



УДК 621.771:620.186.5

DOI 10.17073/0368-0797-2023-6-659-665



Оригинальная статья

Original article

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МАЛОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ 10Г2ФБЮ ПОСЛЕ ПРОКАТКИ В РЕЛЬЕФНЫХ ВАЛКАХ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧНОСТИ

Ю. И. Почивалов

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/4)

✉ pochiv@ispms.ru

Аннотация. Исследованы особенности формирования зеренной структуры и механические свойства малолегированной стали 10Г2ФБЮ после прокатки в плоских и рельефных валках в условиях обычной и электропластической деформации. При прокатке в рельефных валках достигается существенная неравномерность деформации по сечению проката, что выражается в локализованных макросдвигах, направленных под углом 45° к плоскости проката. Локальная сдвиговая деформация при прокатке в рельефных валках приводит к возрастанию предела прочности исследуемой стали при снижении пластичности прокатанного материала. Прокатка стали 10Г2ФБЮ в рельефных валках в условиях электропластичности обеспечивает максимальные прочностные характеристики с высоким коэффициентом упрочнения на стадии макродеформации. Пластичность при этом сохраняется на достаточном для технологических целей уровне. Структурные металлографические и электронно-микроскопические исследования показали, что повышение прочности стали при прокатке в рельефных валках в условиях электропластического эффекта обусловлены измельчением зерен феррита до размеров менее 0,5 мкм. Фрактографические исследования выявили изменения характера разрушения в стали при прокатке в рельефных валках, которое выражается в появлении областей хрупкого разрушения в прокатанных образцах. Переход к прокатке в условиях электропластичности повышает долю вязкого разрушения и пластичность стали 10Г2ФБЮ.

Ключевые слова: сталь 10Г2ФБЮ, прокатка, рельефные валки, электропластическая деформация, разрушение, структура

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, тема номер FWRW-2021-0009.

Для цитирования: Почивалов Ю.И. Структура и свойства малолегированной стали 10Г2ФБЮ после прокатки в рельефных валках в условиях электропластичности. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(6):659–665. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-659-665>

STRUCTURE AND PROPERTIES OF LOW-ALLOY STEEL 10G2FBYu AFTER ROLLING IN EMBOSSED ROLLS UNDER CONDITIONS OF ELECTROPLASTICITY

Yu. I. Pochivalov

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/4 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

✉ pochiv@ispms.ru

Abstract. The article describes the features of grain structure formation and mechanical properties of low-alloy steel 10G2FBYu after rolling in flat and embossed rolls under the conditions of ordinary and electroplastic deformation. When rolling in embossed rolls, a significant non-uniformity of deformation is achieved over the rolling cross-section, expressed in localized macroshifts directed at an angle of 45° to the rolling plane. It is shown that local shear deformation during rolling in embossed rolls leads to an increase in the ultimate strength of the steel under study with a decrease in plasticity of the rolled material. Rolling 10G2FBYu steel in embossed rolls under conditions of electroplasticity provides maximum strength characteristics with a high hardening coefficient at the stage of macrodeformation. At the same time, the plasticity is maintained at a level sufficient for technological purposes. Structural metallographic and electron microscopic studies showed that increase in strength of steel when rolling in embossed rolls under conditions of electroplastic effect is caused by the refinement of ferrite grains to sizes less than 0.5 μm . Fractographic studies revealed changes in the nature of fracture in steel during rolling in embossed rolls, which is expressed in appearance of areas of brittle fracture in the rolled samples. Rolling under conditions of electroplasticity increases the proportion of ductile fracture and ductility of 10G2FBYu steel.

Keywords: 10G2FBYu steel, rolling, embossed rolls, electroplastic deformation, fracture, structure

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the state task of the Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, subject no. FWRW-2021-0009.

For citation: Pochivalov Yu.I. Structure and properties of low-alloy steel 10G2FBYu after rolling in embossed rolls under conditions of electroplasticity. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(6):659–665. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-659-665>

ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества листового проката является важнейшей задачей прокатного производства. Достижение более высоких прочностных характеристик малолегированных сталей, используемых в строительстве, для производства нефтегазового оборудования и труб для перекачки нефти и газа, может быть достигнуто разными способами: целенаправленным легированием [1], контролируемой прокаткой [1; 2], асимметричной прокаткой [3] и другими способами [4 – 6]. Для получения высокопрочного мелкозернистого проката предложено использовать деформационные схемы проката с локальными макросдвигами, которые обеспечиваются прокаткой листового материала в валках с кольцевыми проточками [7 – 9]. В работе [10] показано, что прокат в таких валках стали 09Г2БТ увеличивает предел прочности на 10 %, ударную вязкость на 17 – 47 МДж/м² при снижении анизотропии r с 2,8 при прокатке в гладких валках до 1,9 при прокатке в валках с кольцевыми проточками.

В работах [11 – 13] прокатка в валках с рифленой или волнистой поверхностью рассматривается как интенсивная пластическая деформация с локальными макросдвигами, образующимися в результате локального деформационного воздействия на прокатываемый металл. Такие макросдвиги обеспечивают проработку прокатываемого металла на всю толщину листа, измельчение зеренной структуры и формирование мелкокристаллической зеренной структуры. Это приводит к повышению прочностных характеристик прокатанного металла, в том числе и к увеличению ударной вязкости.

Качество прокатываемого металла может быть существенно улучшено при использовании специальных методов прокатки в сочетании с дополнительным воздействием на прокатываемый металл низкочастотными импульсами электрического тока высокой плотности (до 1000 А/мм²) [14 – 16]. В основе этого способа лежит электропластический эффект, заключающийся в увеличении пластичности материалов под воздействием электрического тока. При прокатке в режиме электропластической деформации были достигнуты более высокие степени деформации без применения промежуточных высокотемпературных отжигов [17 – 19]. В работе [20] было показано, что при прокатке с током сплавов на основе титана и никелида титана может быть сформирована нанокристаллическая структура, что значительно повышает их прочностные характеристики.

В настоящей работе выполнено исследование влияния комбинированного метода проката в рельефных валках с дополнительным воздействием на прокатываемый материал импульсов электрического тока на структуру и механические свойства малолегированной стали 10Г2ФБЮ в сравнении с прокатанной в плоских валках, в том числе в режиме электропластической деформации (ЭПД).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе выполнено исследование низколегированной низкоуглеродистой стали 10Г2ФБЮ. Содержание основных легирующих элементов в стали 10Г2ФБЮ, % (по массе): С 0,10; Mn 1,58; Si 0,38; S 0,005; P 0,015; Ti 0,019; Al 0,034; V 0,076; Nb 0,048; N₂ 0,008.

Для исследования использовали сталь в состоянии поставки (лист толщиной 56 мм после горячей прокатки) и после прокатки в плоских и рельефных валках с кольцевыми радиальными проточками. Заготовки для прокатки в виде прутков прямоугольного сечения размером 15×10 мм и длиной 200 мм вырезали из исходного листа вдоль направления проката. Для прокатки были использованы четыре режима. Режим 1: прокатка заготовок в плоских валках с толщины 10 мм до 1 мм без промежуточных отжигов в несколько проходов с обжатием за проход 0,2 мм, (в тексте – прокатка в плоских валках). Режим 2: прокатка образцов с 10 мм до 3 мм в плоских валках, с 3 мм до 1,6 мм в рельефных валках, с 1,6 мм до 1 мм в плоских валках также без промежуточных отжигов в несколько проходов с обжатием за проход 0,2 мм (в тексте – прокатка в рельефных валках). Режимы 3 и 4 прокатки отличались от режимов 1 и 2 наложением импульсов электрического тока частотой 4 кГц и длительностью 100 мкс от специального генератора импульсов мощностью 600 Вт (прокатка с ЭПД).

Прокат образцов стали проводили на лабораторном стане ВЭМ 3.

Механические испытания на одноосное растяжение выполнены на универсальной испытательной машине Instron-5582 со скоростью 10⁻⁴ с⁻¹ при комнатной температуре. Образцы стали 10Г2ФБЮ для механических испытаний были вырезаны в форме двусторонних лопаток, с рабочей длиной 25 мм, сечением 1×5 мм.

Металлографические исследования выполнены на оптическом микроскопе Zeiss Axiovert 25 CA.

Фрактографические исследования разрушенных образцов были проведены методом растровой элект-

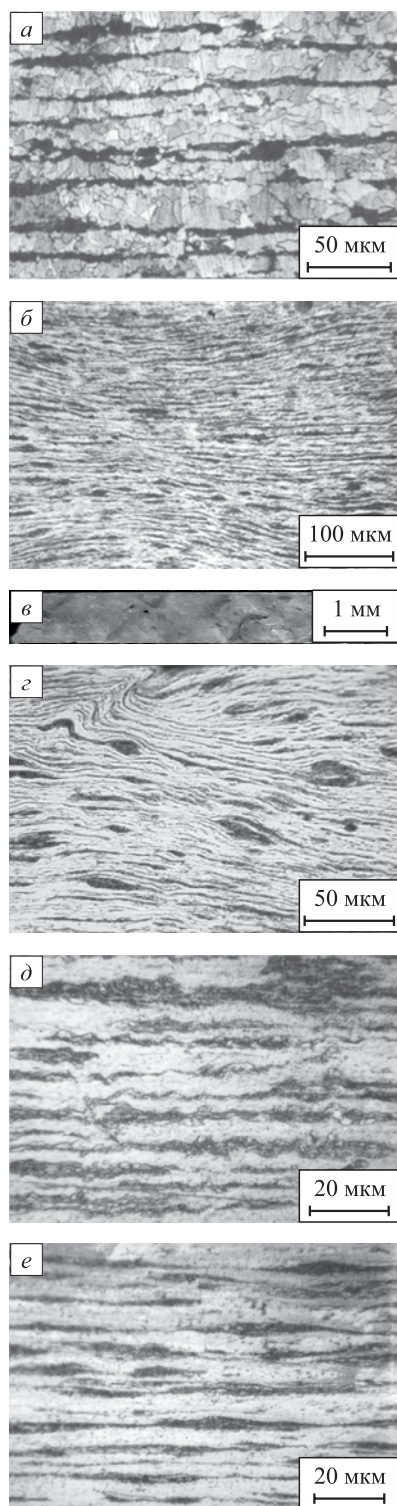


Рис. 1. Структура стали 10Г2ФБЮ в состоянии поставки и после прокатки в разных условиях:
 а – в состоянии поставки; б – после прокатки в плоских валках;
 в, з – после прокатки в рельефных валках;
 д – после прокатки в плоских валках с ЭПД;
 е – после прокатки в рельефных валках с ЭПД

Fig. 1. Structure of 10G2FBYu steel in the state of delivery and after rolling under different conditions:
 а – in the state of delivery; б – after rolling in flat rolls;
 в, з – after rolling in embossed rolls;
 д – after rolling in flat rolls with electroplastic deformation (EPD);
 е – after rolling in embossed rolls with EPD

ронной микроскопии на сканирующем микроскопе Tesla BS-300.

Электронно-микроскопический анализ выполнен на просвечивающем электронном микроскопе JEM–100 СХП при ускоряющем напряжении 100 кВ. Образцы для исследования вырезали на электроэрозионном станке, шлифовали до толщины 100 мкм, вырезали диски диаметром 3 мм и полировали до появления отверстия струйной электрополировкой в электролите: 125 мл CH_3COOH , 25 г GrO_3 , 5 мл H_2O .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, а изображена структура стали 10Г2ФБЮ в состоянии поставки после травления в 4 %-ном растворе азотной кислоты.

Сталь 10Г2ФБЮ в состоянии поставки имеет типичную двухфазную зеренную структуру, зерна которой вытянуты вдоль направления проката, с феррито-перлитной полосчатостью (рис. 1, а). Размер зерен феррита составляет от 5 до 15 мкм, ширина полос перлита 3 – 7 мкм. Диаграмма растяжения исследуемой стали в состоянии поставки приведена на рис. 2, кривая 1, предел прочности стали 10Г2ФБЮ в этом состоянии составляет 563 ± 12 МПа при пластичности около 15 % (см. таблицу).

После прокатки в плоских валках сталь 10Г2ФБЮ приобретает структуру с вытянутыми вдоль направления проката зернами (рис. 1, б). Перлитные колонии при прокатке сильно измельчаются и трансформируются в мелкие частицы размером 3 – 5 мкм неправильной формы. Предел прочности стали после прокатки резко возрастает (рис. 2, таблица), но при этом существенно снижается пластичность – почти в два раза.

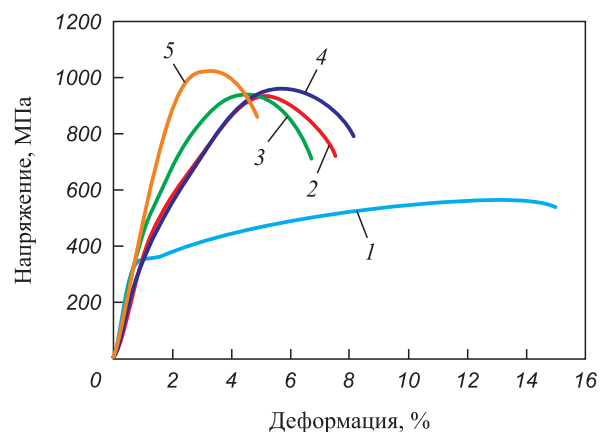


Рис. 2. Диаграммы растяжения стали 10Г2ФБЮ:
 1 – в состоянии поставки; 2 – после прокатки;
 3 – после прокатки в рельефных валках; 4 – после прокатки с ЭПД;
 5 – после прокатки в рельефных валках с ЭПД

Fig. 2. Stretching diagrams of 10G2FBYu steel:
 1 – in the state of delivery; 2 – after rolling;
 3 – after rolling in embossed rolls; 4 – after rolling with EPD;
 5 – after rolling in embossed rolls with EPD

**Механические свойства образцов стали 10Г2ФБЮ в состоянии поставки
и после прокатки без ЭПД и с ЭПД**

**Mechanical properties of 10G2FBYu steel samples in the state of delivery
and after rolling without and with EPD**

Состояние (вид обработки)	Предел упругости σ_0 , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение, %
В состоянии поставки	265 ± 22	353 ± 2	563 ± 12	15,0 ± 2
После прокатки	307 ± 27	502 ± 47	934 ± 14	7,5 ± 0,1
После прокатки в рельефных валках	321 ± 15	540 ± 29	938 ± 4	6,8 ± 0,1
После прокатки с ЭПД	278 ± 9	423 ± 24	958 ± 2	8,3 ± 0,1
После прокатки в рельефных валках с ЭПД	511 ± 16	905 ± 17	1024 ± 12	5,0 ± 0,1

Структура стали 10Г2ФБЮ после прокатки в рельефных валках представлена на рис. 1, в, г. При прокатке в рельефных валках достигается существенная неравномерность деформации по сечению проката, выражающаяся в локализованных макросдвигах, направленных под углом 45° к плоскости проката (рис. 1, в) и обусловленных локальной сдвиговой деформацией при прокатке в рельефных валках. После прокатки существенно измельчается зеренная структура стали и в ней формируется менее выраженная строчечная феррито-перлитная структура (рис. 1, г) относительно исходного образца стали (рис. 1, а). Прочностные характеристики после прокатки в рельефных валках практически такие же, как у стали 10Г2ФБЮ, прокатанной в плоских валках (рис. 2, таблица). При этом заметно повышение предела упругости, коэффициента упрочнения на стадии макродеформации и, как следствие, возрастание условного предела текучести – $\sigma_{0,2}$.

Прокатка в плоских валках в режиме электропластичности несколько повышает предел прочности и пластичность исследуемой стали по сравнению с обычной прокаткой (рис. 2, таблица). Структура стали, прокатанной в режиме электропластичности, такая же, как при обычной прокатке в плоских валках.

Структуры стали 10Г2ФБЮ после прокатки в плоских и рельефных валках в режиме электропластической деформации представлены на рис. 1, д, е. Размеры и морфология частиц цементита заметно различаются в зависимости от применяемого способа прокатки. Частицы цементита в стали 10Г2ФБЮ после прокатки в плоских валках с ЭПД (рис. 1, д) имеют большие размеры (средняя ширина пластин цементита составляет 3,5 мкм), чем после прокатки в рельефных валках с ЭПД (рис. 1, е) (средняя ширина пластин цементита 2,2 мкм). После обеих прокаток внутри ферритных зерен наблюдаются высокодисперсные частицы карбидов (рис. 1, д, е).

Приведенные выше результаты механических испытаний стали 10Г2ФБЮ после применения различных схем прокатки показывают, что прочностные свойства прокатанного материала очень сильно зависят от схемы

прокатки и применяемого дополнительного воздействия. При прокатке в рельефных валках, когда реализуется пластическое течение в продольном и поперечном направлениях с большими локальными макросдвигами, прочность стали 10Г2ФБЮ оказывается выше, чем при обычной прокатке в плоских валках. Прокатка образцов исследуемой стали при наложении мощных импульсов электрического тока в режиме электропластической деформации также обеспечивает повышение ее прочностных характеристик. Наибольшую прочность сталь 10Г2ФБЮ приобретает после прокатки в рельефных валках при одновременном воздействии сдвиговой деформации и импульсов электрического тока. В этом случае предел прочности повышается до 1000 МПа при резком возрастании коэффициента упрочнения на стадии макродеформации с 200 МПа при обычной прокатке до 500 МПа при прокатке в рельефных валках в режиме ЭПД.

Исследование микроструктуры стали 10Г2ФБЮ методом просвечивающей электронной микроскопии показало, что в состоянии поставки основную часть структуры занимает ферритная составляющая (рис. 3, а). Средний размер зерна составляет 5 – 10 мкм. Внутри и по границам зерен присутствуют выделения карбида железа Fe_3C пластинчатого или сферического типа. После прокатки в стали формируется мелкозернистая структура со средним размером зерен 5 – 7 мкм, внутри которых присутствует ячеистая дислокационная структура с разориентацией между ячейками от 2 до 10°. Отметим, что структура после прокатки очень неоднородная.

После прокатки стали 10Г2ФБЮ в рельефных валках средний размер зерна уменьшается до 2 – 3 мкм, сами зерна фрагментированы на ячейки с размерами менее 0,5 мкм. Уменьшение размера зерна при прокатке в рельефных валках связано со сдвиговыми напряжениями, которые способствуют измельчению зерен. Прокатка в условиях электропластической деформации при воздействии импульсов электрического тока способствует еще большему снижению среднего размера зерна (размером менее 1 мкм) и формированию ячеис-

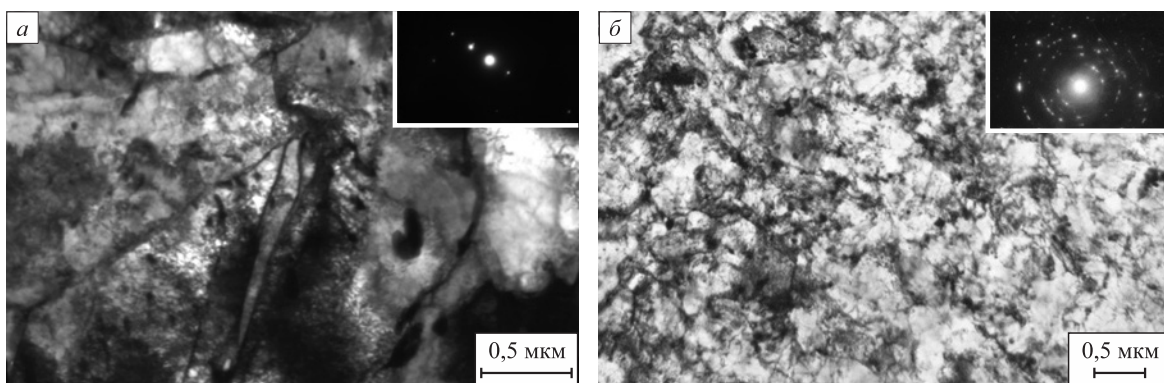


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения структуры стали 10Г2ФБЮ:
а – в состоянии поставки; б – после прокатки в рельефных валках

Fig. 3. Electron microscopic images of structure of 10G2FBYu steel:
а – in the state of delivery; б – after rolling in embossed rolls

той структуры с размерами менее 0,3 мкм. При данном режиме прокатки достигается наиболее высокая прочность исследуемой стали.

Аналогичные результаты получены в работе [21], где было установлено, что при прокатке латуни Л80 в валках с проточками средний размер исходного зерна уменьшается с 22 до 3 мкм, тогда как при традиционной прокатке величина зерна уменьшается только до 9 мкм. Создание мелкокристаллической структуры

также обеспечивает повышение прочностных свойств прокатываемого материала.

Исследование фактур разрушения образцов стали 10Г2ФБЮ после разрушения при активном растяжении показывает, что в образцах стали в состоянии поставки при разрушении формируется ножевидный излом, а поверхность разрушения характерна для пластичных материалов с чашечным видом излома (рис. 4, а, в). Размер ямок составляет от 0,5 до 15 мкм. Внутри неко-

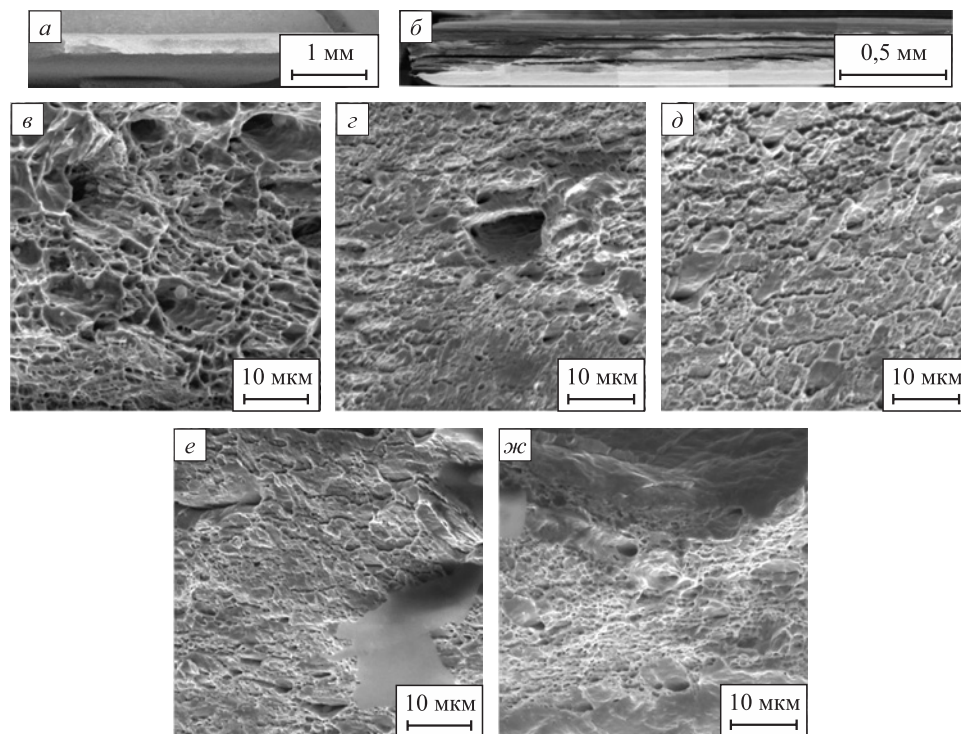


Рис. 4. Фактуры разрушения образцов стали 10Г2ФБЮ:
а, в – в состоянии поставки; б, г – после прокатки в плоских валках; д – после прокатки в рельефных валках;
е – после прокатки в плоских валках с ЭПД; ж – после прокатки в рельефных валках с ЭПД

Fig. 4. Fracture factors of 10G2FBYu steel samples:
а, в – in the state of delivery; б, г – after rolling in flat rolls; д – after rolling in embossed rolls;
е – after rolling in flat rolls with EPD; ж – after rolling in embossed rolls with EPD

торых ямок присутствуют мелкие (размером ≈ 2 мкм) неметаллические включения. При испытании образцов на растяжение в этом состоянии пластичность стали 10Г2ФБЮ максимальна. Некоторая вытянутость ямок излома свидетельствует о присутствии сдвиговой компоненты напряжений при разрушении.

На поверхности разрушения образцов стали 10Г2ФБЮ, которые были прокатаны в плоских валках, появляются расслоения вдоль плоскостей проката, ямки излома сильно вытянуты, появляются области квазискола (рис. 4, б, в). Пластичность стали после прокатки резко снижается. Эти особенности разрушения сохраняются при прокатке в рельефных валках и при прокатке в режиме электропластической деформации. После прокатки в рельефных валках увеличивается доля квазискола и на фрактограммах поверхности разрушения видны большие участки, где наблюдается квазихрупкий вид разрушения (рис. 4, д). Для образцов, прокатанных в режиме электропластической деформации, характерно снижение доли хрупкого разрушения. На рис. 4, е, ж представлены фрактограммы разрушения образцов, прокатанных в плоских и рельефных валках в режиме электропластической деформации.

Выводы

Локальная сдвиговая пластическая деформация при прокатке в рельефных валках приводит к образованию полос локализованной деформации, которые обеспечивают эффективное измельчение зеренной структуры и пластин перлита. Структурные исследования показали, что при такой прокатке в условиях электропластической деформации формируется субмикроструктурная структура с размером зерна менее 0,5 мкм.

Формирование субмикроструктурной структуры приводит к существенному повышению прочностных характеристик исследуемой стали, в том числе коэффициента упрочнения на стадии макродеформации. Пластичность при этом снижается, но остается на достаточном уровне для технологического применения. Фрактографические исследования выявили изменения характера разрушения в стали при прокатке, которое выражается в появлении областей хрупкого разрушения в прокатанных образцах. Переход к прокатке в условиях электропластичности повышает долю вязкого разрушения и пластичность стали 10Г2ФБЮ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Эфрон Л.И. *Металловедение в «большой» металлургии. Трубы и стали*. Москва: Металлургия; 2012:696.
2. Derevyagina L.S., Pochivalov Y.I., Gordienko A.I. Structural modification of heat treated steel 10Mn2VNbAl and its properties under tension. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1783:020038. <https://doi.org/10.1063/1.4966331>
3. Kawalek A. The theoretical and experimental analysis of the effect of asymmetrical rolling on the value of unit pressure. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;157-158:531–535. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.142>
4. Saito Y., Utsunomiya H., Tsuji N., Sakai T. Novel ultra-high straining process for bulk materials – development of the accumulative roll-bonding (ARB) process. *Acta Materialia*. 1999;47(2):579–583. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00365-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00365-6)
5. Richert M., Stüwe H.P., Zehetbauer M.J., Richert J., Pippan R., Motz Ch., Schafner E. Work hardening and microstructure of AlMg5 after severe plastic deformation by cyclic extrusion and compression. *Materials Science and Engineering: A*. 2003;355(1-2):180–185. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00046-7)
6. Коротовская С.В. *Разработка технологии термомеханической обработки, обеспечивающей унификацию судостроительных и трубных сталей по химическому составу за счет формирования ультрамелкозернистой и субмикроструктурной структуры: автореф... дис. канд. техн. наук*. Санкт-Петербург; 2014:24.
7. Меандров Л.В., Воронцов В.К., Погорельский В.И. и др. Совершенствование условий деформирования непрерывнолитых слэбов с целью улучшения качества проката. *Сталь*. 1982;(3):43–45.
Meandrov L.V., Vorontsov V.K., Pogorzel'skii V.I., etc. Improving the conditions for deformation of continuously cast slabs in order to improve the quality of rolled products. *Stal'*. 1982;(3):43–45. (In Russ.).
8. Демчук Н.Н. *Моделирование процесса прокатки толстых листов с дополнительным локальным деформационным воздействием: автореф. дис. канд. техн. наук*. Москва: МИСиС; 2000:25.
9. Машеков С.А., Абсадыков Б.Н., Тусупкалиева Э.А., Машекова А.С., Акимбекова М.М., Мауленова М.Р. Структура и свойства алюминиевого сплава АД31 после прокатки в волнистых валках и продольно-клиновом стане. *Системы. Методы. Технологии*. 2018;(1(37)):36–44. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-1-36-44>
Mashekov S.A., Absadykov B.N., Tusupkalieva E.A., Masheкова A.S., Akimbekova M.M., Maulenova M.R. Structure and properties of aluminum alloy AD31 after rolling in helical rolls and longitudinal-wedge mill. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2018;(1(37)):36–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-1-36-44>
10. Naizabekov A., Lezhnev S., Koinov T., Mazur I., Panin E. Research and development of technology for rolling of high-quality plates of non-ferrous metals and alloys in relief rolls. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016;51(4):363–370.
11. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Ашкеев Ж.А. Исследование процесса прокатки в рельефных валках. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2001;44(2):25–26.
Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Ashkeev Zh.A. Study of rolling in embossed rolls. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2001;44(2):25–26. (In Russ.).
12. Бринза В.В., Демчук Н.Н., Ярмач Г.М. Исследование закономерностей пластического формоизменения раскатов со сложной конфигурацией поперечного сечения. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1996;39(11):29–33.
Brinza V.V., Demchuk N.N., Yarmak G.M. Study of regularities of plastic forming of rolls with a complex cross-

sectional configuration. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1996;39(11):29–33. (In Russ.).

13. Трайно А.И., Полухин В.П., Николаев В.А. Интенсивные макросдвиги как нетрадиционное средство обеспечения высокого качества листового проката. *Металлург*. 2011;(5):57–62.
Traino A.I., Polukhin V.P., Nikolaev V.A. Macro shears as non-traditional aid for provision of sheet products high quality. *Metallurg*. 2011;(5):57–62. (In Russ.).
14. Спицын В.И., Троицкий О.А. *Электропластическая деформация металлов*. Москва: Наука; 1985:160.
15. Громов В.Е., Зуев Л.Б., Козлов Э.В., Целлермайер В.Я. *Электростимулированная пластичность металлов и сплавов*. Москва: Недра; 1996:290.
16. Conrad H., White J., Cao W.D., Lu X.P., Sprecher A.F. Effect of electric current pulses on fatigue characteristics of polycrystalline copper. *Materials Science and Engineering: A*. 1991;145(1):1–12.
[https://doi.org/10.1016/0921-5093\(91\)90290-4](https://doi.org/10.1016/0921-5093(91)90290-4)
17. Stolyarov V.V. Features of electroplastic effect in alloys with martensite transformation. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2018;31:1305–1310.
<https://doi.org/10.1007/s40195-018-0747-z>
18. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы*. Москва: МГИУ; 2001:844.
19. Ruszkiewicz B.J., Grimm T., Ragai I., Mears L., Roth J.T. A review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2017;139(11):110801.
<https://doi.org/10.1115/1.4036716>
20. Stolyarov V. Deformation behavior at rolling and tension under current in TiNi alloy. *European Symposium on Martensitic Transformations (ESOMAT)*. 2009:06033.
<https://doi.org/10.1051/esomat/200906033>
21. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Volokitina I.E., Panin E.A. Evolution of the brass microstructure during rolling in relief and smooth rolls. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1100:012005.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1100/1/012005>

Сведения об авторе

Юрий Иванович Почивалов, к.ф.-м.н. ведущий научный сотрудник лаборатории физической мезомеханики и неразрушающих методов контроля, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0003-0236-816X
E-mail: pochiv@ispms.ru

Information about the Author

Yurii I. Pochivalov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher of the Laboratory of Physical Mesomechanics and Non-Destructive Testing, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0003-0236-816X
E-mail: pochiv@ispms.ru

Поступила в редакцию 01.11.2022
После доработки 07.09.2023
Принята к публикации 11.09.2023

Received 01.11.2022
Revised 07.09.2023
Accepted 11.09.2023