличение геометрических параметров реек бейнита. Результаты подсчета содержания бейнитного и мартенситной составляющих в структуре металла в зависимости от температуры аустенитизации для металлопроката различной толщины приведены на рисунке 4.

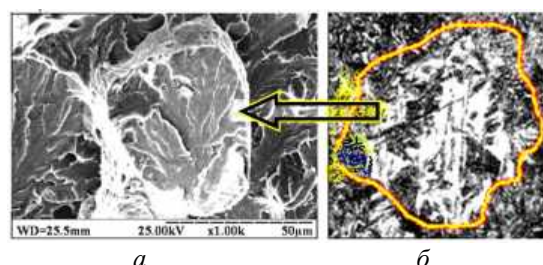


Рис. 3. Микроструктурные исследования стали 09Г2С после выдержки при 1200 °С в течении 1 часа и охлаждения со скоростью 15 °С / с: а) участок квазихрупкого разрушения; б) участок бейнитно-ферритной структуры соответствующей бывшему зерну аустенита / Investigations of microstructure 09G2S steel after aging at 1200°С for 1 hour and after that cooling at rate 15°С/s: а) quasi-brittle fracture area; б) austenite grains corresponding with ferrite-bainite structure.

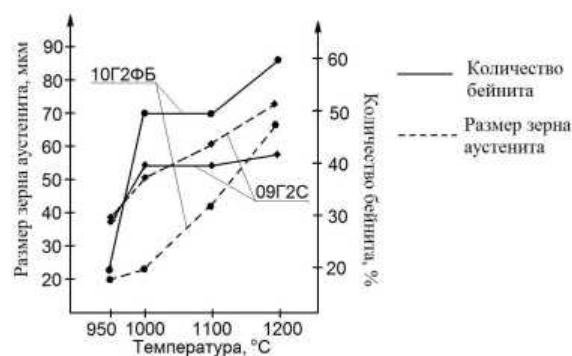


Рис.4. Зависимость количества структурных составляющих от температуры аустенитизации для сталей толщиной 12 ... 40 мм. / The dependence of the number of structural components from temperature of austenitisation of steel 12 ... 40 mm.

Представленные зависимости показывают, что с повышением толщины листового проката из стали 09Г2С среднее процентное содержание бейнита увеличивается на 15%, а в стали 10Г2ФБ - на 40%.

Общее количество бейнитной и мартенситной составляющих увеличивается с повышением температуры аустенитизации. Например, для стали 09Г2С толщиной 20 мм с повышением температуры аустенитизации от 950 до 1200 °С суммарное содержание продуктов сдвигового и промежуточного превращения аустенита увеличивается с 60 до 90%, при этом средний размер зерен аустенита также увеличивается с 38 до 71 мкм. Для стали 10Г2ФБ аналогичной толщины суммарное содержание бейнита и мартенсита увеличивается с 20 до 90%, при росте зерна аустенита с 20 до 67 мкм (см. Рис. 1). Таким образом с повышением температуры аустенитизации и увеличением размера зерна аустенита наблюдается повышение содержания бейнитной составляющей в стали. Это возможно за счет увеличения геометрических размеров структурных составляющих пакетов бейнита: ширины, длины реек и межреечных промежутков. Зависимость линейных размеров участков, разрушение которых произошло по механизму квазискола, от температуры аустенитизации приведены на рисунке 5.

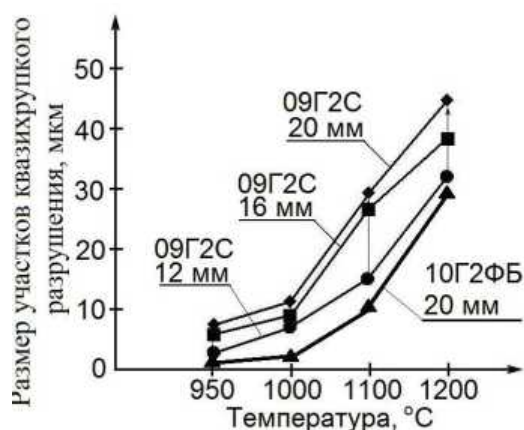


Рис. 5. Зависимость линейных размеров участков квазихрупкого разрушения в изломах сталей 09Г2С и 10Г2ФБ от температуры аустенитизации / The linear plot size quasi-brittle fracture in surfaces 09G2S steels and 10G2FB from the austenitising temperature.

Анализ предоставленных на рис. 5 данных показывает, что с повышением температуры аустенитизации от 950 до 1200°С наблюдается монотонное увеличение геометрических размеров участков (от 2,5 до 45 мкм для стали 09Г2С и от 1,5 до 29 мкм - для 10Г2ФБ), которым присущий веерный узор. При повышении толщины металлопроката наблюдается увеличение линейных размеров участков квазихрупкого разрушения.

Механические свойства микролегированных сталей после нагрева до температур 950 ... 1200 °С, выдержки в течении часа и последующего ускоренного охлаждения представлены в таблице 2.

Как видно из приведенных результатов, прослеживается четкая тенденция к увеличению показателей прочностных характеристик с

увеличением толщины проката и температуры выдержки и, соответственно, снижение ударной вязкости. Это объясняется увеличением содержания бейнитной составляющей с повышением температуры аустенитизации.

Как видно из приведенных результатов, прослеживается четкая тенденция к увеличению показателей прочностных характеристик с увеличением толщины проката и температуры выдержки и, соответственно, снижение ударной вязкости. Это объясняется увеличением содержания бейнитной составляющей с повышением температуры аустенитизации.

Таблица 2

Механические свойства образцов из стали 09Г2С и 10Г2ФБ./ Mechanical properties of the specimens of steel 09G2S and 10G2FB.

t, °С	Толщ., мм	σ_T , МПа	σ_B , МПа	KCV ⁺²⁰ , Дж/м ² ·10 ⁻⁴	Ψ %	δ ₅ %
09Г2С						
950	12...20	400-550	550-720	120-125	70-64	33-23
1000	12...20	410-570	550-760	115-100	69-64	31-22
1100	12...20	420-640	560-770	105-80	66-63,5	30-20
1200	12...20	470-670	620-775	105-50	64-60	24-17
10Г2ФБ						
950	20	505	650	130	66	26
1000	20	520	680	125	64	24
1100	20	630	720	100	60	18
1200	20	650	760	90	58	15

На основе совместного анализа микроструктуры поверхностей разрушения и механических свойств можно сделать вывод, что повышение температуры нагрева перед горячей деформацией приводит к росту зерен аустенита в стали 10Г2ФБ с 20 до 65 мкм, негативно влияет на показатели ударной вязкости за счет увеличения количества участков квазихрупкого разрушения для всех исследуемых образцов.

Результаты

Проведенный комплекс исследований показал влияние структурных факторов стали на ударную вязкость. Получены количественные зависимости структурных составляющих в указанных сталях в зависимости от температуры аустенитизации и толщины проката.

Научная новизна и практическая ценность

Установлено, что для сталей 09Г2С и 10Г2ФБ повышение температуры аустенитизации приводит к существенному увеличению зерен аустенита, что

увеличивает содержание бейнитной составляющей, а следовательно и участков квазихрупкого разрушения, которые существенно снижают ударную вязкость.

Выводы

1. Установлено, что причиной снижения ударной вязкости толстолистового проката из сталей 09Г2С и 10Г2ФБ является формирование в изломах участков квазихрупкого разрушения, которые связаны с увеличением в структуре стали бейнитной составляющей, сформировавшейся из относительно больших (65 мкм) зерен аустенита.

2. Повышение температуры аустенизации исследуемых сталей до 1150 и выше 1250°C приводит к формированию зерна аустенита размером 73 мкм и более, способствует, при дальнейшем ускоренном охлаждении, формированию большего количества бейнито-мартенситных участков и, как

следствие, снижению ударной вязкости с 125 до 50 Дж/м²·10⁻⁴ путем формирования квазихрупких участков в изломах низкоуглеродистых микролегированных сталей.

3. Анализ поверхностей разрушения образцов металлопроката после различных температур нагрева показал, что при общей вязкой картине разрушения на фрактограммах присутствуют локальные участки, которые характерны для механизма разрушения квазисколом. Наличие указанных участков объясняется формированием в структуре продуктов промежуточного механизма превращения аустенита.

4. Проведенный комплекс исследований позволил установить, что повышение температуры аустенизации приводит к увеличению размеров зерен аустенита, что негативно влияет на показатели ударной вязкости за счет формирования протяженных областей квазихрупкого разрушения.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В. И. Большаков. Инновационная технология производства толстых листов – полигонизационная прокатка / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухин та ін. // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2011. – Вып. 59. – С. 145–151.
2. Дислокационная структура и конструктивная прочность стали / Л. И. Тушинский // Пути повышения конструктивной прочности металлов и сплавов. – 1982. – С. 6–8.
3. П. Д. Одесский. Стали нового поколения для металлических конструкций / П. Д. Одесский, И. И. Ведяков, А. В. Рудченко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – №2. – С. 30–41.
4. Recrystallization Controlled Rolling and Accelerated Cooling as the Optimum Processing Route for High Strength and Toughness in V-Ti-N Steels / S. Zajac, T. Siwecki, B. Hutchinson, M. Attlegard // Met. Trans. – 1991. – 22A. – P. 1681–1693.
5. Properties of Large Diameter Line Pipe Steel Produced by Accelerated Cooling After Controlled Rolling / Tamehiro H. // Accelerated Cooling of Steel, 1986. – Warrendale, PA: TMS-AIME, 1986. – P. 401–413.
6. Hot Rolling as a High-Temperature Thermo-Mechanical Process / I. Kozasu // Microalloying '75, Union Carbide Corp., 1977. – New York, NY: Union Carbide Corp., 1977. – P. 120–135.
7. Ferrite Formation from Thermomechanically Processed Austenite in HS LA Steels / A. J. DeArdo // HSLA Steels. – 1985. – P. 70–79.
8. Вплив параметрів структури на кінетику руйнування мікролегованих будівельних сталей: Дис. Канд. техн. наук : 05.02.01. / Іванцов Сергій Вікторович – Дніпропетровськ, 2015. – 141 с.
9. Морфологія, тонка структура, властивості голчастого фериту при зміцнюванні будівельних сталей: Дис. канд. техн. наук : 05.02.01. / Куксенко В'ячеслав Іванович – Дніпропетровськ, 2010. – 133 с.
10. S. Lartigue. Stability of extrinsic grain boundary dislocations in relation with intergranular segregation and precipitation / S. Lartigue, L. Priester // Acta Metall. – 1983. – Vol. 31. – P. 1809–1819.
11. Davenport A. T. The Recrystallization of Austenite During the Hot Rolling of a Nb-Bearing HSLA Steel / A. T. Davenport, R. E. Miner, R. A. Kot // The Hot Deformation of Austenite, 1976. – New York, TMS-AIME. – 1976. – P. 186–203.
12. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения / Нотт Дж.Ф.; пер. с англ. Д.В. Лаптева. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
13. Dube C. A. La formation de ferrite proeutectoide dans les aciers au carbone / C. A. Dube, H. I. Aaronson, R. F. Mehl // Rev. Met. – 1958. – Vol. 55. – P. 201–210.
14. Испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенных температурах : ГОСТ 9454-78. – [Чинний від 1979-01-01]. – М. : Государственный комитет по стандартам СССР, 1978. – 11с. – (Національний стандарт України).
15. Практическая растровая электронная микроскопия / Дж. Гоулдстейна, Х. Яковица; пер. с англ. В. И. Петрова. – М. : Мир, 1978. – 656 с.

REFERENCES

1. V. I. Bolshakov. *Innovatsionnaya tehnologiya proizvodstva tolstyih listov – poligonizatsionnaya prokatka* [The innovative technology of production of heavy plates - polygonization rolling] / V. I. Bolshakov, G. D. Suhomlin, D.

- V. Lauhin ta In. // *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Civil engineering, materials science, mechanical engineering]. – 2011. – Vol. 59. – p. 145–151. (in Russian).
2. *Dislokatsionnaya struktura i konstruktivnaya prochnost stali* [The dislocation structure and the structural strength of steel] / L. I. Tushinskiy // *Puti povysheniya konstruktivnoy prochnosti metallov i splavov* [Ways to improve the structural strength of metals and alloys]. – 1982. – P. 6–8. (in Russian).
 3. P. D. Odesskiy. *Stali novogo pokoleniya dlya metallicheskih konstruksiy* [A new generation steels for metal constructions] / P. D. Odesskiy, I. I. Vedyakov, A. V. Rudchenko // *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals]. – 2002. – No. 2. – P. 30–41. (in Russian).
 4. Recrystallization Controlled Rolling and Accelerated Cooling as the Optimum Processing Route for High Strength and Toughness in V-Ti-N Steels / S. Zajac, T. Siwecki, B. Hutchinson, M. Attlegard // *Met. Trans.* – 1991. – 22A. – P. 1681–1693.
 5. Properties of Large Diameter Line Pipe Steel Produced by Accelerated Cooling After Controlled Rolling / Tamehiro H. // *Accelerated Cooling of Steel*, 1986. – Warrendale, PA: TMS-AIME, 1986. – P. 401–413.
 6. Hot Rolling as a High-Temperature Thermo-Mechanical Process / I. Kozasu // *Microalloying '75*, Union Carbide Corp., 1977. – New York, NY: Union Carbide Corp., 1977. – P. 120–135.
 7. Ferrite Formation from Thermomechanically Processed Austenite in HS LA Steels / A. J. DeArdo // *HSLA Steels.* – 1985. – P. 70–79.
 8. *Vplyv parametriv struktury na kinetyku rujnuvannya mikrolegovanyx budivel'nyx stalej* [Impact of the structure parameters on the kinetics of fracture of microalloyed constructional steels]: *Dy's. Kand. texn. Nauk* [Thesis is aimed for the degree of candidate of technical sciences] : 05.02.01. / Ivantsov Serhii Viktorovych – Dnipropetrovs'k, 2015. – 141 p. (in Ukrainian).
 9. *Morfologiya, tonka struktura, vlasty vosti golchastogo ferytu pry zmichnyuvanni budivel'nyx stalej* [Morphology, fine structure and properties of acicular ferrite at work-hardening of build steels]: *Dy's. kand. texn. Nauk* [Thesis is aimed for the degree of candidate of technical sciences] : 05.02.01. / Kuksenko Vyacheslav Ivanovy'ch – Dnipropetrovs'k, 2010. – 133 p. (in Ukrainian).
 10. S. Lartigue. Stability of extrinsic grain boundary dislocations in relation with intergranular segregation and precipitation / S. Lartigue, L. Priester // *Acta Metall.* – 1983. – Vol. 31. – P. 1809–1819.
 11. Davenport A. T. The Recrystallization of Austenite During the Hot Rolling of a Nb-Bearing HSLA Steel / A. T. Davenport, R. E. Miner, R. A. Kot // *The Hot Deformation of Austenite*, 1976. – New York, TMS-AIME. – 1976. – P. 186–203.
 12. Nott Dzh.F. *Osnovy mehaniki razrusheniya* [Basics of fracture mechanics] / Nott Dzh.F.; *per. s angl.* [translation from English] D.V. Lapteva. – M.: *Metallurgiya* [metallurgy], 1978. – 256 p. (in Russian).
 13. Dube C. A. La formation de ferrite proeutectoide dans les aciers au carbone / C. A. Dube, H. I. Aaronson, R. F. Mehl // *Rev. Met.* – 1958. – Vol. 55. – P. 201–210.
 14. *Ispytaniya na udarnyy izgib pri ponizhennoy, komnatnoy i povyshennykh temperaturah* [Impact tests at low, ambient and elevated temperatures] : GOST 9454-78. – [1979-01-01]. – M. : *Gosudarstvennyy komitet po standartam SSSR* [USSR State Committee on Standards], 1978. – 11p. – (*Natsionalny standart UkraYini* [National Standard of Ukraine]).(in Russian).
 15. *Prakticheskaya rastrovaya elektronnaya mikroskopiya* [Practical scanning electron microscopy] / Dzh. Gouldsteyna, H. Yakovitsa; *per. s angl.* [translation from English] V. I. Petrova. – M. : Mir, 1978. – 656 p. (in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. Г. Д. Сухомлином (Україна), д-ром. техн. наук, проф. В. С. Вахрушевою (Україна)